

on résume les résultats dans le tableau suivant :

N.B : il faut commencer par P_A^α ou P_B^β puis faire le calcul : $P_A^\alpha + P_B^\beta = 1$ pour déterminer les autres P_A^β et P_B^α

$\downarrow P \rightarrow$	P_A^α	P_A^β	P_B^β	P_B^α
1	0	3/4	1/4	3/4
0,25	13/16	3/16	14/32	18/32
0,5				
0,75				
1	1	0	1	0

Problème : Comment peut-on savoir le type de solution solide (Insertion ou substitution) à partir de la masse volumique ?

* Il faut suivre les étapes suivantes :

- calculer ρ_{exp} .

- calculer ρ pour le S.S.I : $\rho = \frac{n(M_A + \frac{n_A}{n_B} M_B)}{V a^3}$

- calculer ρ pour le S.S.S : $\rho = \frac{n \cdot (x_A \cdot M_A + x_B \cdot M_B)}{V a^3}$

→ Comparer ces valeurs théoriques avec ρ_{exp} .

II) Défauts dans les cristaux :

Le cristal parfait ne se rencontre jamais dans la nature. Les cristaux réels contiennent toujours un certain nombre de défauts en quantité variable. La présence et le nombre de défauts dépendent du type de liaisons chimiques.

- le type de liaisons chimiques.

- la pureté du cristal

- la méthode de préparation.

- les traitements thermomécaniques.

Les défauts se classent généralement en :

① défauts ponctuels. Ex : les lacunes

② défauts linéaires ou dislocations.

③ défauts bidimensionnels (surfacique). Ex : les joints de grains.

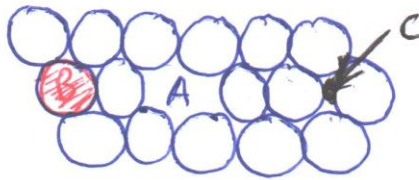
④ défauts volumiques. Ex : les précipités, amas (clusters) et forêts de dislocations.

II-1) Défauts Ponctuels : C'est une perturbation de l'ordre du cristal de l'ordre interatomique. Il existe 3 types de défauts ponctuels : les lacunes, les interstitiels et les atomes en substitution.

A: lacune (vide)

B: Atome en substitution

C: Atome en Insertion
(Interstitial).



II-1-1) L'enthalpie de formation et de migration

a/ formation: la création d'un défaut ponctuel provoque une augmentation dans l'enthalpie libre ΔG_f (l'enthalpie libre de formation)

$$\Delta G_f = \Delta H_f - T \Delta S_f$$

- l'enthalpie de formation (ΔH_f) est calculée comme suit:

$$\Delta H_f = \Delta E_f + P \Delta V_f \quad / \quad \Delta V_f = \Omega + \Delta V_r$$

où:

ΔE_f : c'est l'énergie de formation d'une lacune.

P: pression de mesure (Interne).

ΔV_f : le volume de formation

ΔV_r : le volume de relaxation

Ω : " " " l'atome détacher.

b/ Migration: pour déplacer une lacune d'un site à un site voisin, il est nécessaire une barrière énergétique ΔA_m .

- l'enthalpie libre peut être déterminée par la relation:

$$\Delta G_m = \Delta A_m - T \Delta S_m$$



II-1-2) Concentration des défauts ponctuels (lacune).

La concentration d'équilibre en lacunes est en relation avec la température.

comme suit: $C_f = \frac{n_f}{N} = \exp(-\Delta G_f / k_B T)$

où: n_f : nombre des lacunes

N: le nombre total d'atome.

ΔG_f : l'enthalpie libre de formation

k_B : Constante de Boltzmann.

T: Température de mesure.

* N.B.: la démonstration de cette formule sera effectuée dans le TD.

II-1-3) Etude expérimentale des défauts ponctuels à l'équilibre

il existe plusieurs méthodes ~~supposées~~ qui sont :

* Mesure simultanée de la longueur et du paramètre du réseau

Elle permet de donner une mesure absolue de la concentration en défauts (lacune et interstitice) dans le ~~structure cubique~~ structure cubique, comme suit :

$$C_p - C_i = 3 \left(\frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta a}{a} \right)$$

on a : $C_p \gg C_i \Rightarrow \boxed{C_p = 3 \left(\frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta a}{a} \right)}$

* Mesure de la capacité colorimétrique (ΔC_p) :

$$\Delta C_p = N C_p \cdot \frac{\Delta H_f^2}{k_B T^2} = N \exp\left(-\frac{\Delta G_f}{k_B T}\right) \cdot \exp\left(\frac{\Delta H_f^2}{k_B T^2}\right)$$

* Mesure de la résistivité à basse température ($\Delta \rho$) :

Loi de MATTHIESSE $\rightarrow \boxed{\Delta \rho = \frac{m v_F C A}{n \cdot e^2}}$

Où : A : Section efficace de diffusion,

m : masse de l'électron,

n : nombre d'électrons par atome

e : la charge de l'électron,

v_F : vitesse de Fermi des électrons,

C : concentration des défauts.

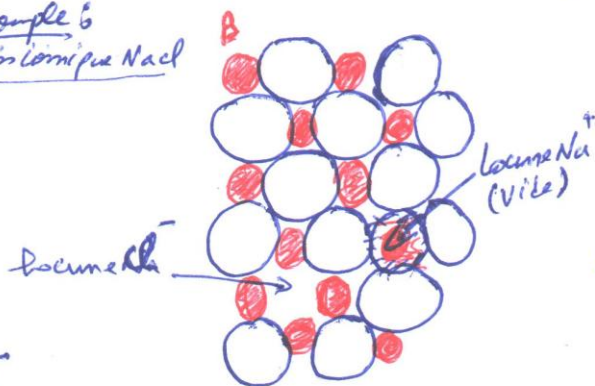
Cette loi s'applique lorsque les concentrations ne sont pas ~~très~~ ^{assez} élevées.

* Notions de Frenkel et Schottky dans les composés ioniques :

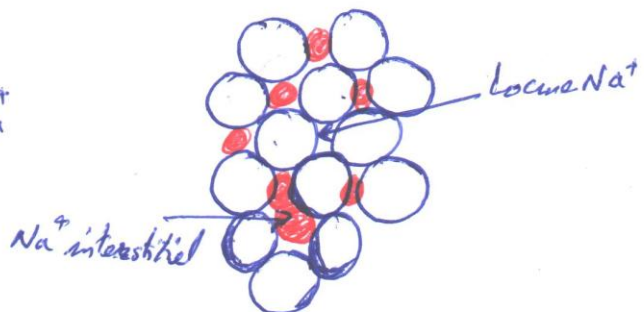
- deux lacunes de charges opposées \Leftrightarrow défauts Schottky.

- lacune + atome interstitiel \Leftrightarrow défaut Frenkel

Exemple 6
Solution ionique NaCl



défauts schottky



défaut Frenkel,

Cl⁻
● Na⁺

II-2) Défauts linéaires (Dislocations):

- La dislocation est une perturbation dans le cristal autour d'une ligne (rangée réticulaire). Les dislocations sont obtenues par le glissement \vec{b} d'une partie du cristal le long d'un plan.

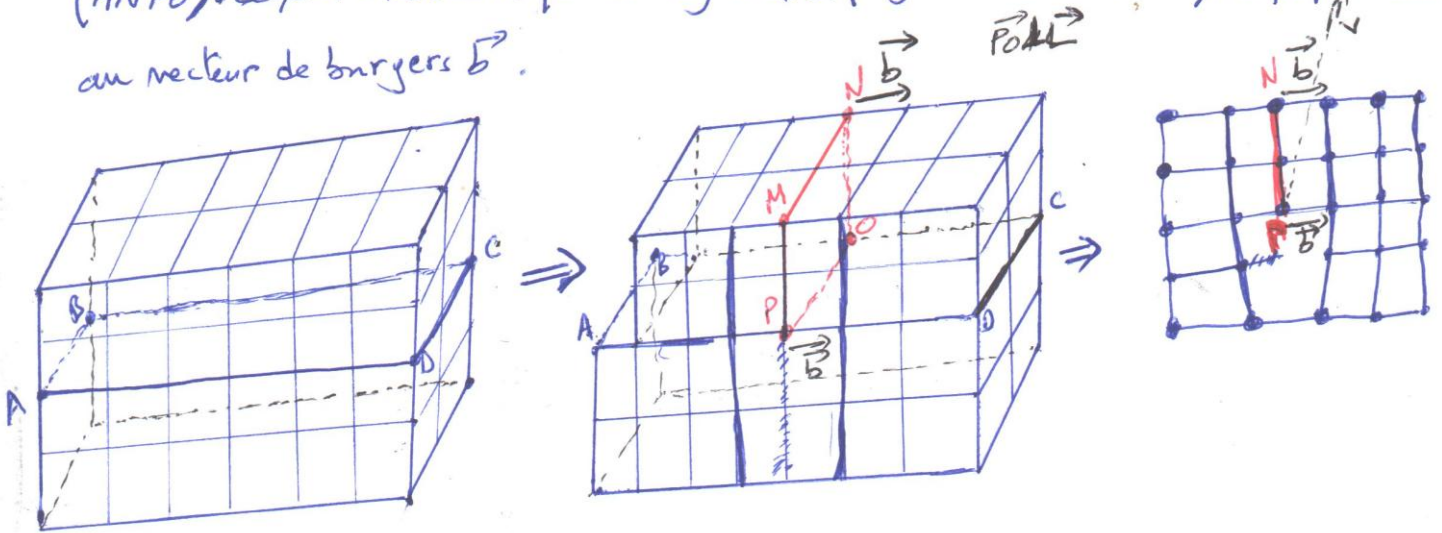
- La dislocation se caractérise par une ligne de dislocation et un vecteur de Burgers \vec{b} (vecteur de glissement), à partir de cela on distingue trois types de dislocations:

- * Dislocation coin ($\vec{b} \perp \vec{L}$)
- * Dislocation vis. ($\vec{b} \parallel \vec{L}$)
- * Dislocation mixte. (\perp et \parallel).

II-2.1) Les différents types de dislocations et leurs formations:

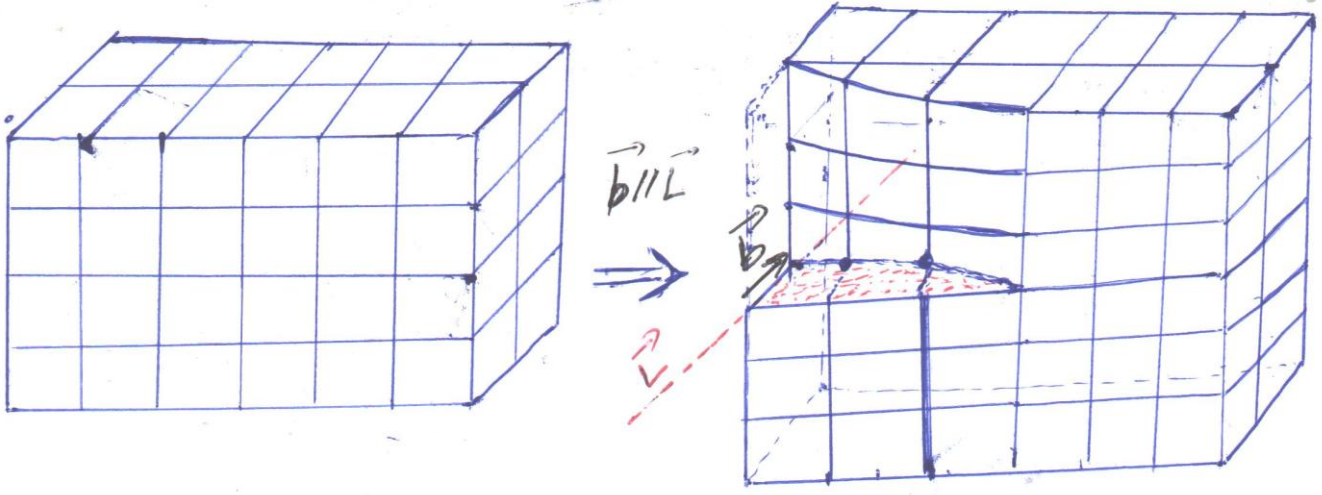
* Dislocation coin: pour laquelle le vecteur \vec{b} est perpendiculaire à la ligne de dislocation \vec{L} , c-à-d le déplacement des atomes se fait perpendiculairement à la ligne \vec{L} . ($\vec{b} \perp \vec{L}$)

Concernant sa formation, on prend un plan ABCD d'un cristal à réseau cubique idéal, après on fait un déplacement de la partie supérieure d'une distance interatomique. Après le déplacement on voit l'ajout d'un demi plan atomique (MNPO). On observe que la ligne (PO) (ligne de dislocation) est perpendiculaire au vecteur de Burgers \vec{b} .



* Dislocation vis: pour laquelle le vecteur de Burgers \vec{b} est parallèle à la ligne de dislocation \vec{L} , c-à-d le déplacement des atomes se fait parallèlement à la ligne \vec{L} . ($\vec{b} \parallel \vec{L}$).

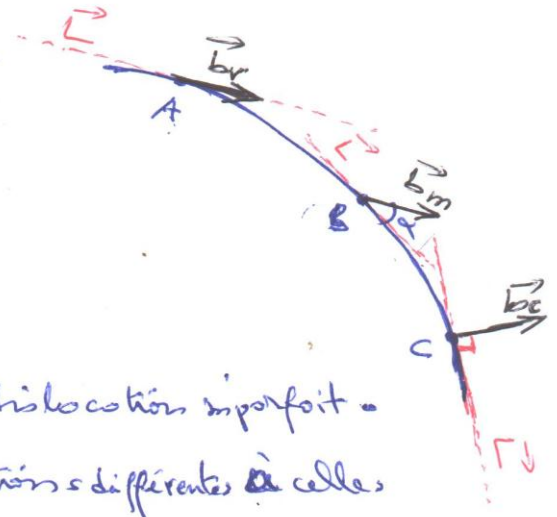
- Concernant la formation de ce type de dislocation, il résulte d'un cisaillement de deux portions d'un cristal l'une par rapport à l'autre, effectuée le long d'un plan cristallographique.



* Dislocation mixte : Lorsque la ligne de dislocation \vec{L} est rectiligne. Cette ligne sépare les parties d'un cristal restées immobiles et celles qui ont subi le déplacement (glissement par \vec{b}).

• D'après le schéma, la dislocation mixte par définition c'est la superposition de deux dislocations, coin et vis, tel que :

$$\vec{b}_m = \vec{b}_c + \vec{b}_v \text{ où } b_c = b \sin \alpha, b_v = b \cos \alpha$$



* Il y a la notion de dislocation parfait et dislocation imparfait. Dans ce dernier les atomes occupent des positions différentes de celles occupées initialement (la structure cristalline perd sa périodicité) et le vecteur \vec{b} n'est plus un vecteur de translation.

par contre la dislocation parfait les atomes occupent des positions équivalentes à celles précédentes (la structure conserve sa périodicité), et le vecteur \vec{b} fait la translation.

Remarque : la dislocation parfait peut être décomposée en deux dislocations imparfaites :

$$\vec{b}_p = \vec{b}_{imp1} + \vec{b}_{imp2} \xrightarrow{\text{conditions énergétiques}} \|\vec{b}_p\|^2 \leq \|\vec{b}_{imp1}\|^2 + \|\vec{b}_{imp2}\|^2$$

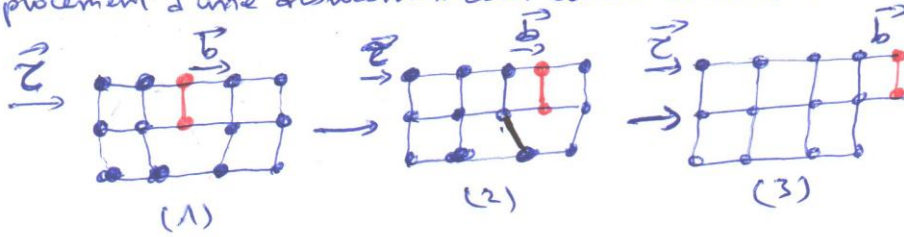
Energie moins

III-2-2) Mouvement de dislocations

- Le processus de déplacement des dislocations dans leurs plans de glissement constitue la base du mécanisme de la déformation plastique dans les matériaux métalliques.

La figure ci-dessous nous montre le mouvement des atomes impliqués dans le

déplacement d'une dislocation coin comme suit :

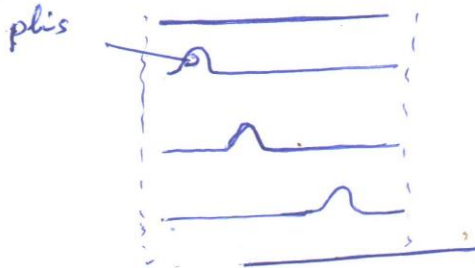


- on peut utiliser l'image d'un lourd tapis que l'on voudrait déplacer

sur le sol. Deux méthodes pour faire ce déplacement :

① par un glissement suivant un coin.

② " une image de la propagation des dislocations dans les cristaux.



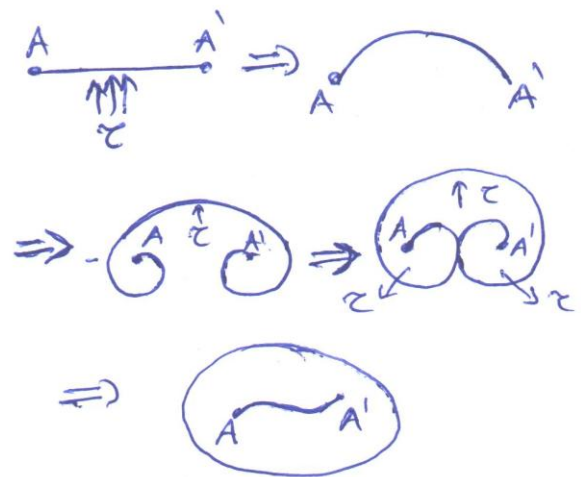
* Multipliation de dislocation (mécanisme Frank-Read)

Supposons une dislocation fixée dans un plan de glissement aux points A et A'.

Sous l'action de contrainte τ , la dislocation

s'incurve et forme deux spirales.

les deux spirales se touchent et forment une boucle fermée et un nouveau secteur de dislocation.

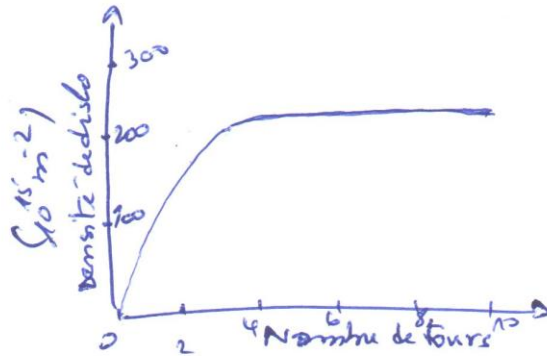


Source Frank-Read.

II-2) Densité de dislocations : (cm^{-2}) (ρ_p)

C'est la longueur totale de dislocations par unité de volume ($(\text{cm}/\text{cm}^3) = \text{cm}^{-2}$).

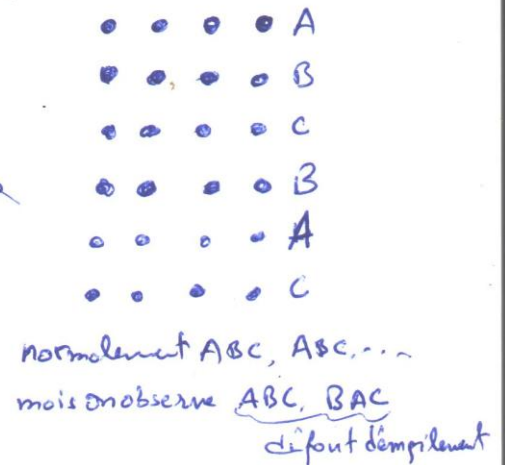
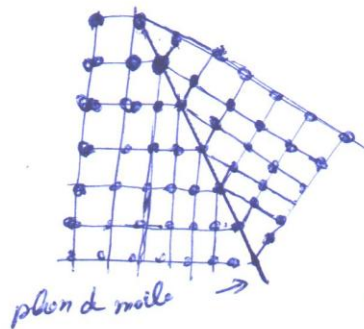
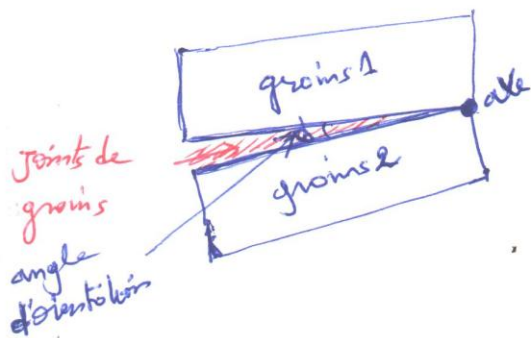
- Exemple : la variation de densité de dislocation est exprimée de l'alliage Cu-2.5Ni-0.6Si (en points) en fonction de nombre de tours de HPT est représentée comme suit :



II-3) Défauts bidimensionnels (Surfacique) :

Un défaut bidimensionnel (planaire ou surfacique) est une perturbation dans le cristal de l'ordre d'un plan d'atome. Il existe plusieurs variétés de ce type de défauts :

- joints de grains
- les modes,
- les fortes d'empilement.



II-4) Défaut volumique :

Les défauts volumiques les plus courants sont les précipités et les clusters (amas).

