

II.4.1 Déformation plastique d'un monocristal : faits expérimentaux

Rappel : Une contrainte est une force sur une surface et s'écrit $\sigma = \frac{F}{S}$. Lorsque la force est appliquée perpendiculairement à la surface la contrainte est dite normale ; si la force agit tangentiellement sur la surface la contrainte est dite tangentielle et elle est habituellement notée τ . Si la force fait un certain angle avec la normale à la surface on peut la décomposer en une composante normale et une composante tangentielle.

Un cristal soumis à une force (ou une contrainte) se déforme, par exemple il s'allonge. Si en enlevant la force le cristal revient à ses dimensions initiales, on dit que la déformation est élastique. Si le cristal ne reprend pas ses dimensions initiales il y a une déformation permanente, on dit alors que la déformation est plastique.

II.4.1.1 Systèmes de glissement.

On considère une éprouvette cylindrique taillée dans un monocristal. Celle-ci est soumise à une contrainte uni-axiale de traction σ . En augmentant progressivement la contrainte, on voit apparaître, au-delà d'une certaine valeur, des lignes parallèles sur la surface polie de l'échantillon dont le nombre augmente avec l'intensité de la contrainte. Ces lignes traduisent le glissement d'une partie de l'échantillon par rapport à l'autre. De plus, ce glissement ne s'effectue pas de manière aléatoire mais plutôt suivant des plans cristallographiques denses et des directions denses contenues dans ces plans. Les lignes de glissement sont donc les intersections des plans de glissement avec la surface de l'échantillon. La combinaison d'un plan de glissement P et d'une direction de glissement Δ appartenant à ce plan, constitue un **système de glissement**. Les systèmes de glissement dépendent de la structure cristalline du cristal, de la température de déformation ainsi que de la vitesse de déformation. Ces informations sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau II.4.1 : Structure et systèmes cristallins pour quelques métaux.

Structure	P	Δ	Nombre de système de glissement	Exemple de métaux
CFC	{111}	$\langle 110 \rangle$	12	Al, Cu, Ni, $F_{e\gamma}$, ...
CC	{110}	$\langle 111 \rangle$	12	Nb, Mo, $F_{e\alpha}$, ...
	{211}	$\langle 111 \rangle$	12	$F_{e\alpha}$, W, ...
	{321}	$\langle 111 \rangle$	24	$F_{e\alpha}$, K, ...
HC	{0001}	$\langle 11\bar{2}1 \rangle$	3	Cd, Zn, Mg, ...
	{10 $\bar{1}$ 0}	$\langle 11\bar{2}1 \rangle$	3	Zr, Ti, (température ambiante)
	{10 $\bar{1}$ 1}	$\langle 11\bar{2}1 \rangle$	3	Zr, Ti, Mg (températures élevées)

II.4.1.2 Contrainte critique de glissement.

La figure II.4.1 montre un échantillon soumis à une contrainte uni-axiale de traction sur laquelle sont représentés les éléments du système de glissement (plan et direction). La contrainte appliquée $\sigma = \frac{F}{S_0}$ a deux composantes : l'une normale au plan de glissement $\sigma_N = \frac{F_N}{S}$ et l'autre dans le plan de glissement suivant la direction de glissement $\sigma_T = \tau = \frac{F_T}{S} = \frac{F \cos \theta}{S}$. Les surfaces S et S_0 sont reliées par la relation suivante : $S_0 = S \cos \chi$, la contrainte tangentielle s'écrit donc :

$$\tau = \frac{F}{S_0} \cos \theta \cdot \cos \chi = \sigma \cdot \cos \theta \cdot \cos \chi$$

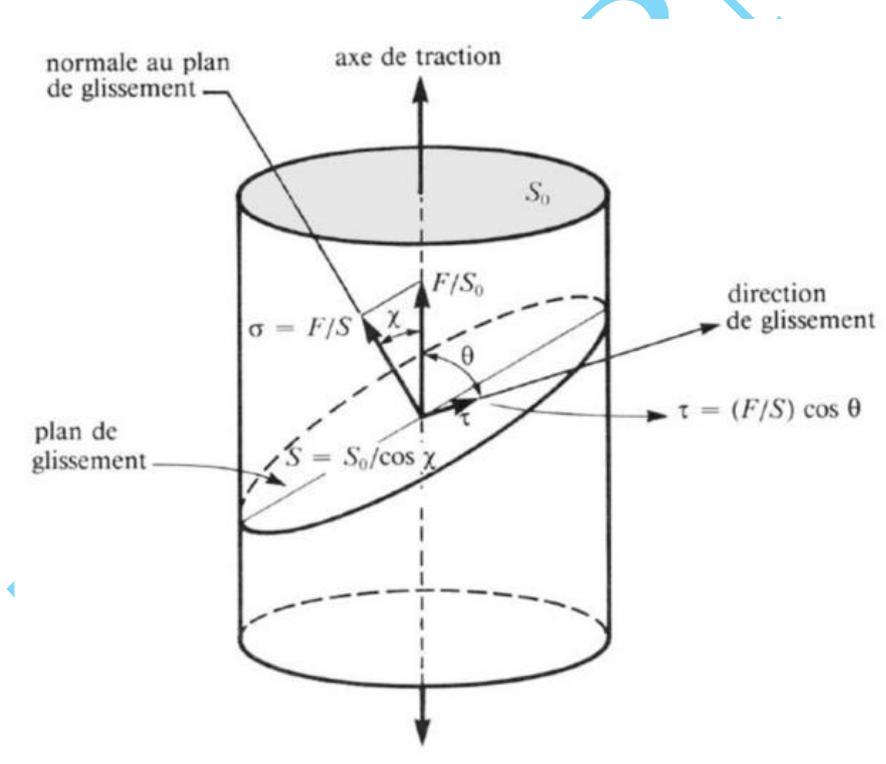


Figure II.4.1 : Décomposition de la contrainte appliquée $\frac{F}{S_0}$ en deux composantes respectivement normale et tangentielle au plan de glissement de surface S .

Cette équation est connue sous le nom de **loi de Schmid** et le terme $\cos \theta \cdot \cos \chi$ est le facteur de Schmid. La contrainte τ s'appelle **la contrainte de cisaillement, de glissement ou encore la cission**. L'équation montre aussi que, pour un système de glissement donné, l'application d'une contrainte de traction à un cristal induit dans ce cristal une contrainte de

cisaillement qui agit dans le plan de glissement et qui est proportionnelle à cette contrainte. Le glissement suivant le plan P dans la direction Δ ne se produit que si la contrainte appliquée σ , plus précisément sa composante appliquée sur le plan de glissement, dépasse une certaine valeur critique τ_c , appelée **contrainte critique de glissement (ou de cisaillement)**. C'est donc cette contrainte qui est responsable du glissement d'une partie du cristal par rapport à une autre partie.

II.4.1.3 : Contrainte critique théorique de glissement.

Cette contrainte a été évaluée par Frenkel. Dans son modèle, il suppose que sous l'application d'une contrainte τ suffisante, la partie supérieure du cristal **parfait** glisse sur la partie inférieure de manière rigide, c'est-à-dire que tous les atomes d'un plan P_{i+1} sont déplacés en phase de leurs positions d'équilibre d'une même quantité x par rapport à ceux du plan P_i comme schématisé dans la figure II.4.2.

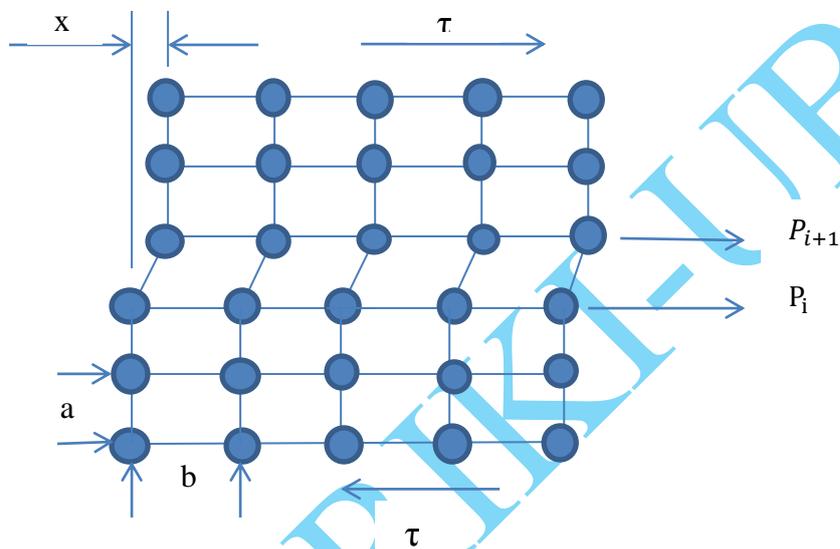


Figure II.4.2 : Glissement rigide d'une partie du cristal par rapport à l'autre.

En supposant que la contrainte τ soit une fonction sinusoïdale de x , de période b , elle s'écrit :

$$\tau = \tau_{th} \sin\left(2\pi \frac{x}{b}\right) \approx \tau_{th} \cdot 2\pi \frac{x}{b} \quad (\text{les déplacements } x \text{ sont suffisamment faibles}). \quad (1)$$

τ_{th} , représente la contrainte critique théorique.

Par ailleurs, la loi de Hooke s'écrit:

$$\tau = \mu \frac{x}{a}, \text{ où } \mu \text{ représente le module de cisaillement du cristal.} \quad (2)$$

Des équations (1) et (2), on en déduit que la contrainte critique théorique s'écrit :

$$\tau_{th} = \frac{\mu}{2\pi} \frac{b}{a}. \text{ Pour } a \approx b, \text{ l'équation devient :}$$

$$\tau_{th} \approx \frac{\mu}{6}. \quad (3)$$

Le calcul de la contrainte critique théorique à partir de l'équation (3) pour un certain nombre de métaux donne des valeurs 10^3 à 10^5 fois plus élevées que les valeurs expérimentales. Cette différence ne peut pas être expliquée par l'approximation choisie pour les variations de la contrainte mais plutôt par le modèle qui repose sur le schéma du cristal parfait et un glissement global et rigide. D'où l'hypothèse, confirmée depuis par microscopie électronique en transmission, de l'existence de défauts cristallins linéaires dont la propagation sous l'effet de contraintes relativement faibles provoque le glissement. Ces défauts linéaires sont appelés **dislocations**.

Références pour cette partie :

1. J.-P. Baillon, J.-M. Dorlot, J. Masounave
Des Matériaux. Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal (1986).
2. Y. Quéré
Physique des Matériaux. Editions Marketing (1988).