



Université de Relizane

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Génie Mécanique



-2022/2023-

Défauts et Déformation Plastique

S3- MASTER II

Objectifs de l'enseignement :

Les modèles décrivant la périodicité des solides parfaits permettent de comprendre certaines propriétés de leurs propriétés. Cependant, plusieurs autres propriétés, en particulier celles dépendant de la structure du solide ne peuvent recevoir une interprétation quantitative suffisante (conductivité électrique ou ionique, propriétés mécaniques, coloration des solides) Tous ces phénomènes s'expliquent par une rupture de périodicité de la structure cristalline. L'étude des propriétés physiques des solides a conduit à introduire dans le cristal une population sans cesse croissante de défauts.

Le présent cours n'a d'autre objectif que de tenter de parvenir à l'élaboration de ce modèle. Le modèle du solide cristallin parfait qui sera progressivement complété par l'introduction des imperfections ou défauts qui existent dans tous les solides réels. C'est l'ensemble cristal (Parfait + défauts) qui constituera le modèle du solide réel. Montrer à l'étudiant que la présence de tels défauts est bénéfique pour les propriétés mécaniques des matériaux telles que la déformation plastique.

Connaissances préalables recommandées :

Elasticité et MMC.

Contenu de la matière:

A- Défauts linéaires

- Rappel : Elasticité linéaire
- Historique
- Calcul de Frenkel
- Dislocation coin
- Dislocation vis
- Méthodes élastiques des dislocations
 - Energie emmagasinée par le cristal
 - Cas d'une dislocation vis
 - Cas d'une dislocation coin
 - Energie d'interaction entre sources des contraintes

- Energie d'interaction dislocation -dislocation
- Tension de ligne
- Montée de dislocations
- Forces images

B- Déformation plastique

- Introduction
- Mode de déformation
- Monocristal (facteur de Schmidt)
- Bicristal
- Polycristal
- Microdéformation plastique
- Modèle de Taylor
- Macro déformation
- Modèle du Pencil Gleid
- Texture d'écroutissage

C- Fluage

- Fluage de Nabarro-herring
- Fluage de colle
- Superplasticité

Dr. ZOUAMBI

Chapitre 1 : Défauts linéaires

COURS 01

Depuis l'âge du bronze l'humanité pratique le travail des métaux en les déformant par l'action de forces, cette action étant facilitée par le chauffage du métal. Une telle mise en forme n'est possible que parce que les métaux, ainsi que, dans une moindre mesure, la plupart des corps solides, sont susceptibles de subir une déformation permanente quand on les soumet temporairement à des forces extérieures d'intensité suffisante. Cette propriété mécanique des solides est leur plasticité. Ce module a pour objectif de présenter les idées qui sous-tendent l'explication physique microscopique du comportement plastique des solides.

Notre attention se portera sur le cas des solides cristallins, c'est-à-dire des solides constitués par un assemblage spatialement périodique d'atomes. La périodicité microscopique des cristaux est un élément essentiel de la démarche théorique explicative de la plasticité qui a été développée au cours de quatre-vingt dernières années. En effet, cette démarche implique un rôle central des dislocations, qui sont des défauts de régularité spécifiques de la configuration atomique périodique du solide. Les interactions de ces défauts avec d'autres dislocations, avec des impuretés, ou avec le potentiel périodique associé à la configuration des atomes sont les clés de la compréhension de leur création, de leur multiplication, de leur mobilité, c'est-à-dire des ingrédients indispensables à la clarification des différents aspects des propriétés plastiques d'un solide.

I- Rappel : Elasticité linéaire

Lorsqu'on exerce une contrainte sur un cristal, celui-ci se déforme. Si le cristal reprend sa forme quand la contrainte est relaxée, la déformation est dite élastique et est régie par la loi de Hooke qui établit la proportionnalité entre contrainte et déformation. Le coefficient de proportionnalité est le module élastique qui s'exprime en unité de contrainte puisque la déformation est une quantité sans dimension.

• Sollicitation en traction :

On applique la contrainte σ et la déformation résultante ε est l'allongement relatif (voir Fig. 1).

On a : $\sigma = E\varepsilon$ où E est le module d'Young ($E = 200GPa$ pour les aciers, $100GPa$ pour le Cu, $10GPa$ pour le Pb). L'allongement est accompagné d'une contraction latérale $\Delta r/r_0 = -\nu\varepsilon$ où ν est le coefficient de Poisson.

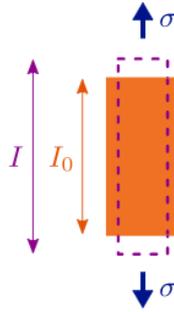


Fig.1 : Sollicitations en traction.

• Sollicitation en cisaillement :

Dans ce cas, la contrainte appliquée, appelée cission (cisaillement), n'est pas normale mais parallèle (tangentielle) aux faces sur lesquelles elle s'exerce (Fig. 2). La déformation γ s'exprime en valeur relative par le déplacement par unité d'épaisseur c'est-à-dire par l'angle γ indiqué sur la figure. La loi de Hooke s'écrit : $\tau = \mu\gamma$ où μ est le module de Coulomb ou module de cisaillement [$\mu = E/2(1 + \nu)$].

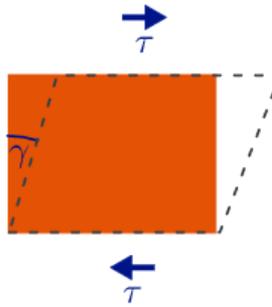


Fig.2 : Sollicitations en cisaillement

Dans le cas général (Fig. 3), les contraintes qui s'exercent sur les faces d'un cube élémentaire sont telles qu'elles sont opposées deux à deux puisque le solide est en équilibre.

Rappelons quelques formules fondamentales de la théorie de l'élasticité. On se placera toujours dans un repère (O, e_1, e_2, e_3) orthonormé direct. On désignera les directions e_1, e_2, e_3 par $(Ox_1), (Ox_2), (Ox_3)$ ou $(Ox), (Oy), (Oz)$.

Le tenseur des contraintes σ est construit à partir des contraintes σ_{ij} . La contrainte σ_{ij} ($1 \leq i, j \leq 3$) s'exerce sur une face de normale e_i dans la direction e_j . Le tenseur σ comprend trois contraintes principales perpendiculaires aux faces de cube (σ_{ij}) et six contraintes de cisaillement (σ_{ij}) avec ($i \neq j$) comme illustré sur la figure 3.

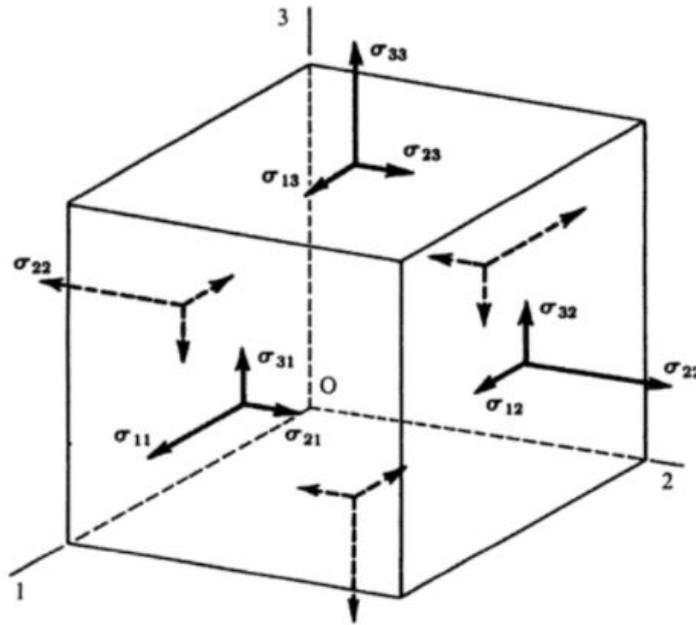


Fig.3 : schéma de définition des composantes du tenseur des contraintes.

Pour annuler les couples qui résultent des contraintes appliquées, on a la relation

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} (\forall i, j)$$

Cela veut dire que le tenseur des contraintes est symétrique. Il comporte six composantes indépendantes. Les termes diagonaux sont constitués des contraintes normales.

A partir du vecteur de déplacement \mathbf{u} (de composantes u_i), on définit le *tenseur des déformations* ε à l'aide des relations suivantes :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} * \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1 \leq i, j \leq 3)$$

La loi de Hooke généralisée fournit la relation entre les σ_{ij} et ε_{ij} :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \frac{E}{1+\nu} * \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} Tr(\varepsilon) \delta_{ij} \right) \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{E} * \left((1+\nu) \sigma_{ij} - \nu Tr(\sigma) \delta_{ij} \right) \end{aligned} \quad (1 \leq i, j \leq 3)$$

Où E est le *module de Young* et ν est le *coefficient de poisson*.

δ_{ij} est le symbole de **Kronecker** $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$

Le module de cisaillement μ est lié à E et ν par la relation :

$$2\mu = \frac{E}{1+\nu}$$

II- Historique

La première suggestion de dislocations s'est probablement produite au dix-neuvième siècle, lorsque des études de (Mügge, 1883 ; Ewing et Rosenhain, 1899) ont révélé des bandes de glissement dans des métaux plastiquement déformés (figure 4). De telles caractéristiques résultaient d'un cisaillement relatif à l'intérieur de l'échantillon. Cette interprétation est restée obscure au départ. Cependant, la découverte que les métaux sont cristallins a soutenu le concept que la déformation pourrait se produire par glissement relatif à travers les plans cristallins rationnels.

Autrement dit, Lorsque l'on déforme un cristal au-delà de son domaine élastique, on voit apparaître à sa surface des lignes appelées traces de glissement. Ces traces correspondent à de petites marches qui traduisent le glissement des plans cristallins les uns par rapport aux autres. Elles sont la manifestation du mouvement, sous l'effet des efforts mécaniques, de défauts linéaires présents dans le cristal : les dislocations.

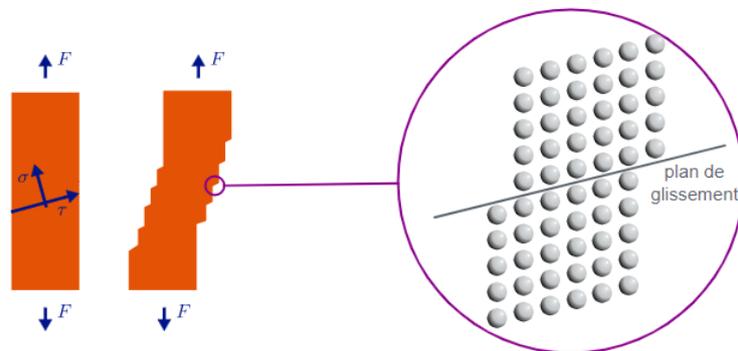


Fig. 4 : Traces de glissement à la surface d'un super-alliage monocristallin déformé plastiquement et schématisation de ces traces à l'échelle atomique

Volterra (1907) et d'autres, notamment Love (1927), ont étudié la réponse élastique de milieux isotropes homogènes. Ces études ont considéré qu'un cylindre est coupé le long de l'axe z (Fig. 5) puis déformé. Certaines de ces opérations de déformation correspondent à un glissement uniforme sur toute la coupe et certaines des configurations résultantes correspondent à des dislocations.

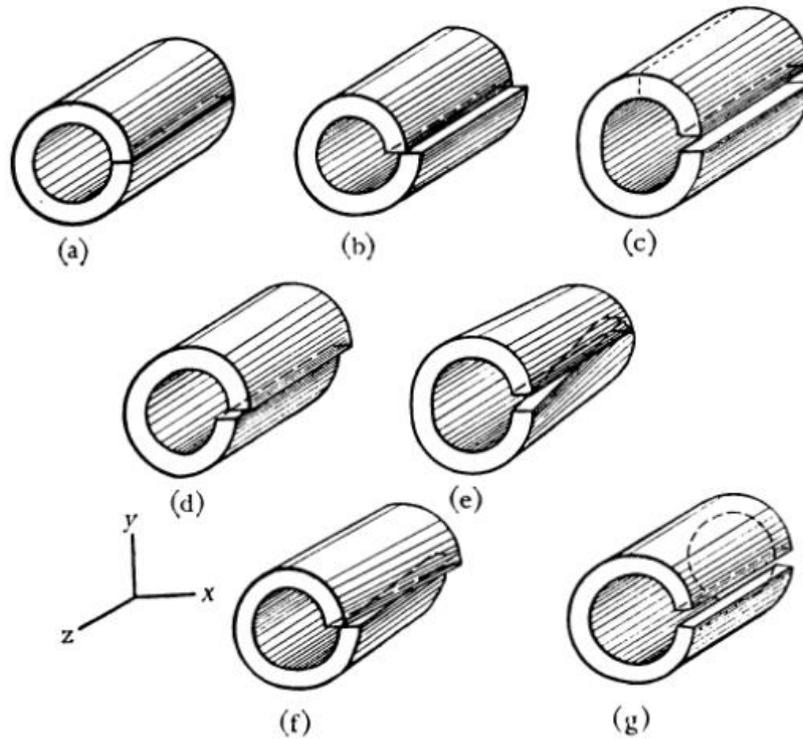


Fig.5 : Un cylindre (a) comme coupé à l'origine, et (b) à (g), comme déformé pour produire les six types de dislocations comme proposé par Volterra (1907).

Cependant, ce travail n'a été lié au glissement cristallin qu'à la fin des années 1930, après que les dislocations aient postulé comme des défauts cristallins. Les configurations (b) et (c) de la figure 5 correspondent aux dislocations coins comme le glissement relatif.