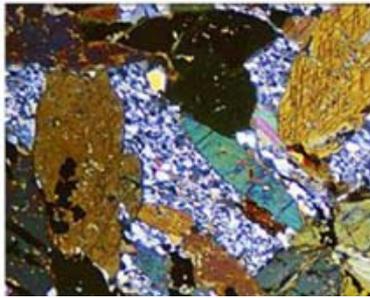


Chapitre 1. Mécanismes physiques de déformation et de rupture

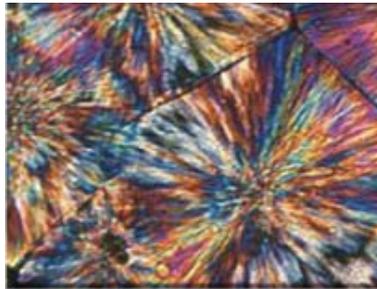
1. Microstructure granulaire d'un solide

Exemples

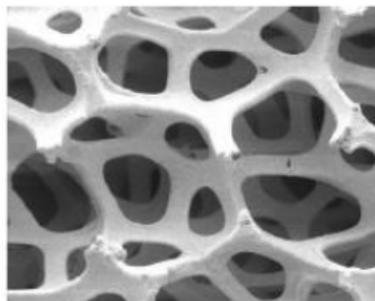
Les matériaux ont une structure multiéchelles : échelle microscopique
microstructure **granulaire** : cristaux d'hornblende et quartz dans une roche métamorphique (taille de grain $\sim 50\mu\text{m}$)

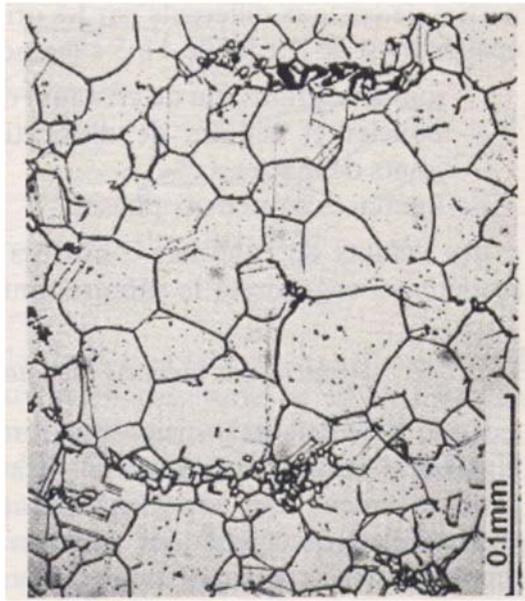


microstructure **granulaire** : sphérolites dans un polymère semi-cristallin



microstructure **cellulaire** : mousse de polyuréthane à porosité ouverte (pavage de l'espace par des polyèdres)





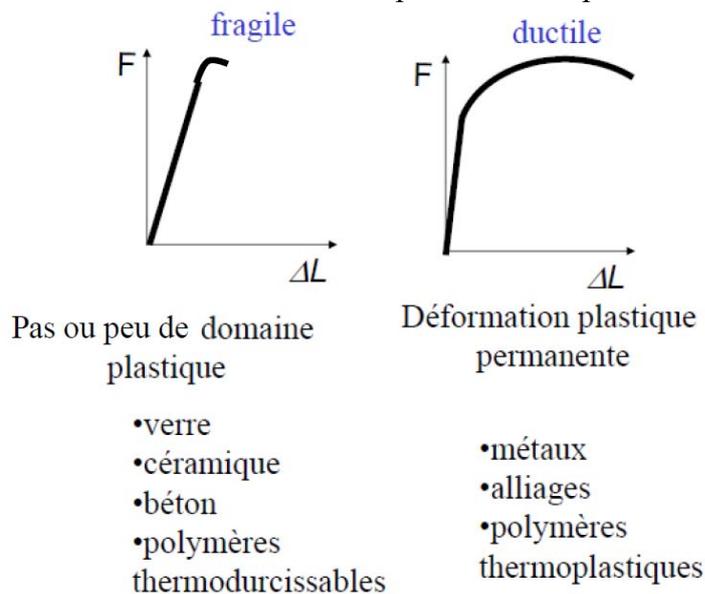
Alliage base Nickel
Inconel 718
(microscope optique)

2. Comportement des matériaux

Les matériaux présentent une étonnante diversité de comportement. Lorsqu'on leur applique des efforts, certains matériaux s'écoulent à la manière de fluides, d'autres résistent comme des solides. D'autres enfin commencent par résister mais, si l'on augmente l'effort, finissent par céder et s'écoulent. Parmi ces matériaux dits solides certains sont fragiles et cassent sans déformation apparente importante, d'autres se déforment notablement avant rupture (on les dit ductiles). Néanmoins ces classifications sont toujours relatives (un métal est fragile à froid mais ductile à chaud) et parfois (un milieu granulaire s'écoule comme un fluide, mais, une fois compacté, présente la cohésion d'un solide).

2.1 Sollicitation monotone (cas de la traction uniaxiale)

On distingue souvent les matériaux cristallins par leur « comportement » fragile ou ductile,



2.2 Mécanismes physiques

Si la variété des comportements macroscopiques des matériaux est grande, celle des mécanismes microscopiques de déformation l'est plus encore. Les milieux granulaires ont un comportement de type plastique et le mécanisme principal est le glissement relatif (avec frottement) des grains les uns par rapport aux autres. Les polymères ont également un comportement plastique dans une certaine gamme de température et les mécanismes principaux de déformation sont alors le déploiement et les mouvements relatifs des chaînes de monomères.

a. Matériaux cristallins

A l'échelle macroscopique de l'ingénieur (longueur caractéristique, le centimètre), un métal paraît homogène. Si l'on observe un échantillon de ce métal à l'échelle de la centaine de microns³, on s'aperçoit tout d'abord que l'échantillon qui paraissait homogène est en fait formé de grains élémentaires, dont on distingue assez nettement les joints : il s'agit en fait d'un polycristal, c'est à dire d'un assemblage de cristaux. Lorsqu'on observe ces grains on remarque que chacun se déforme en fonction de son orientation propre tout en maintenant la compatibilité de la déformation entre grains adjacents. A une échelle plus fine, la déformation de chaque grain résulte de la déformation du réseau atomique qui le constitue.

✦ Exemples de motifs élémentaires caractéristiques d'états cristallins

Structure cristalline : caractérisée par une distribution périodique d'atomes ordonnés à grande distance.

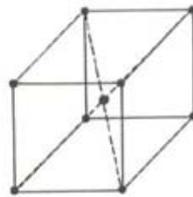


Fig. 1. Cristal C.C.

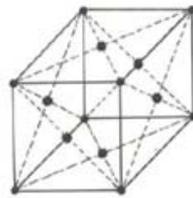


Fig. 2. Cristal C.F.C.

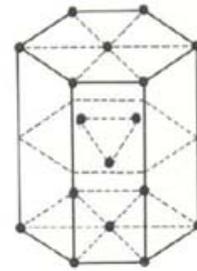


Fig. 3. Cristal H.C.

- (cc) maille cubique centrée
- (cfc) maille cubique à face centrée
- (hc) maille hexagonale compacte

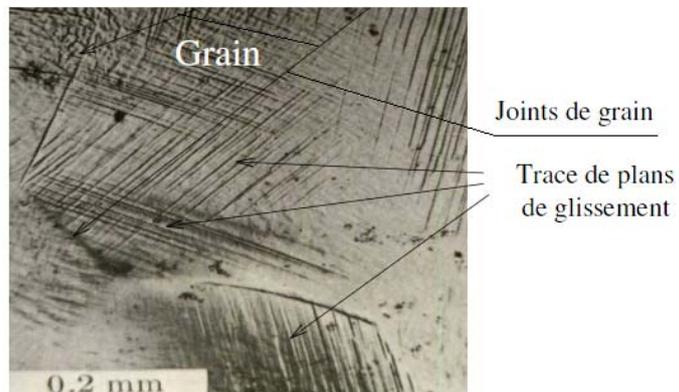
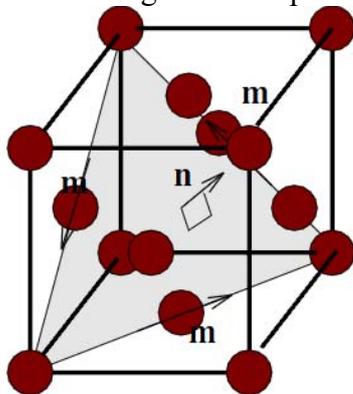


Figure.4 – Monocristal et polycristal de Cuivre. (a) maille cubique à face centrée (cfc) (b) : Traces de glissement.

Noter que dans des grains d'orientations différentes les glissements s'effectuent dans des directions différentes.

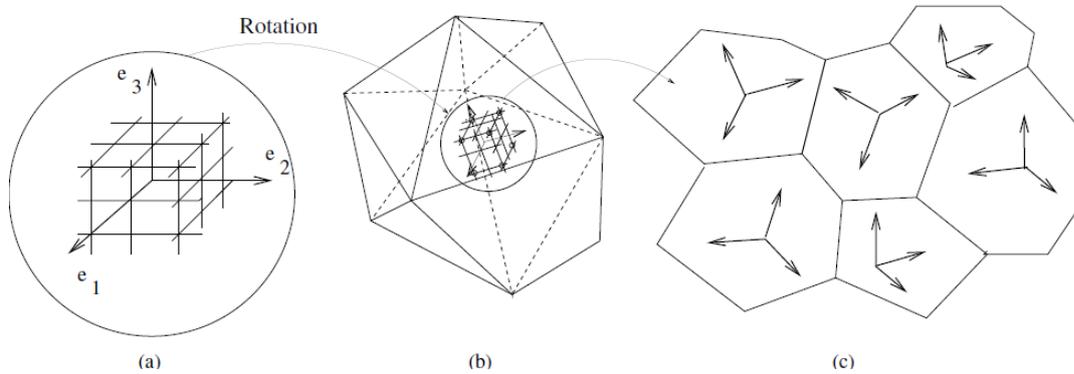
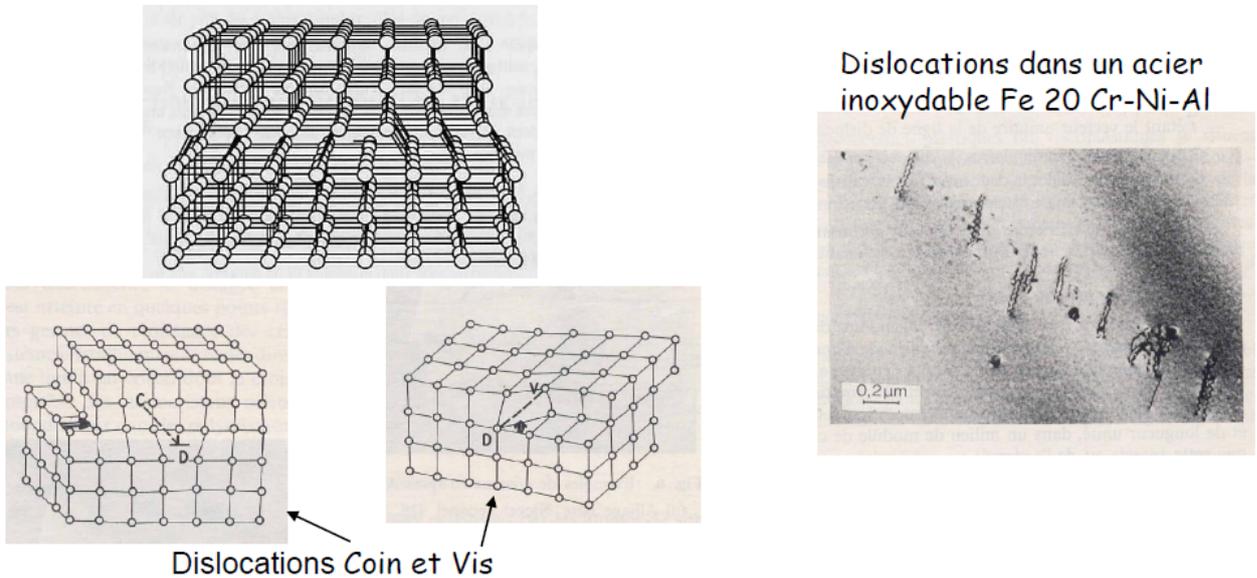


Figure. 5– Différentes échelles dans un polycristal : (a) : Monocrystal dans ses axes de symétrie. (b) : Grain (noter la rotation des axes de symétrie). (c) Polycristal (noter que chaque grain a son orientation propre).

Les réseaux cristallins peuvent présenter des défauts

- **Ponctuels: "lacunes" ou atomes étrangers**
- **Linéiques : dislocations (défauts d'empilement d'atomes)**

Dislocation dans le cas du cristal cubique simple



- **Bidimensionnels : joints de grains ou défauts d'empilement**

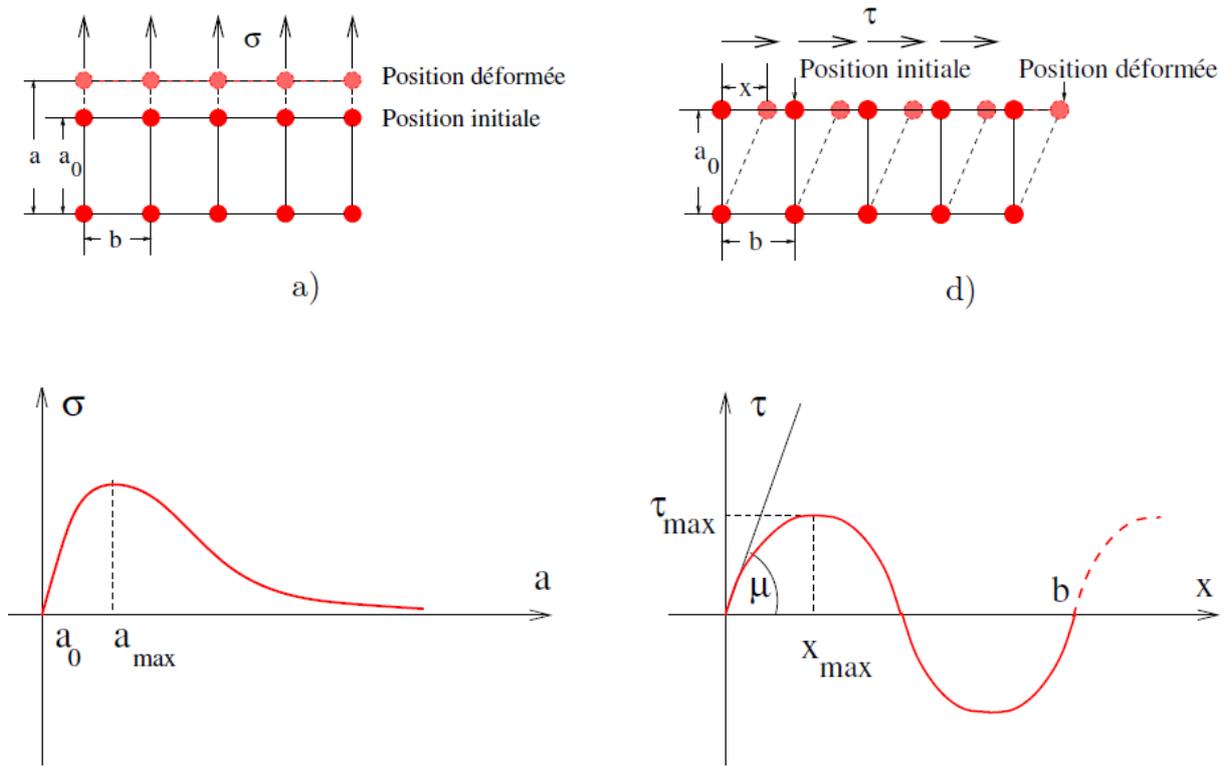


Figure. 6– Déformation d'un réseau atomique régulier sous l'effet d'une contrainte.

Dans le cas de l'extension dans une direction (figure 6), la déformation reste élastique tant que la contrainte appliquée n'excède pas σ_{\max} , mais au de là de cette valeur, les plans atomiques s'éloignent à contrainte décroissante. La contrainte σ_{\max} est donc la contrainte de séparation du réseau atomique (contrainte de clivage). **Le clivage** est le mécanisme dominant de la rupture fragile.

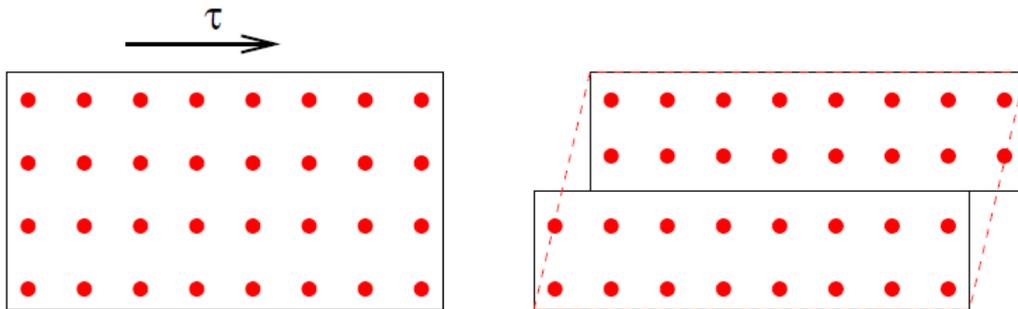


Figure. 7 – Création d'une déformation par glissement.

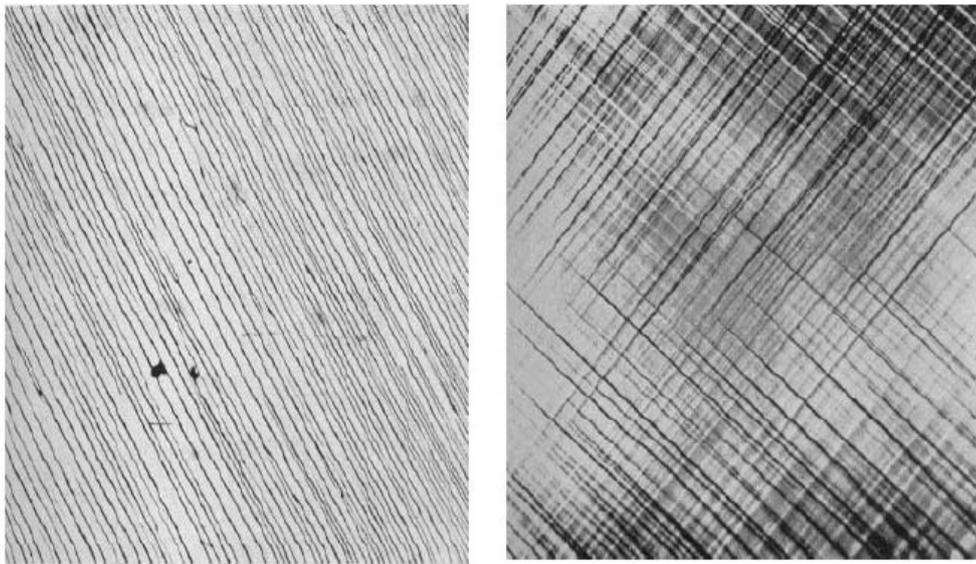
Tant que le glissement x n'excède pas x_{\max} (τ reste inférieur à τ_{\max}), le réseau revient à sa position initiale lorsqu'on ramène le cisaillement τ à 0. En revanche cette position devient instable lorsque τ atteint τ_{\max} et le plan atomique supérieur retrouve une position d'équilibre stable en se déplaçant d'un pas (figure 3). La contrainte τ_{\max} est la contrainte critique de cisaillement du cristal.

Le glissement est le mécanisme dominant de la plasticité. Les glissements successifs sur les différents plans, même de très faible amplitude lorsqu'ils sont considérés séparément, se cumulent pour former une déformation plastique macroscopique significative. Leurs traces sont visibles à l'échelle des grains et même à l'échelle du polycristal (figure 5).

Cette représentation bidimensionnelle se complique légèrement dans le cas tridimensionnel. Les plans le long desquels se produisent le clivage ou le glissement dépendent de la structure cristallographique du matériau considéré. Pour les matériaux à structure CFC (cubique faces centrées) ces plans sont les plans atomiques denses.

On remarque néanmoins que la déformation par glissement ne s'accompagne d'aucune variation de volume que ce soit au niveau du monocristal ou du polycristal.

Exemple :



Glissement simple

Glissement double

Figure.8 - Bandes de glissement dans l'alliage base Nickel Waspaloy

b. Les polymères(2)

Les **polymères** sont formés de très grosses molécules (jusqu'à des centaines de milliers d'atomes) se présentant sous forme de chaînes reliées entre elles par des liaisons de faible intensité. Ces chaînes se forment par polymérisation c-à-d par adjonction de petites unités (monomère) les unes aux autres.

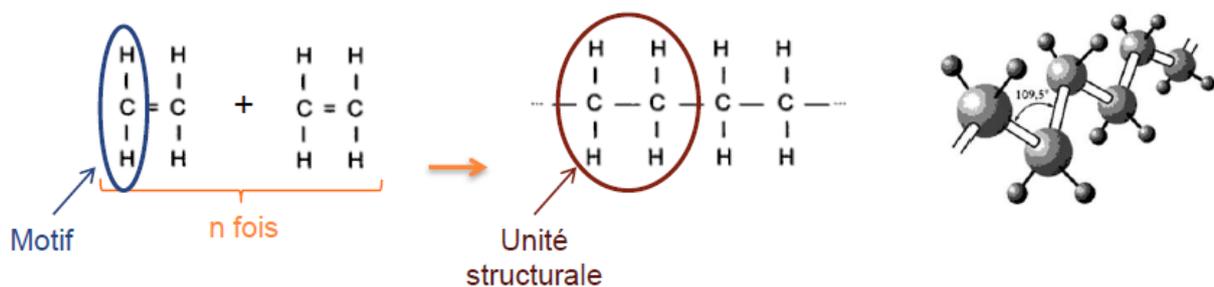


Figure.9 - Exemple: polyéthylène (C₂H₄)_n

Réaction à la température

▪ **Thermoplastiques :**

Au chauffage → ramollissement → comportement fluide visqueux sous contrainte

Après refroidissement → redevient vitreux ou caoutchouteux

La transition qui se fait lors du chauffage est une transformation physique (non chimique) et réversible de la matière.

Exemples: ABS, PC, PE, PET, PMMA, PVC, PS, PU

ABS = Acrylonitrile butadiène styrène

PC = Polycarbonate

PE = Polyéthylène,

PET = Polyéthylène téréphtalate,

PMMA = Polyméthacrylate de méthyle

PS = Polystyrène

PVC = Polychlorure de Vinyle

PU = Polyuréthane

▪ **Thermodurcissables :**

Au chauffage → Dégradation possible (cracking) de la structure du polymère par rupture des chaînes primaires et des liaisons réticulées

Après refroidissement → Etat structural dégradé si le chauffage a été trop intense

-La cause de cette irréversibilité provient de la réticulation (~ jonction) des chaînes de polymère (suite par exemple au chauffage antérieur de ce dernier).

Exemples: Résines (polyesters, epoxydes, phénoliques, polyimides), bakélite, caoutchouc