

# Cours de déformation

## MSE-310

### V. Maclage et plasticité de transformation

Roland Logé

Laboratoire de Métallurgie Thermomécanique (LMTM)



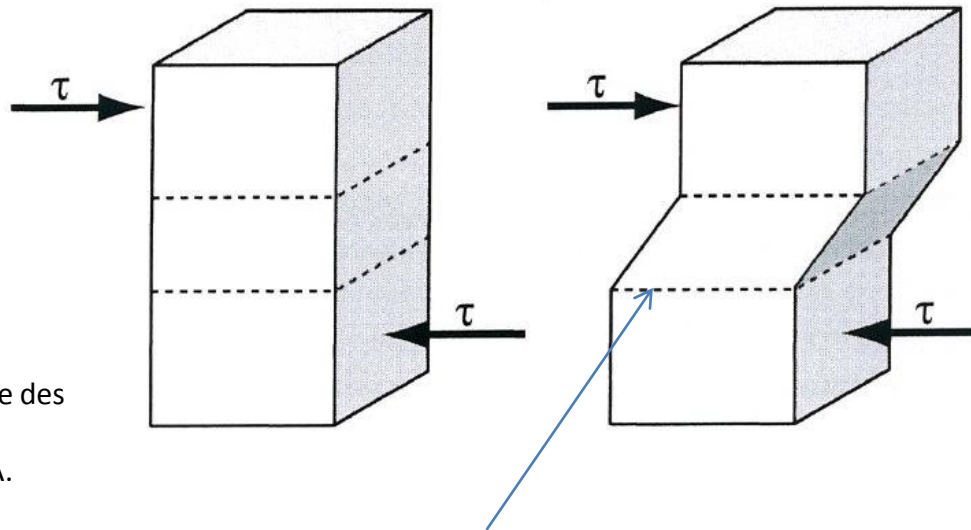
ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

# Plan

1. Maclage
2. Plasticité de transformation

# 1. Maclage

- **Macle de déformation** : déformation uniforme de cisaillement induite sur une épaisseur finie. « Rotation » du réseau cristallin.
- **Plasticité de transformation** : dans ce cas l'arrangement cristallographique n'est plus le même dans la zone déformée (transformation de phase)

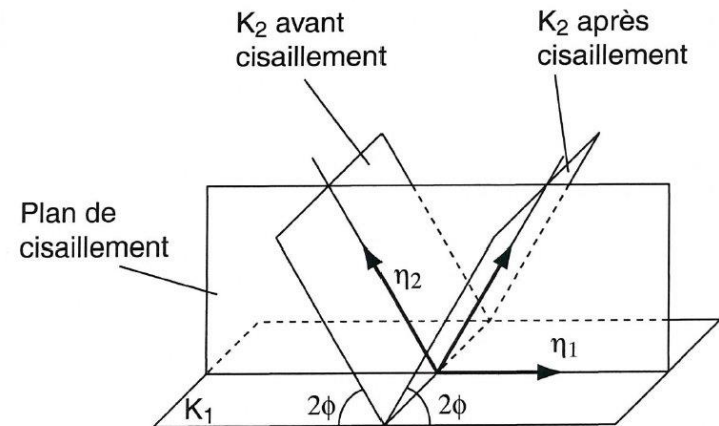
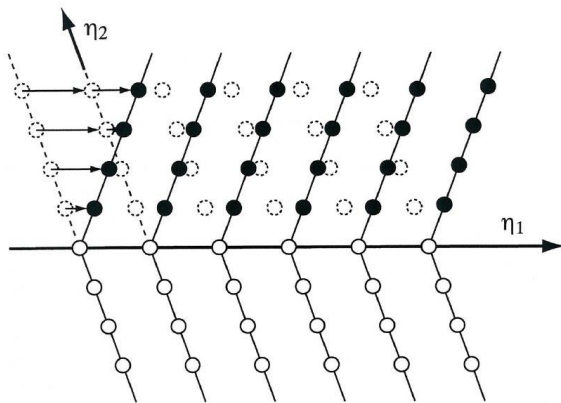


[Déformation et rupture des matériaux à basse température, tome 1, A. Mortensen & T. Kruml]

**Interface cohérente** : (positions atomiques coïncident)  
→ Énergie d'interface faible

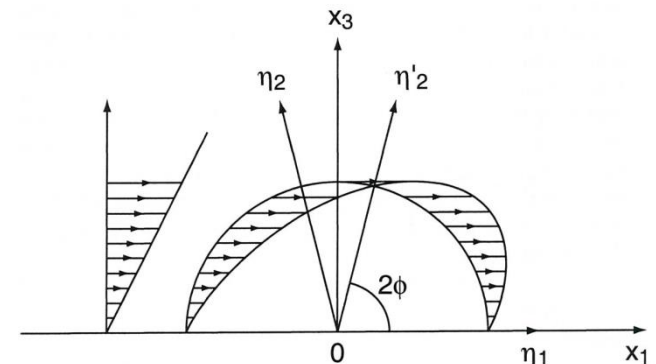
## Relations cristallographiques

- Pour que les positions atomiques coïncident le long d'un plan, la déformation doit être de **cisaillement simple parallèle au plan**. Sinon il y aurait changement de volume, et on ne garderait pas la même structure cristallographique de part et d'autre de l'interface.
- Seuls 2 plans conservent leur géométrie initiale :
  - Plan de maclage (twinning plane), ou 1<sup>er</sup> plan non déformé  $K_1$ , coupe le plan de cisaillement suivant la direction de cisaillement  $\eta_1$ ;
  - Second plan non déformé  $K_2$ , coupe le plan de cisaillement suivant  $\eta_2$ , et subit une rotation sans déformation lors du maclage



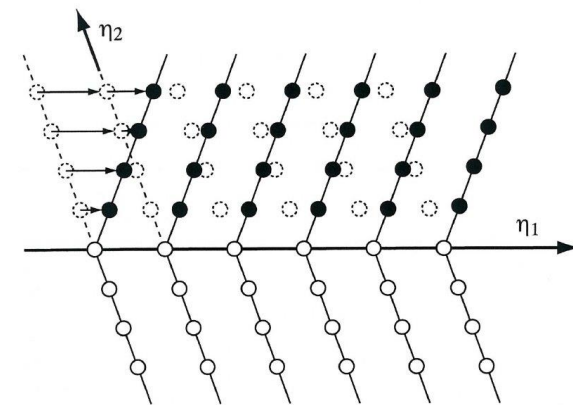
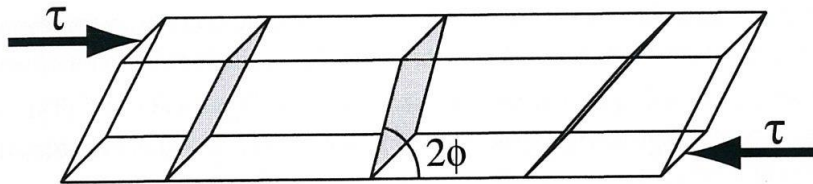
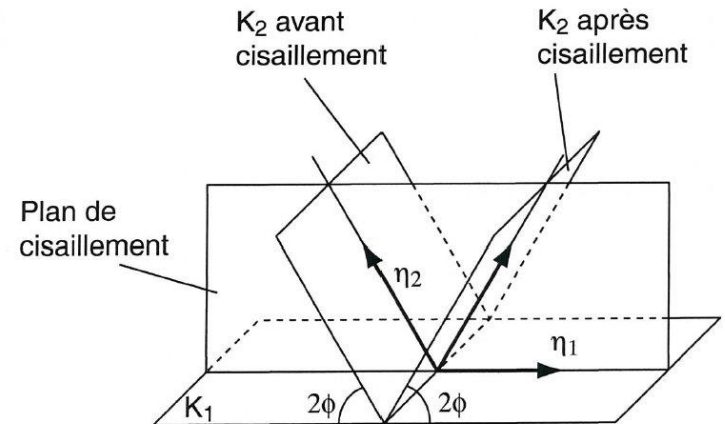
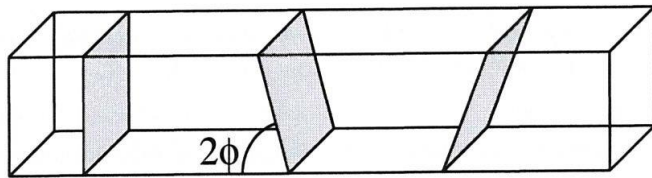
Cisaillement simple

$$\gamma = \frac{\Delta x_1}{x_3} = 2 \cot(2\phi)$$



## Relations cristallographiques

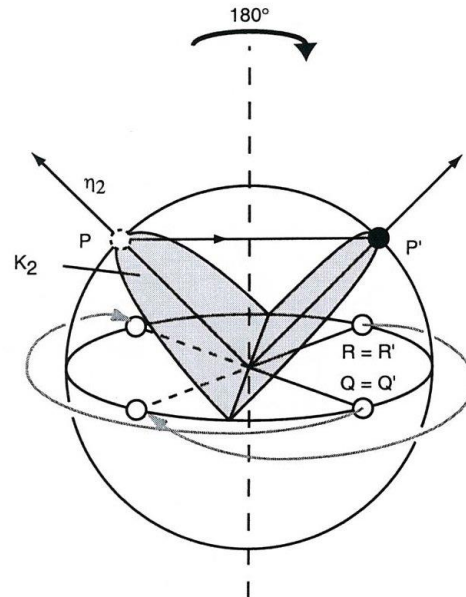
Second plan non déformé  $K_2$ , subit une rotation sans déformation lors du maillage



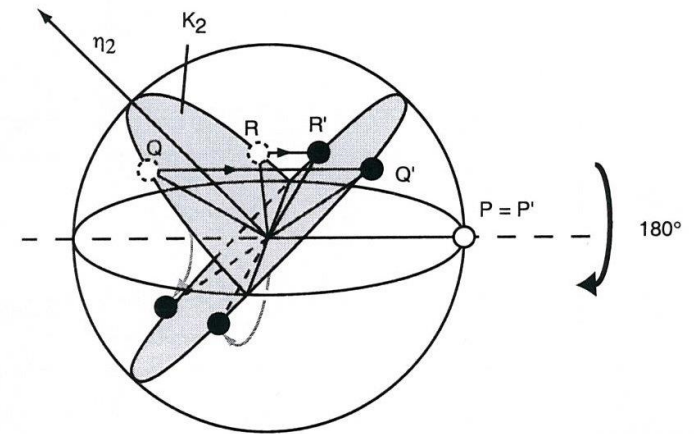
$K_2$  = seul plan (hormis  $K_1$ ) qui **conserve son aire**

## Relations cristallographiques

- Les distances sont conservées, c-a-d que la structure cristalline est inchangée après cisaillement
  - 3 directions cristallographiques à distances et angles inchangés :
    - Deux  $\in K_1$ , qui est alors un plan du réseau. La 3<sup>e</sup> direction doit être  $\eta_2$ , car le cisaillement change l'angle de toute autre droite de  $K_2$  avec une direction fixe de  $K_1$ . **Maclage de type I** = réflexion autour du plan  $K_1$ , macle = image miroir. De loin le plus fréquent, **plan commun de faible énergie** car **cohérent**.
    - Deux  $\in K_2$ , qui est alors un plan du réseau. Cette fois la 3<sup>e</sup> direction doit être  $\eta_1$  (cf. argument ci-dessus). **Maclage de type II** = rotation de  $180^\circ$  autour de  $\eta_1$  (ex: U orthorhombique).



Macle type I

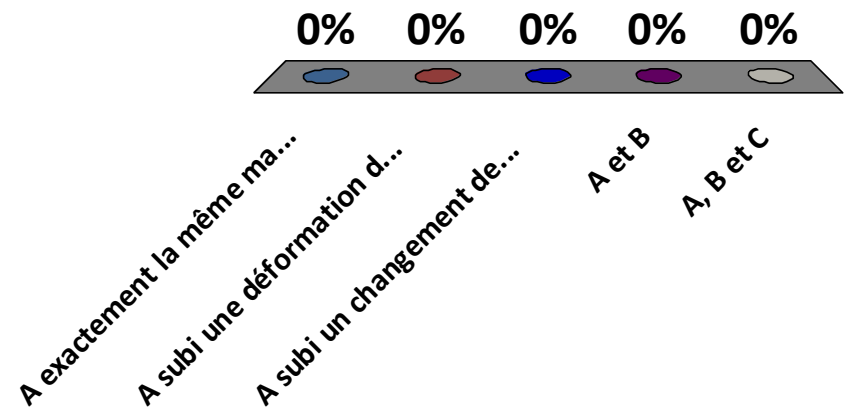


Macle type II

[Déformation et rupture des matériaux à basse température, tome 1, A. Mortensen & T. Kruml]

## La zone maclée :

- A. A exactement la même maille unitaire que le cristal parent, réorientée
- B. A subi une déformation de cisaillement
- C. A subi un changement de volume
- D. A et B
- E. A, B et C

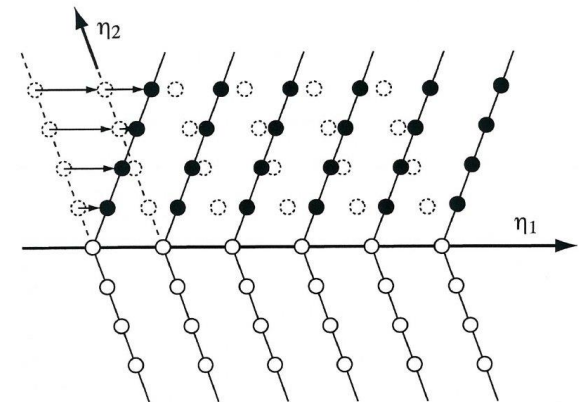


## Relations cristallographiques

- **Souvent**, les macles sont des 2 types à la fois, c-a-d que les deux plans  $K_1$  et  $K_2$  et les deux directions  $\eta_1$  et  $\eta_2$  sont cristallographiques. **Macle** dite **dégénérée** ou composée.

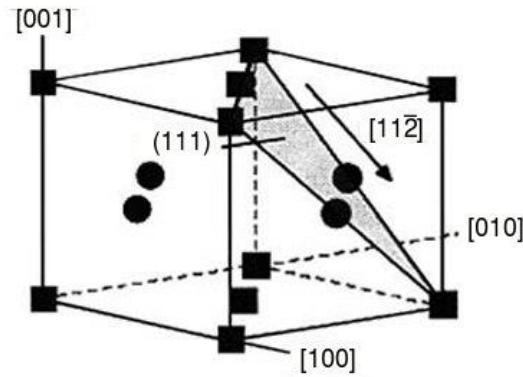
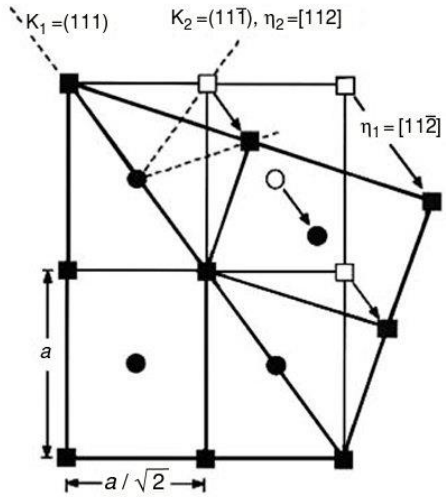
Structure	$K_1$	$K_2$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\gamma$
fcc & dia. cubic	{111}	{11 $\bar{1}$ }	$\langle 11\bar{2} \rangle$	$\langle 112 \rangle$	$\sqrt{2}/2$
bcc	{112}	{11 $\bar{2}$ }	$\langle 11\bar{1} \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\sqrt{2}/2$
hcp	{10 $\bar{1}2$ }	{ $\bar{1}012$ }	$\langle 10\bar{1}1 \rangle$	$\langle \bar{1}011 \rangle$	$c/(\sqrt{3}a) - \sqrt{3}a/c$

- **Déformations** locales sont assez **élevées**; le formalisme des petites déformations n'est pas valide.
- La déformation peut être décrite **en terme dislocationnel** : mouvement de dislocation dans le plan  $K_1$  et de vecteur de Burgers // à  $\eta_1$ . Le mouvement relatif des atomes n'est pas une distance de la maille, et donc ce sont des dislocations partielles.
  - Ex: structure CFC, plan de maillage = {111} dense, et vecteur de maillage = vecteur de Burgers des dislocations partielles de Shockley  $1/6 \langle 11\bar{2} \rangle \rightarrow$  équivalent au mouvement d'une dislocation partielle par plan d'atomes dense (**mur de dislocations**)

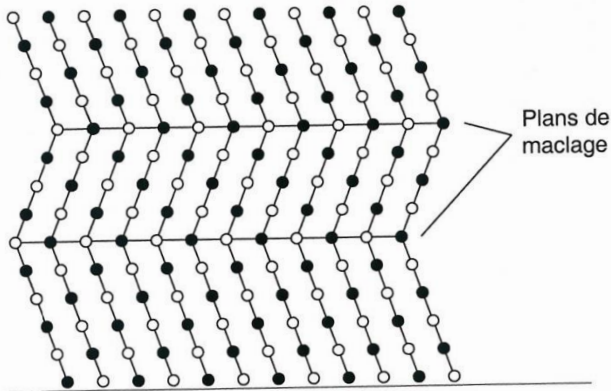


# Maillage CFC $\{111\}\langle 11-2\rangle$

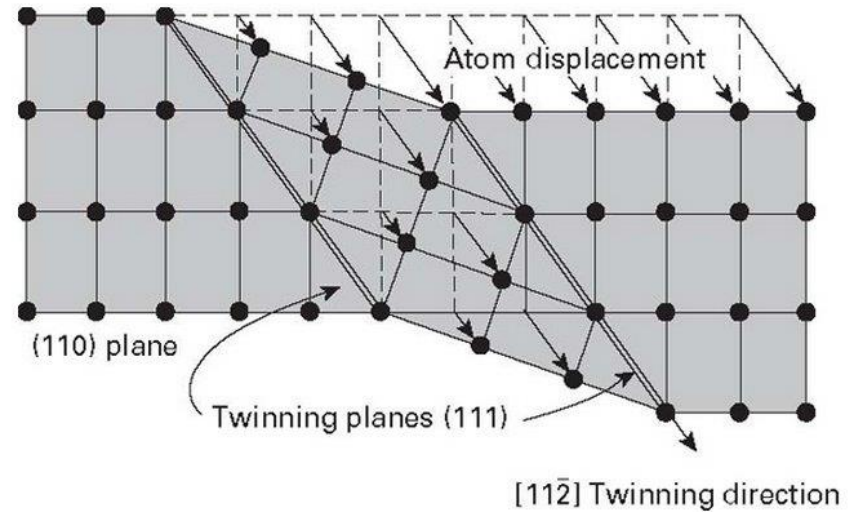
Plan (1-10)



[Mechanical Behavior of Materials, W.F. Hosford]



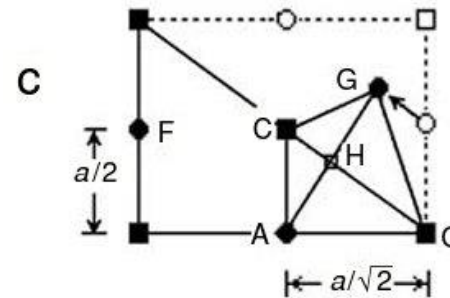
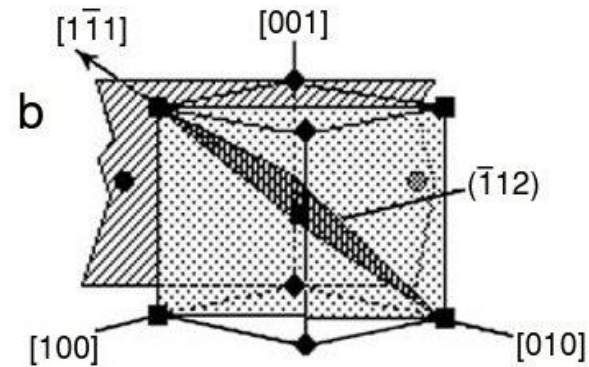
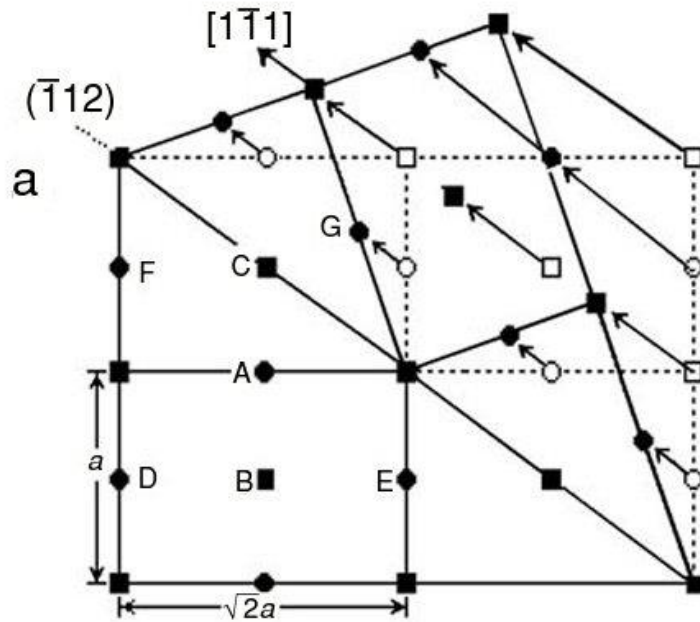
Création d'une macle d'épaisseur finie à partir d'une dislocation partielle par plan atomique



[Mechanical Behavior of Materials, Meyers & Chawla]

## Maillage CC $\{-112\}\langle 1-11\rangle$

[Mechanical Behavior of  
Materials, W.F. Hosford]

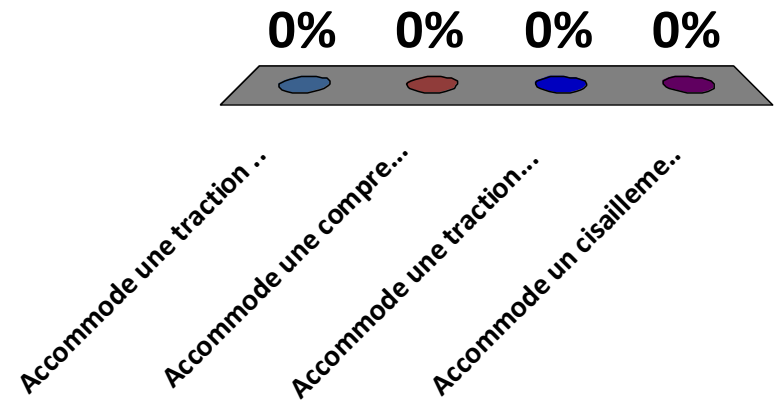
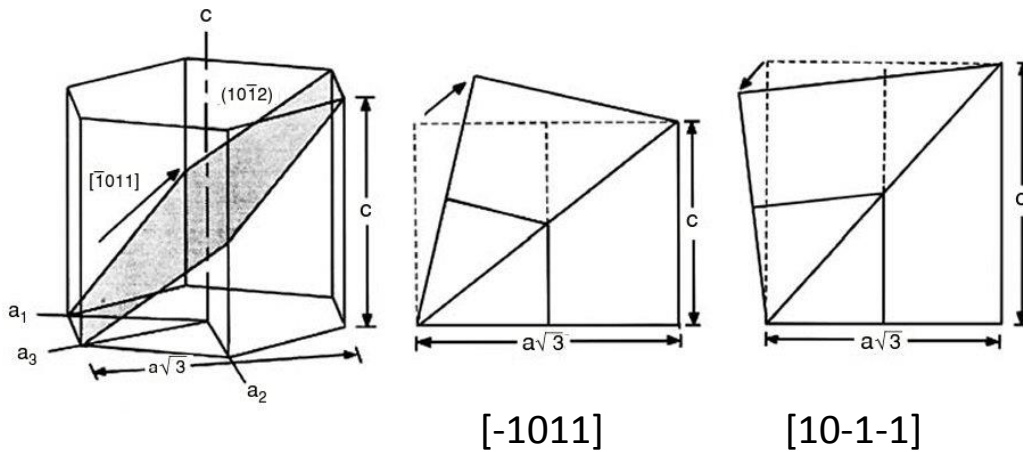


Vue plan (110)  
Carrés sont dans un plan (110)

Equivalent au passage d'un mur de dislocations de vecteur  $\mathbf{b} = 1/6 \langle 111 \rangle$   
(soit  $1/3$  le vecteur  $\mathbf{b}$  classique pour la structure CC)

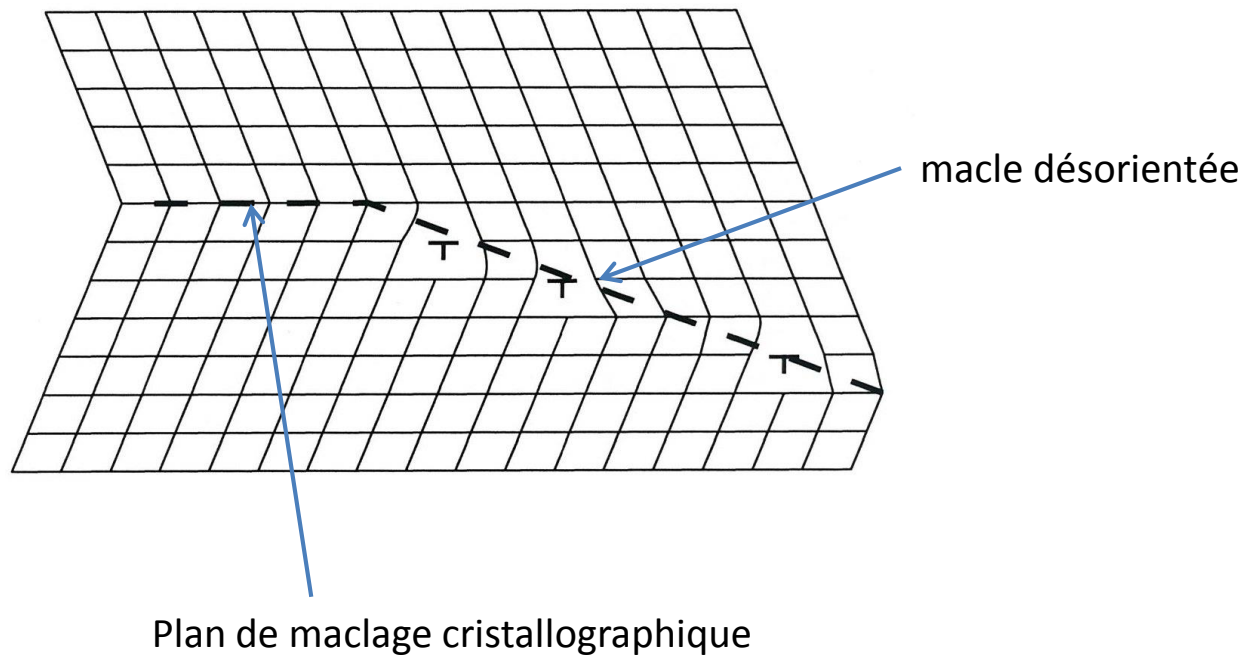
# Maclage $\{10\bar{1}2\}\langle 10\bar{1}1\rangle$ cristal HC :

- A. Accommode une traction // à l'axe c
- B. Accommode une compression // à l'axe c
- C. Accommode une traction ou une compression, suivant le cristal considéré
- D. Accommode un cisaillement seulement



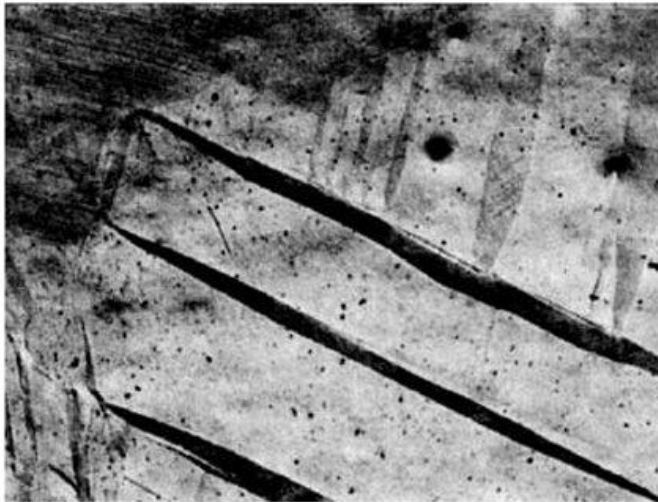
## Macles et dislocations

- Une série de dislocations peut engendrer le maillage, donc il est possible de désorienter une macle par rapport à son plan de maillage  $K_1$  à l'aide de **dislocations**. Plus elles sont rapprochées, plus elles permettent d'**accommoder une désorientation** importante (voir plus loin théorie des sous-joints de grain).



## Energie d'une macle

- Une déformation de cisaillement a produit un changement local de forme, et le reste du cristal exerce donc des contraintes sur la macle dans le sens contraire de celles qui l'ont engendrée.
- Il résulte une **énergie élastique**, qui accompagne une **énergie d'interface**. Elle dépend de la forme et de l'orientation de la macle. Une minimisation de l'énergie impose une forme **lenticulaire**.



Macles mécaniques dans le Mg

[Mechanical Behavior of  
Materials, W.F. Hosford]

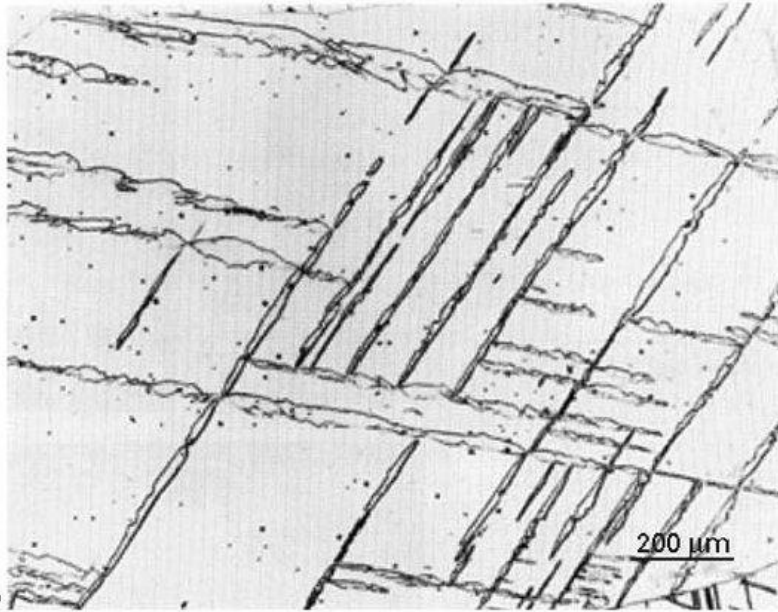
Densité d'énergie élastique :

$$E_{el} = \frac{\pi(2-\nu)}{8(1-\nu)} G \gamma^2 \frac{c}{a}$$

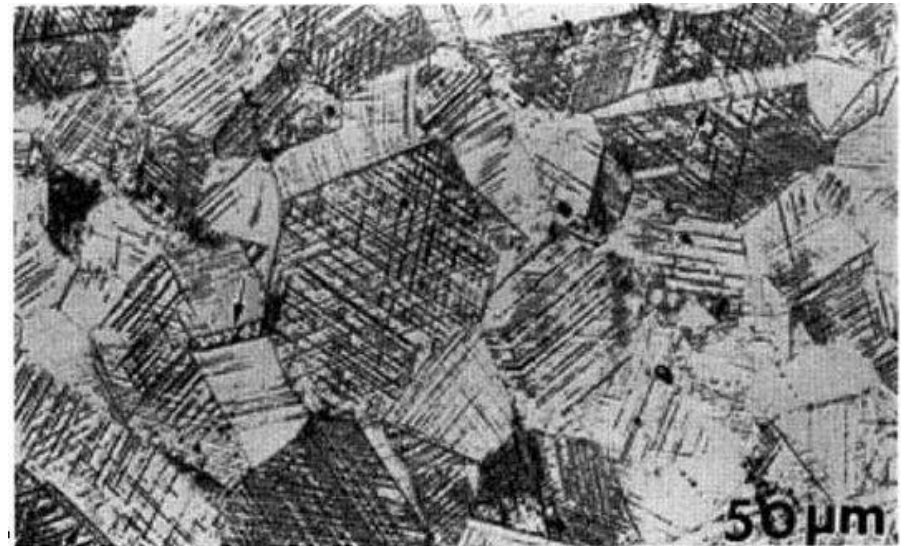
- Cristal isotrope, de grande taille
- $c$  = hauteur,  $a$  = diamètre,  $a \gg c$

## Géométries de macles mécaniques

Fe-Si



W (Tungstène)



[Mechanical Behavior of Materials, Meyers & Chawla]

## Energie d'une macle

- L'énergie relâchée par unité de volume d'une macle est constante ( $dW = \sigma d\varepsilon$ )
- L'énergie consommée diminue comme  $c/a$ . Donc au cours de la croissance, comme  $c \sim$  constant, et  $a$  augmente, l'énergie consommée par unité de volume diminue : croissance très rapide. Traverse de part en part le cristal, jusqu'à un obstacle (autre macle, joint de grain).

→ Etape critique = germination de la macle

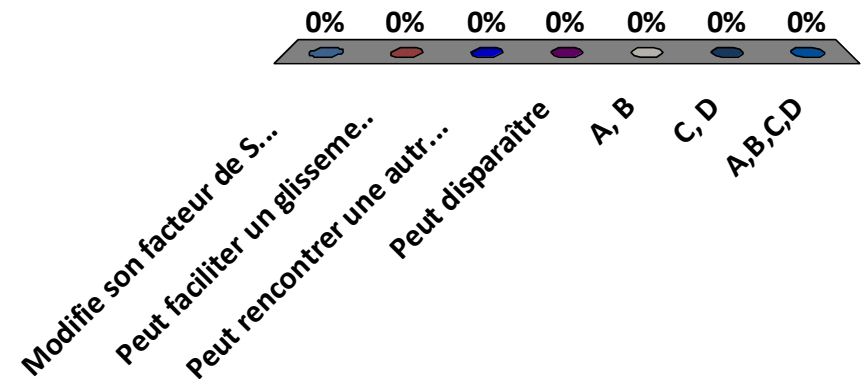
- Plusieurs mécanismes, catalysés en général par des concentrations de contrainte
- CFC : dislocations de Shockley par décomposition de dislocations, source d'un « mur » de partielles. Nécessite la création d'un défaut d'empilement, la contrainte requise va donc augmenter avec la valeur d'énergie de défaut d'empilement (SFE) :  $\tau \propto \sqrt{SFE}$

### Conséquence

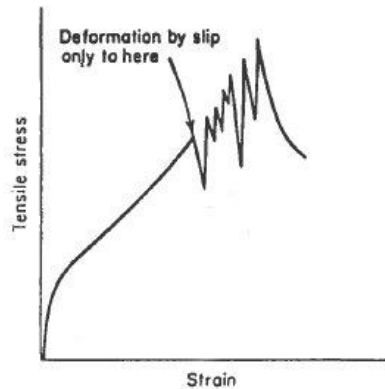
Le maclage arrive de façon soudaine, et se traduit par une courbe de traction irrégulière.

## La zone maclée :

- A. Modifie son facteur de Schmid
- B. Peut faciliter un glissement dislocationnel
- C. Peut rencontrer une autre macle
- D. Peut disparaître
- E. A, B
- F. C, D
- G. A,B,C,D



## Comportement mécanique

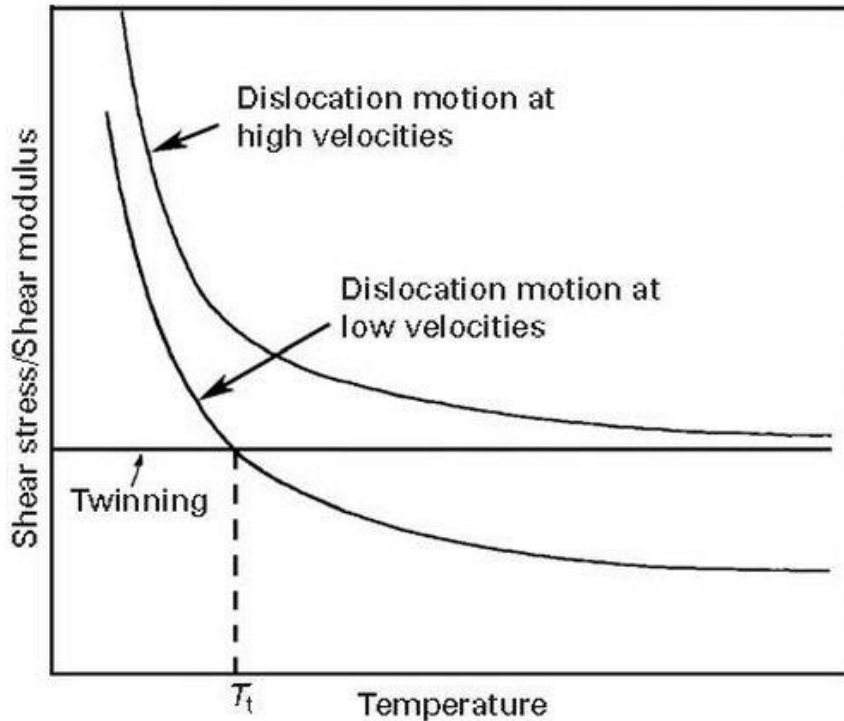


- Maclage apparaît brutalement
- Ondes élastiques provoquent des petits déclics audibles (cas de l'étain en particulier)
- Courbe de traction irrégulière

## Macles et dislocations (suite)

- Les contraintes élastiques associées au maclage peuvent être relâchées par formation et mouvement de dislocations (le rendant alors irréversible)
- Les macles peuvent aussi rester sans mouvement dislocationnel,
  - Avec possible réversibilité
  - Avec de contraintes internes qui peuvent contribuer à la formation de microfissures (intersection de macles en particulier)
- La modification d'orientation brutale consécutive au maclage modifie le facteur de Schmid de la zone maclée, qui peut devenir plus ou moins favorable au glissement dislocationnel

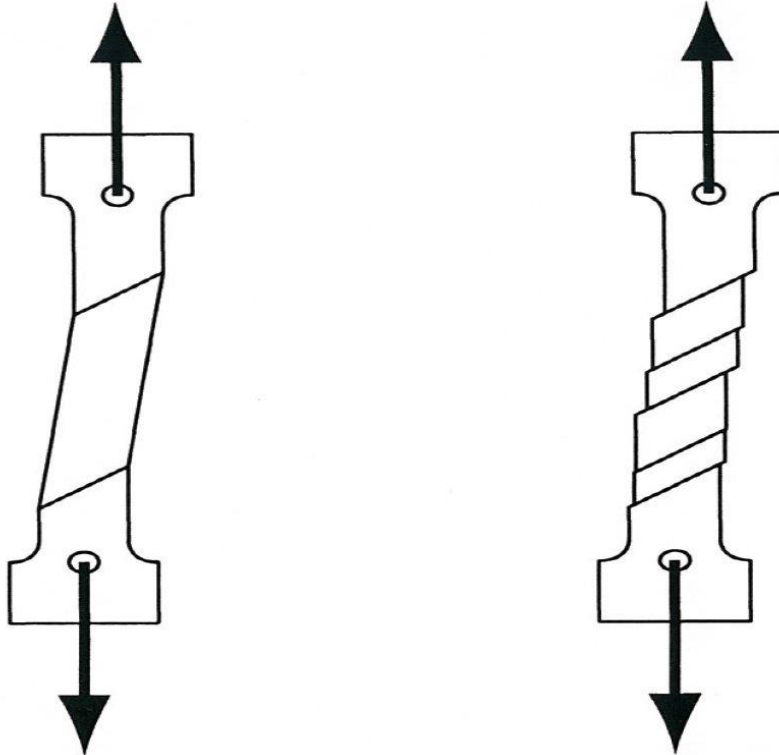
## Dépendance en température



Le maclage n'apparaît **pas** comme un mécanisme **thermiquement activé**, contrairement au glissement de dislocations

En principe le maclage est donc favorisé aux basses T (et/ou hautes vitesses de déformation)

## Macles et dislocations (suite)

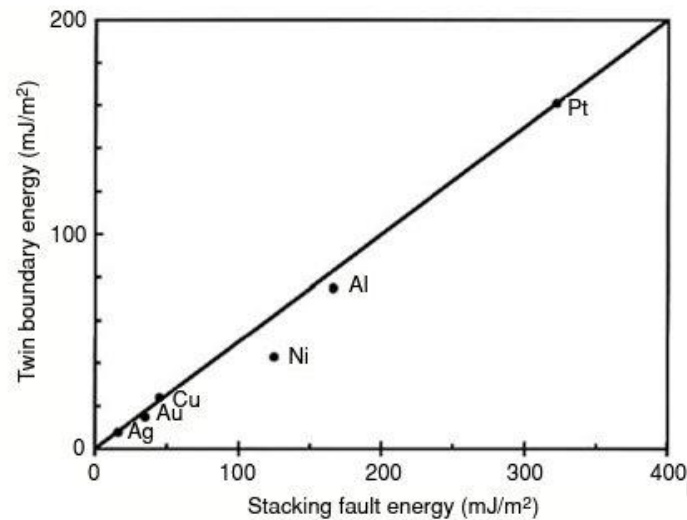
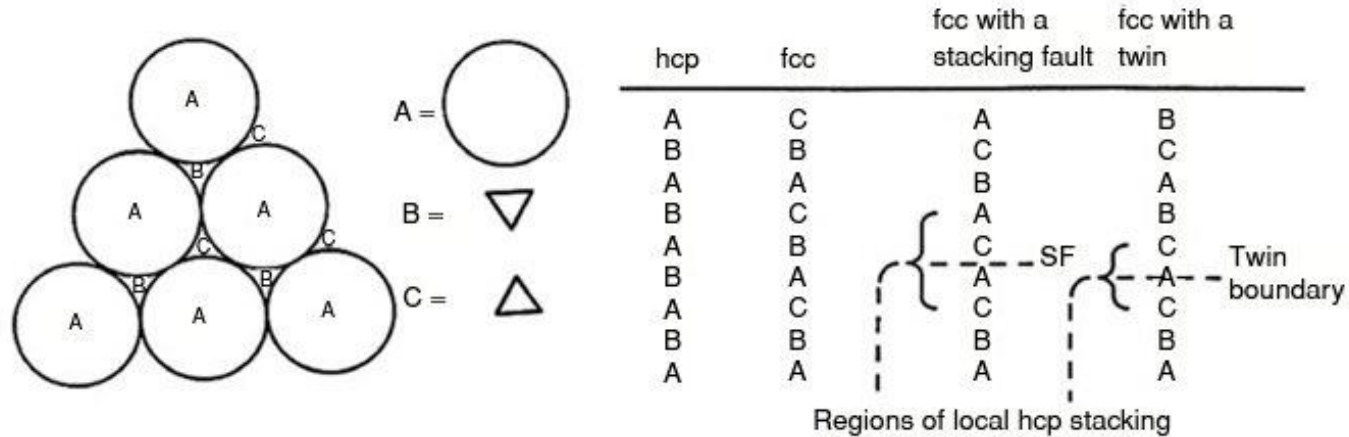


Déformation d'un monocristal

### Exercice :

1. Quelle déformation est induite par maclage ? Que se passe-t-il dans l'autre cas ?
2. Comment passer d'un type de déformation à l'autre ?

Exercice : Pourquoi l'énergie de défaut d'empilement est-elle la plupart du temps environ 2 fois l'énergie d'interface d'une macle ?



[Mechanical Behavior of Materials, W.F. Hosford]