

**Essais mécaniques in-situ avec
analyses micrographiques et EBSD
pour l'identification des mécanismes
cristallographiques de glissement
dans les monocristaux métalliques**

LE Lu Tuan

P. Franciosi, G. Monnet , M.H. Chavanne,
R. Chiron

*Extrait de la thèse : mécanismes de glissement du fer alpha 2009-2011
et simulation DD*

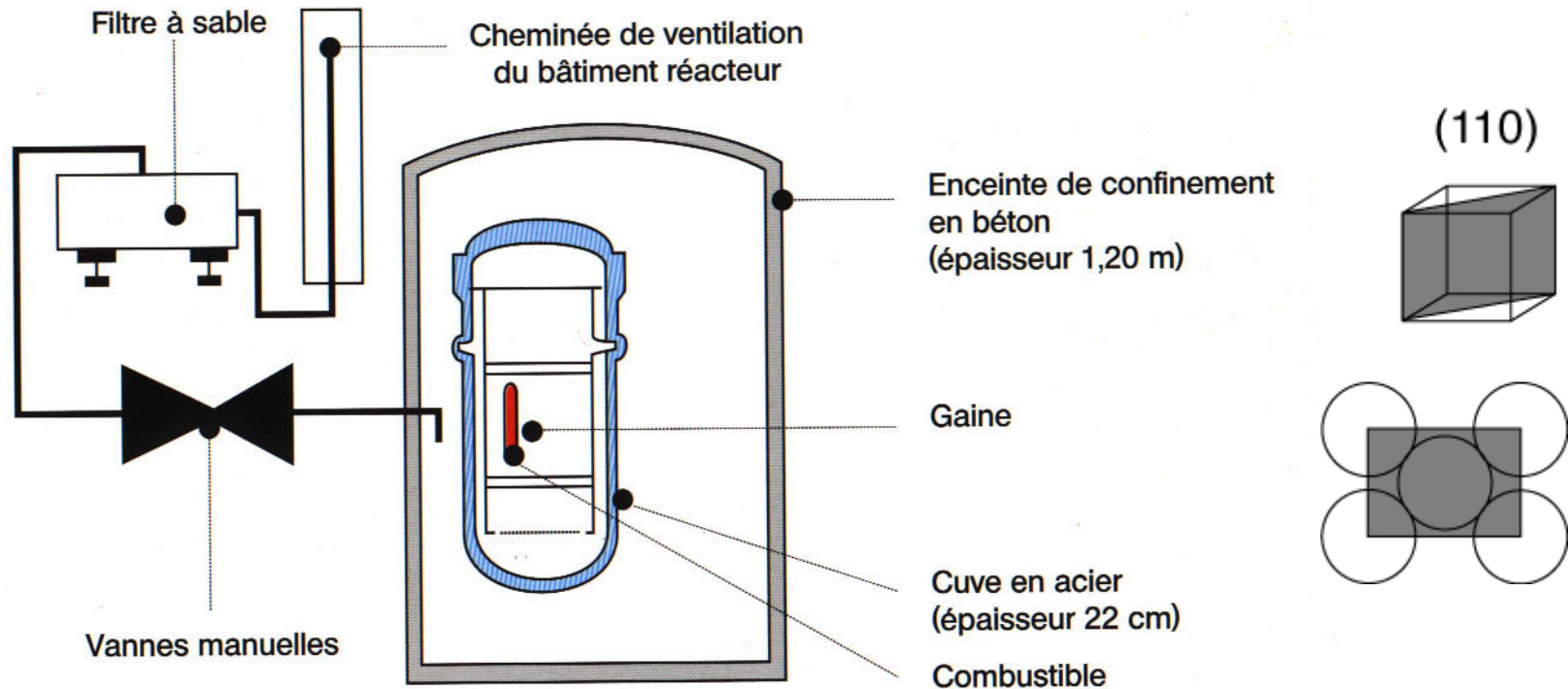
UP13, EDF

Plan de l'exposé

- Rappels:
 - *Objectif de l'étude*
 - *Equipements utilisés*
 - *Spécificités des structures CFC/CC*
 - *Principes de Glissement simple et multiple*
 - *Description des essais*
- Quelques essais
- Quelques résultats
- *Conclusion + Perspectives*

Objectif

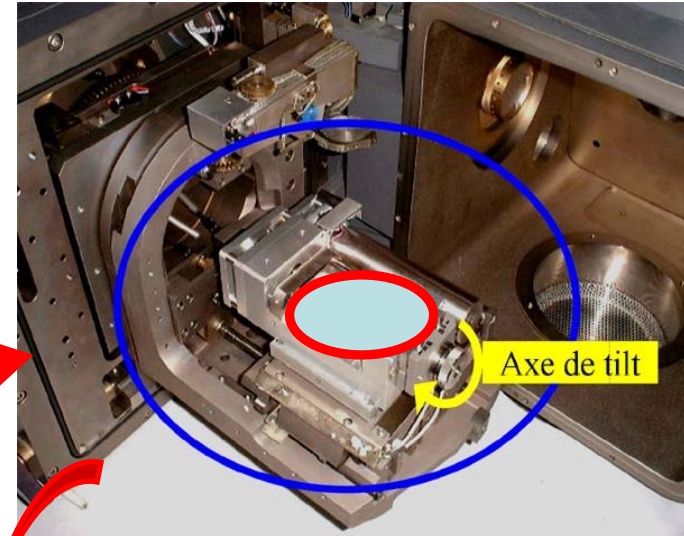
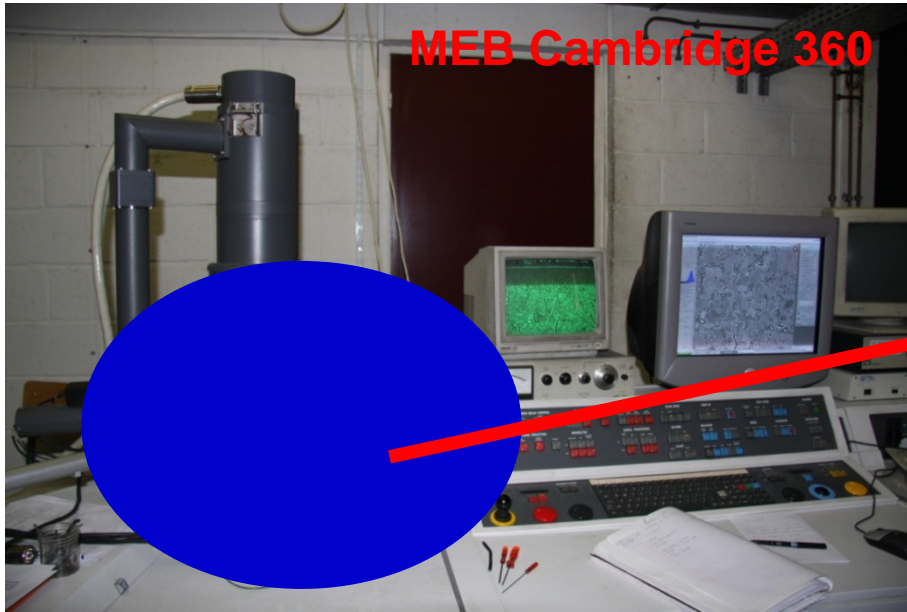
Comprendre la plasticité du fer alpha (C.C) qui entre dans la composition des cuves de centrales



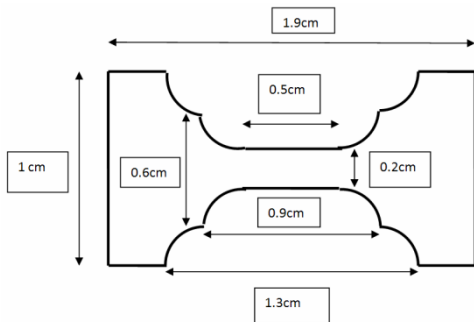
Interaction entre faisceaux d'atomes et dislocations dans l'acier

=> Mouvement des dislocations => plasticité

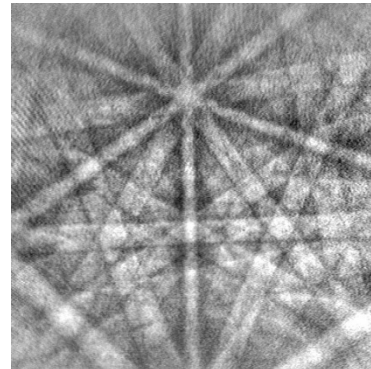
Les équipements utilisés : MEB Cambridge 360 + EBSD + platine traction « Brevet LPMTM 1995 »



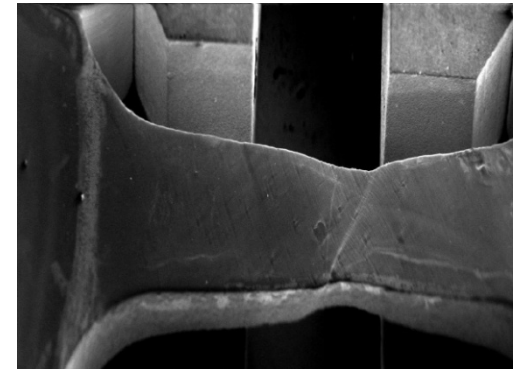
Platine de traction/compression



Échantillon de taille 2x3cm

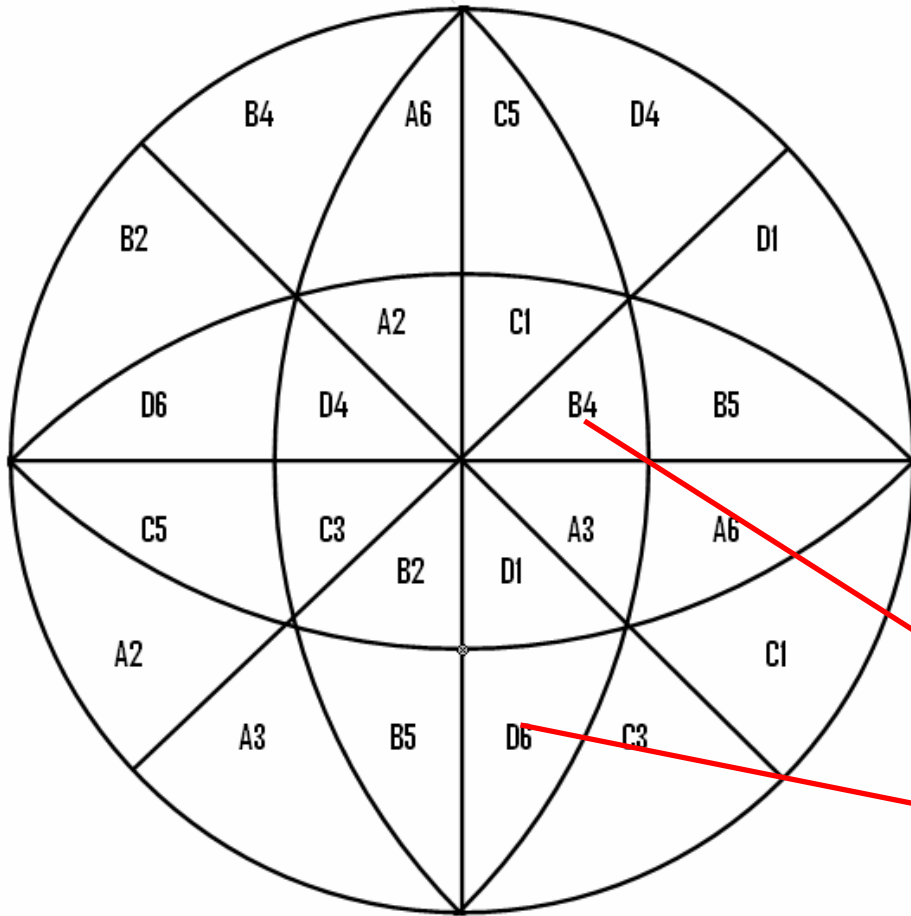


EBSD



Striction de l'échantillon

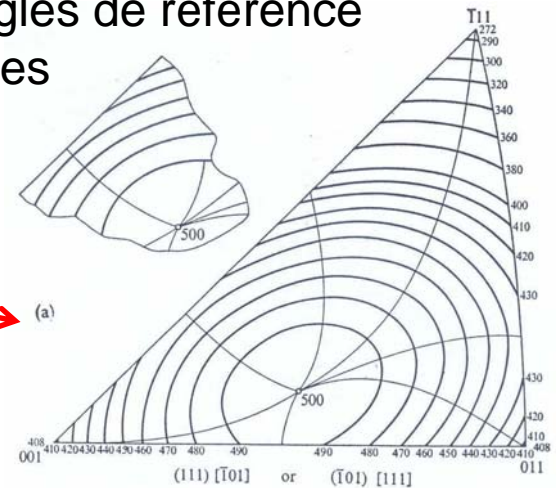
Rappel: Les systèmes de glissement dans CFC



12 systèmes de glissement équivalents $(111)[110]$

	Plan	Directions
A	(-111)	1 $[011]$ 2 $[0\bar{1}1]$
B	(111)	3 $[101]$ 4 $[-101]$
C	$(-1\bar{1}1)$	5 $[-110]$ 6 $[110]$
D	$(1\bar{1}1)$	

24 triangles de référence identiques



Facteur de Schmid

Les systèmes de glissement dans CC

12 systèmes (110)[111] + 12 systèmes (112)[111] + ...

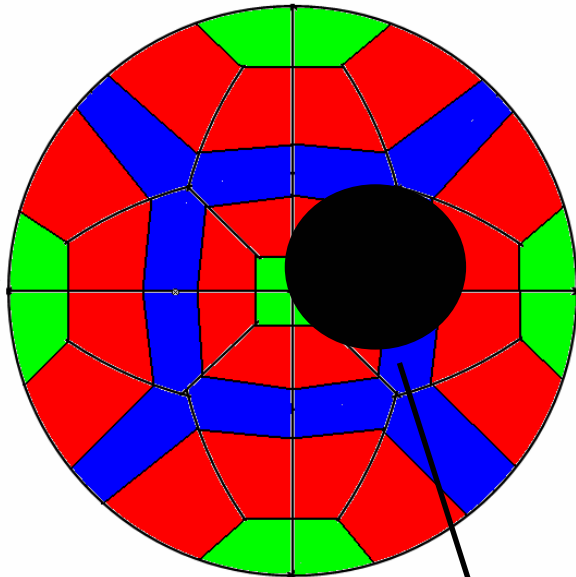
Sur plan (112) : G sens facile (T) >< G sens difficile (AT) $\tau_{112}^{AT} \geq \tau_{112}^T$

En cas

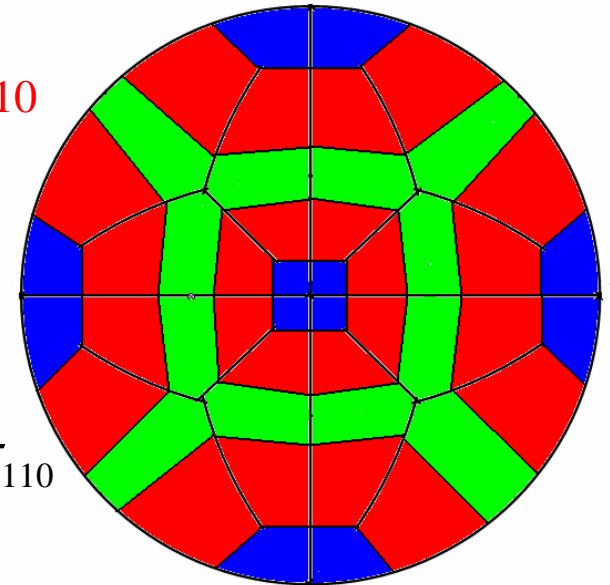
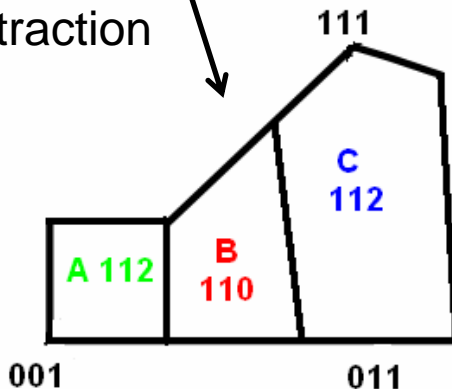
$$\tau_{112AT} = \tau_{112T} = \tau_{110}$$

Zone vert et bleu peut être variable

en $\tau_{112}^{AT} / \tau_{110}$ et $\tau_{112}^T / \tau_{110}$



En traction



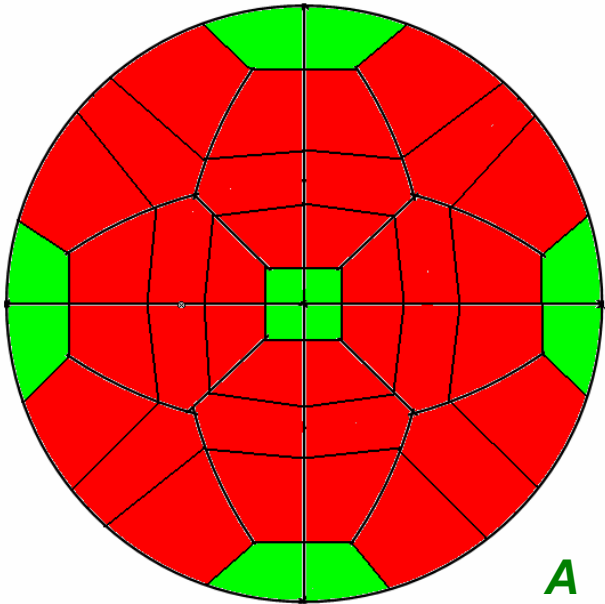
En Compression

A 112 : systèmes de glissement 112 au sens facile (112T)

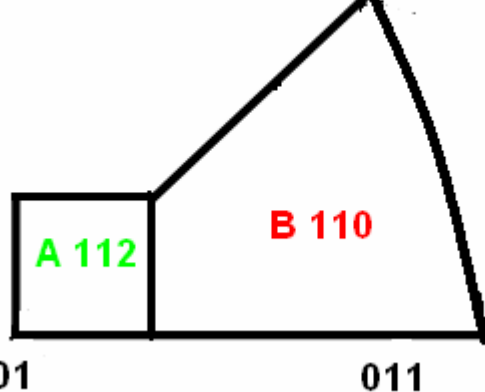
B 110 : systèmes de glissement 110

C 112 : systèmes de glissement 112 au sens difficile (112AT)

Les systèmes de glissement dans CC : $\tau_{112AT} \geq 1.15\tau_{110}$.

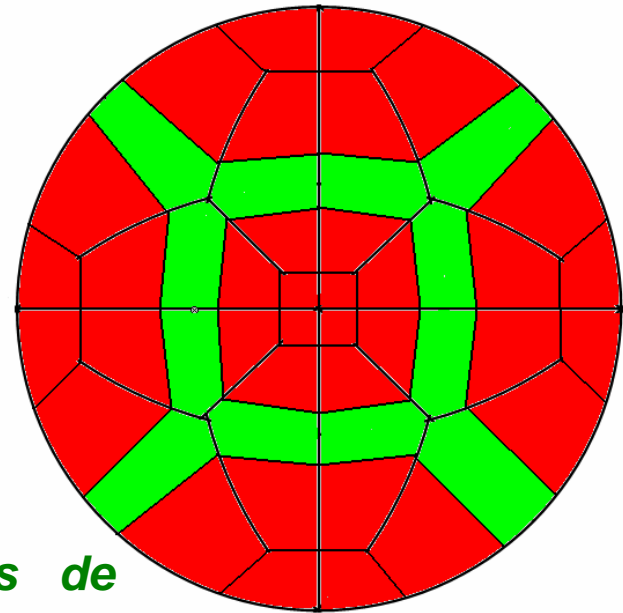


En traction 111

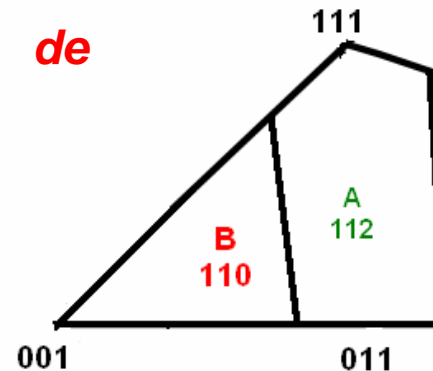


A 112 : systèmes de glissement 112 au sens facile (112T)

B 110 : systèmes de glissement 110



En compression

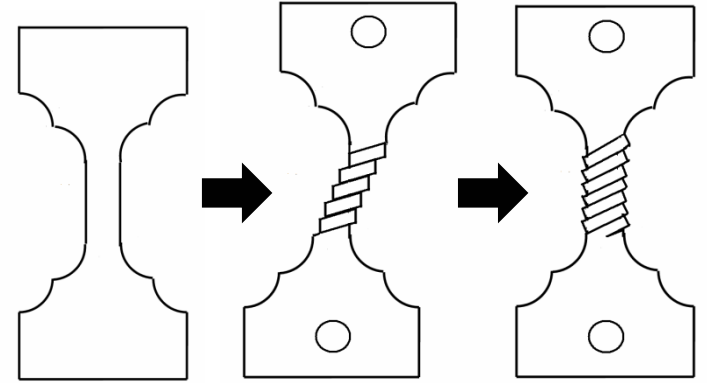
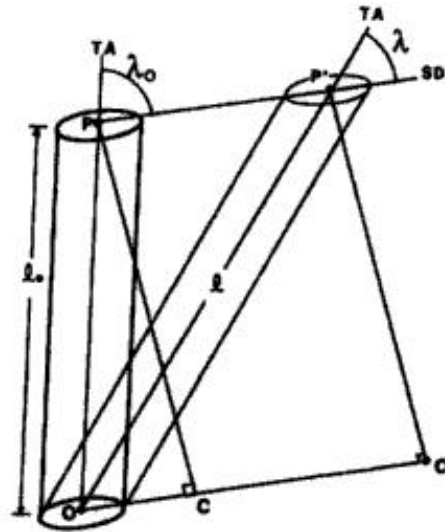
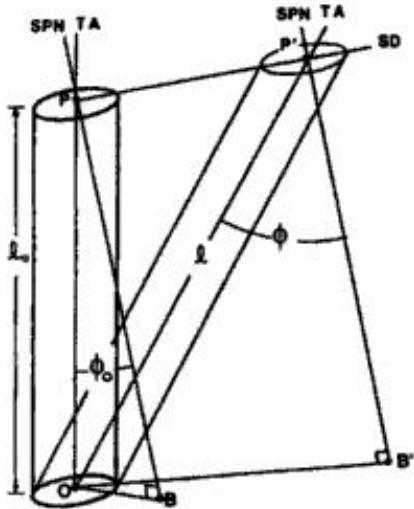


Principe du glissement simple

Etudier l'évolution des angles λ et φ

un seul système de glissement

$$d\varepsilon_P = \cos(\lambda) \cos(\varphi) d\gamma_P = R_p d\gamma_P$$



L'axe de traction tourne vers la direction de glissement b

$$PB = P'B' \Rightarrow l_0 \cos(\varphi_0) = l \cos(\varphi) \Rightarrow \frac{d\varphi}{d\varepsilon_P} = \cot \varphi$$

$$PC = P'C' \Rightarrow l_0 \sin(\varphi_0) = l \sin(\varphi) \Rightarrow \frac{d\lambda}{d\varepsilon_P} = -\tan \varphi$$

n l'axe de traction

$$\cos \varphi = (n \cdot n^g)$$

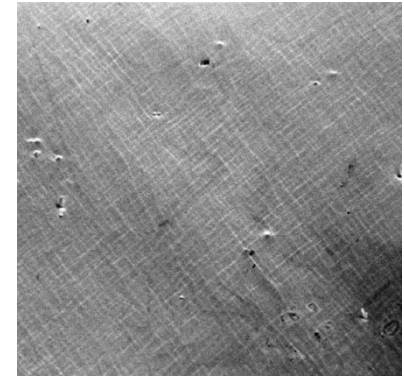
$$\cos \lambda = (n \cdot m^g)$$

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{\sin \lambda_0}{e^\varepsilon}\right) \quad \varphi = \arccos\left(\frac{\cos \varphi_0}{e^\varepsilon}\right)$$

Principe du glissement multiple

Plusieurs systèmes de glissement active en même temps

$$d\varepsilon_{ij}^P = \sum_{g=i}^N R_{ij}^g d\gamma^g$$



Cas simple : glissement multiple stable et symétrique

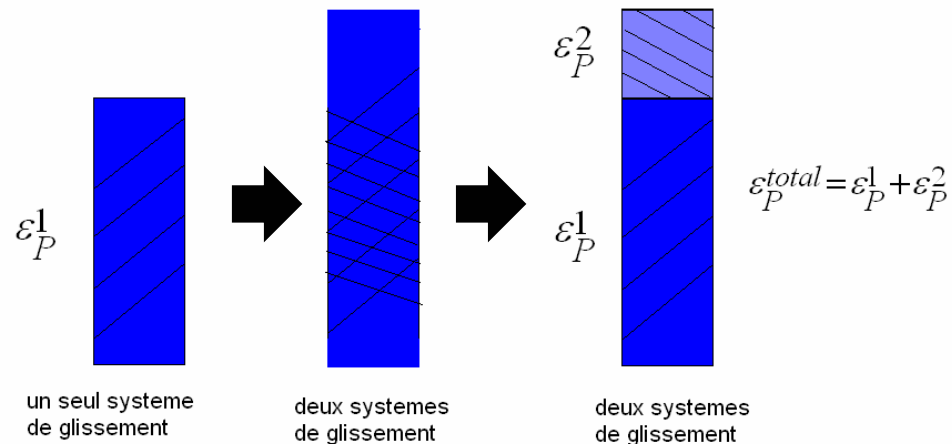
$$d\varepsilon_{ij}^P = \sum_{g=1}^N R d\gamma^g = NR d\gamma$$

Glissement double générale :

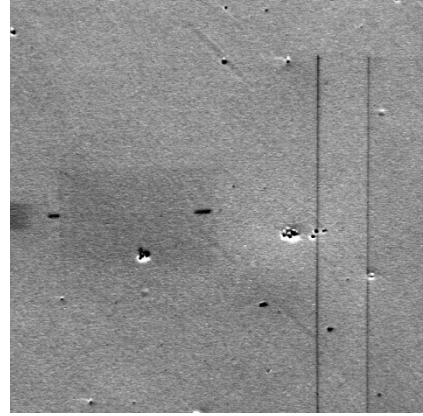
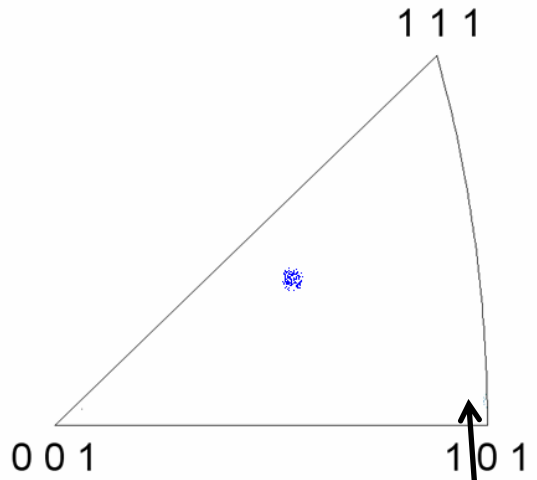
$$d\varepsilon_{pl} = (R_p + \alpha(\varepsilon)R_s) d\gamma_p$$

$$R_p = \cos \lambda_p \cos \varphi_p$$

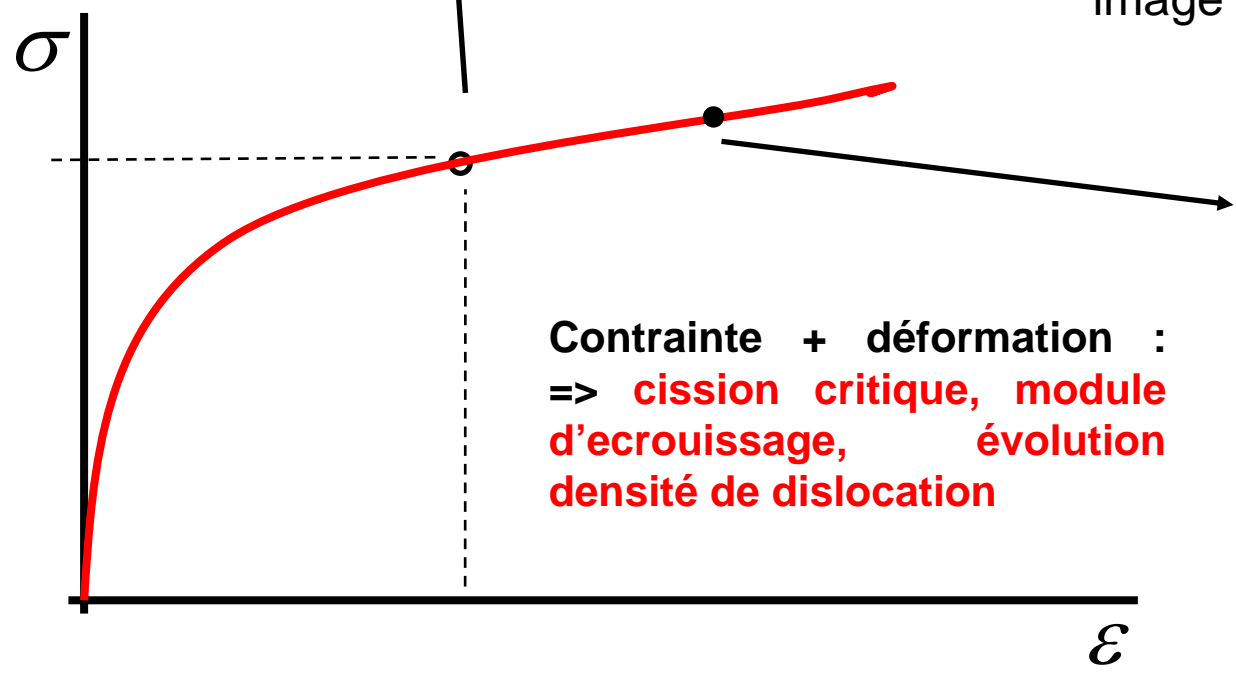
$$R_s = \cos \lambda_s \cos \varphi_s$$



Principes des essais : Suivi des traces de glissement et des rotations cristallines « EBSD »

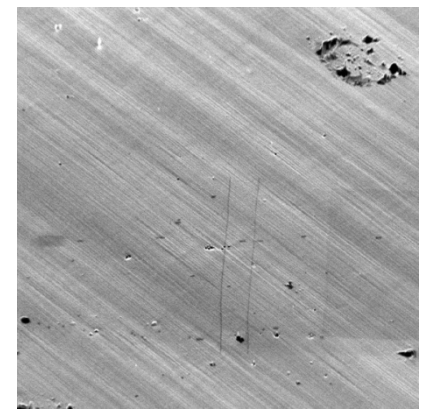
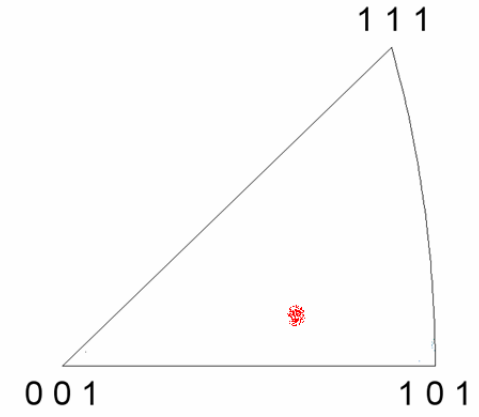


EBSD + image micrographiques : => **identifie système de glissement et son évolution**



**Contrainte + déformation :
=> cisailage critique, module d'écrouissage, évolution densité de dislocation**

Change image



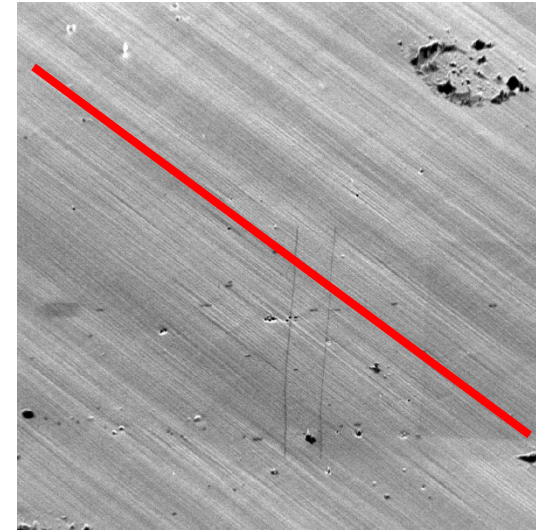
Identification des systèmes de glissement

EBSD => l'axe de traction, normale de l'échantillon => **facteur de Schmid R** de 24 système de glissement (110) et (112)

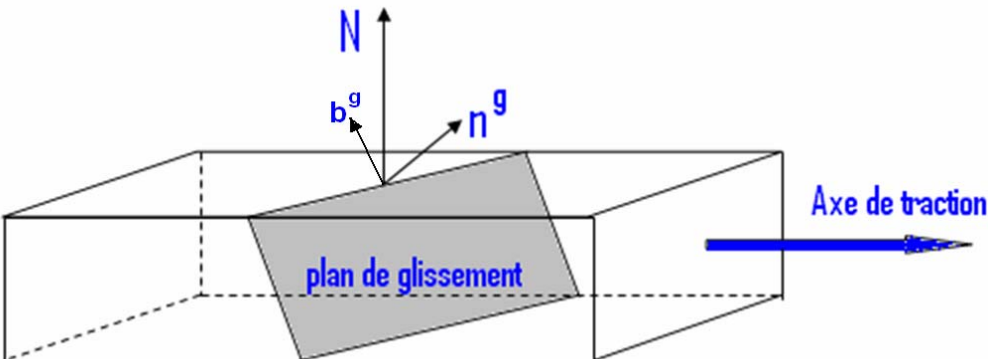
glissement principale $R_p = \cos(\varphi) \cos(\lambda)$ max

Image micrographie => **trace de ligne de glissement** <=> **système de glissement connue**

Trace de ligne de glissement perpendiculaire avec la normale de l'échantillon N et la normale de plan de glissement n^g



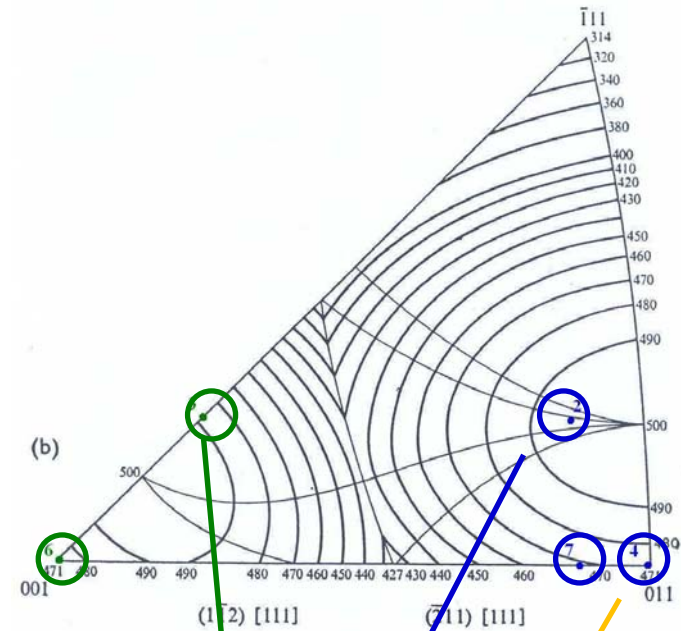
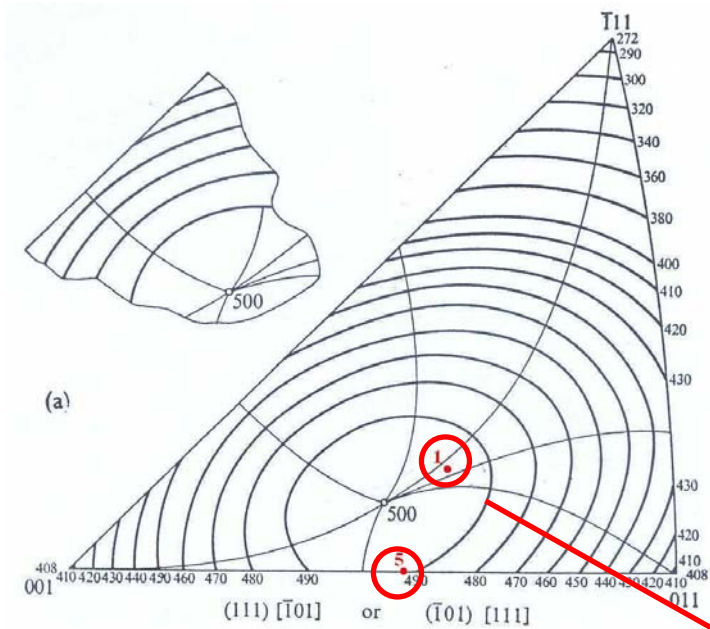
axe de traction



Visibilité d'un système = $b^g \cdot N$

produit scalaire de la direction du vecteur de Burgers du système par la normale à la face d'observation

Les orientations choisies



Total Fe alpha:

- 7 orientations de traction
- 4 orientations de compression
- 4 exemples :

Tr Gs 110

Tr Gs 112T

Tr Gs 112AT, Tr GM 112AT

110

112T

112AT

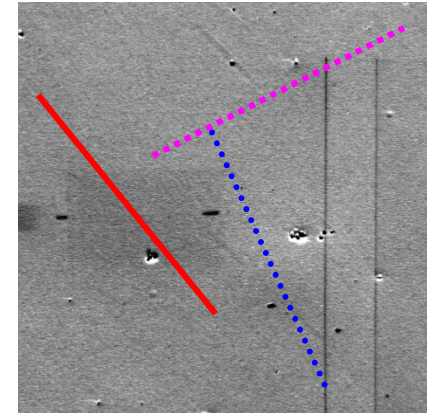
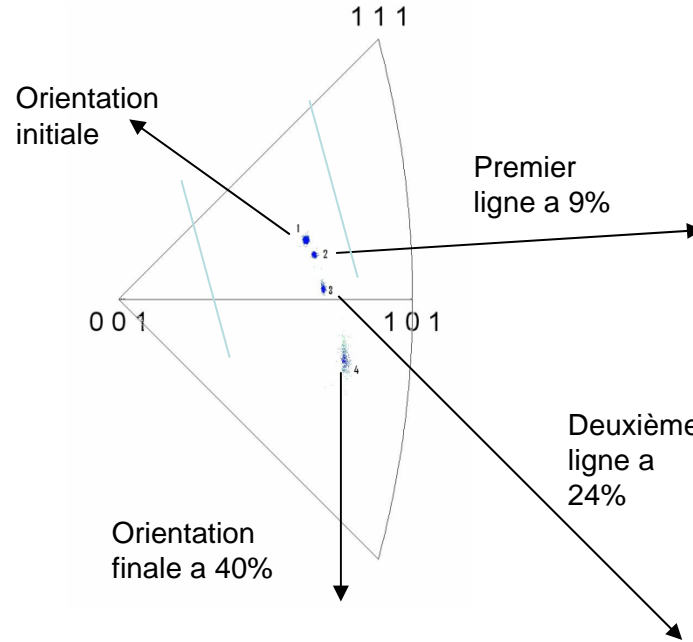
4 glissements multiples

Ex 1 : Orientation n°1

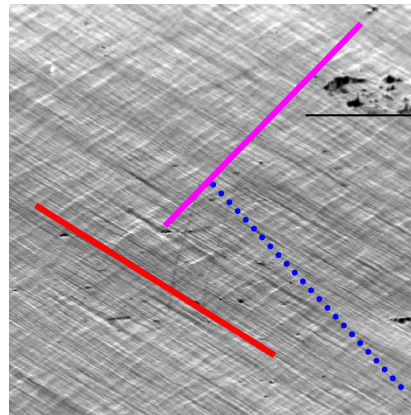
Glissement simple
110 initial, puis G.
Double

[111](-101) rouge,
visibilité $k_1 = 0.14$

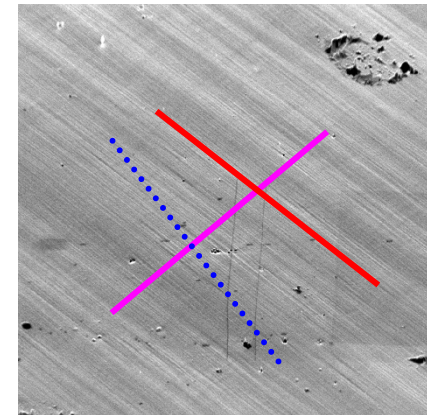
[-111](101) violet
visibilité $k_2 = 0.42$

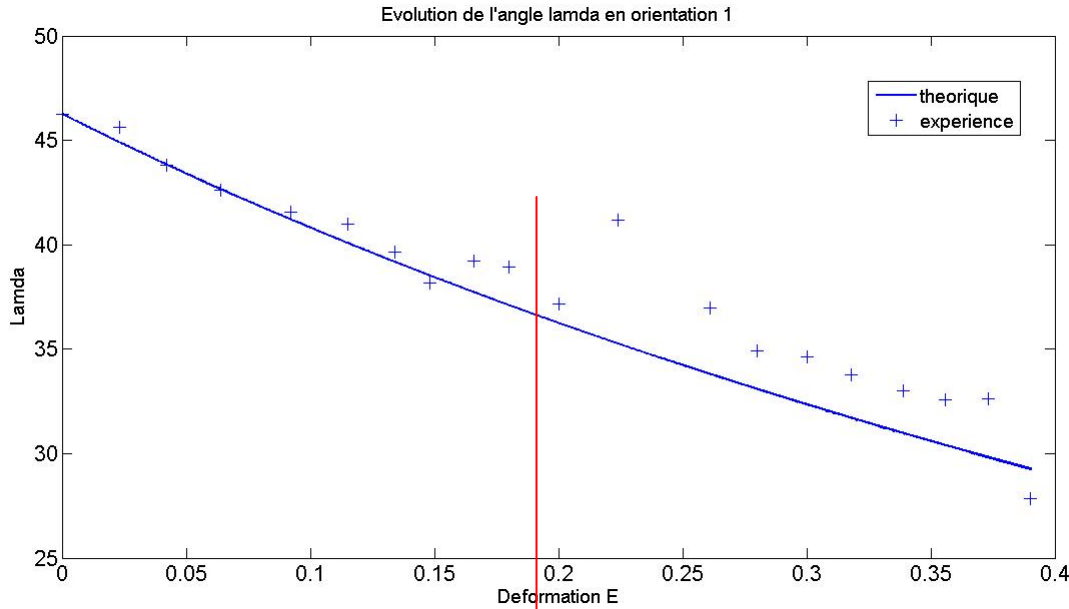
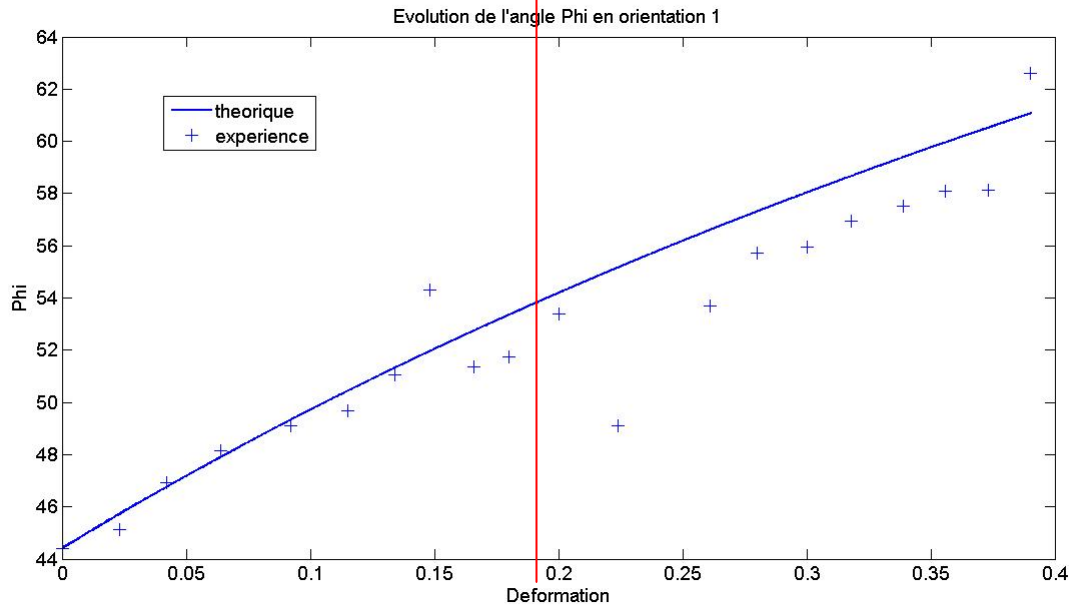


Système
[111](-101)
active,
visibilité
 $k_1 = 0.14$



Système
[-111](101)
active,
visibilité
 $k_2 = 0.42$



λ  φ 

ROTATIONS

Exemple orientation n°1

La rotation suit l'hypothese de glissement simple jusqu'à 20% de déformation

Etude de la transition G simple/G multiple (n=2)

$$d\varepsilon_{Pl} = (R_p + \alpha(\varepsilon)R_s)d\gamma_P \quad \text{alors :} \quad d\gamma_P = \frac{d\varepsilon_{Pl}}{(R_p + \alpha(\varepsilon)R_s)}$$

on remplace ε_P par $R_P\gamma_P$ dans la formule de la
théorie simple, on a donc :

$$d\lambda_P = -\tan \lambda_P \cdot R_P \frac{d\varepsilon_{Pl}}{(R_p + \alpha(\varepsilon)R_s)}$$

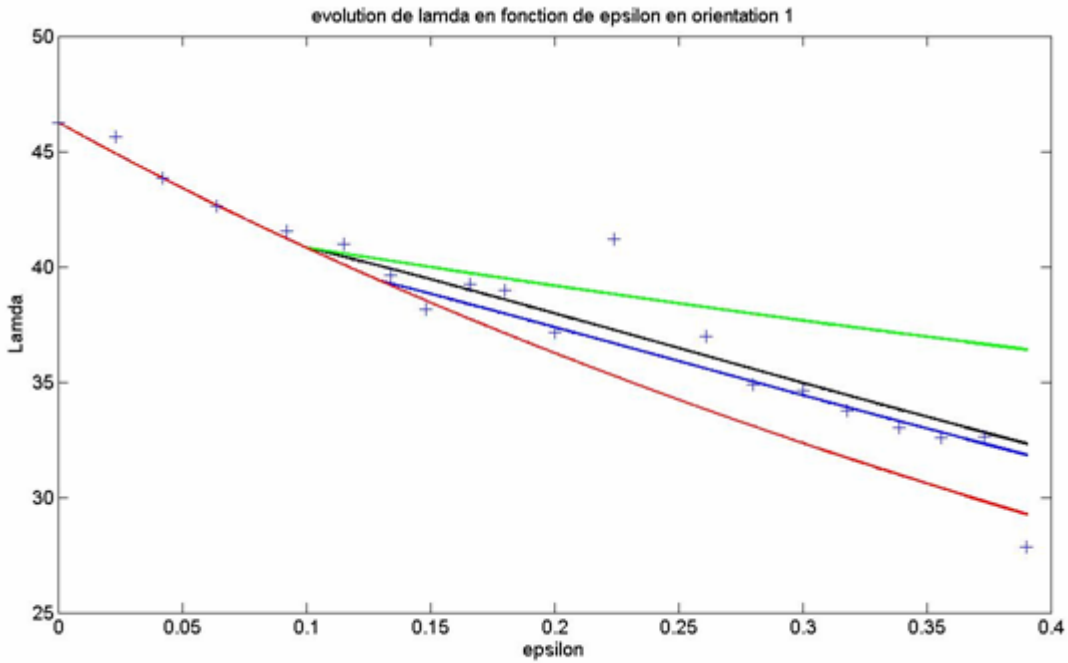
$$d\varphi_P = \cot \varphi_P \cdot R_P \frac{d\varepsilon_{Pl}}{(R_p + \alpha(\varepsilon)R_s)}$$

$$(\lambda_P, \varphi_P) \rightarrow n, R_P \rightarrow (\lambda_S, \varphi_S)$$

$$\uparrow \quad (d\lambda_P, d\varphi_P) \leftarrow R_S \quad \leftarrow$$

hypothèse

$$\alpha = \frac{\gamma_S}{\gamma_P} = \begin{cases} \alpha_0 f(\varepsilon) = \alpha_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m \\ 0 \text{ si } \varepsilon \leq \varepsilon_0 \end{cases}$$

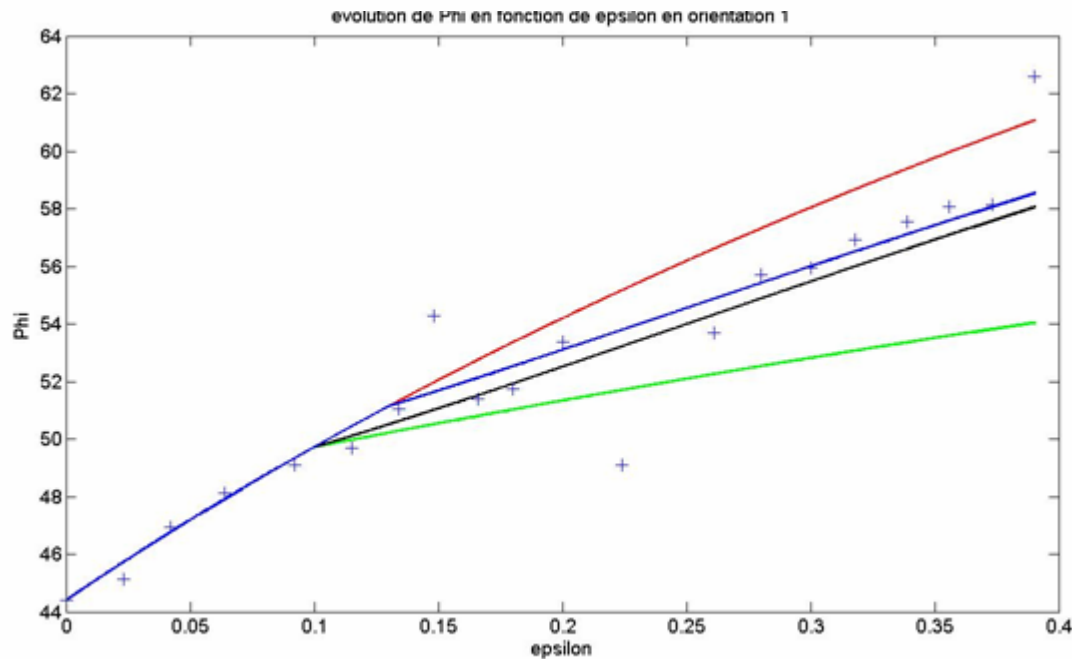
λ 

Orientation n°1

ROTATIONS
HYP de
Glissement double

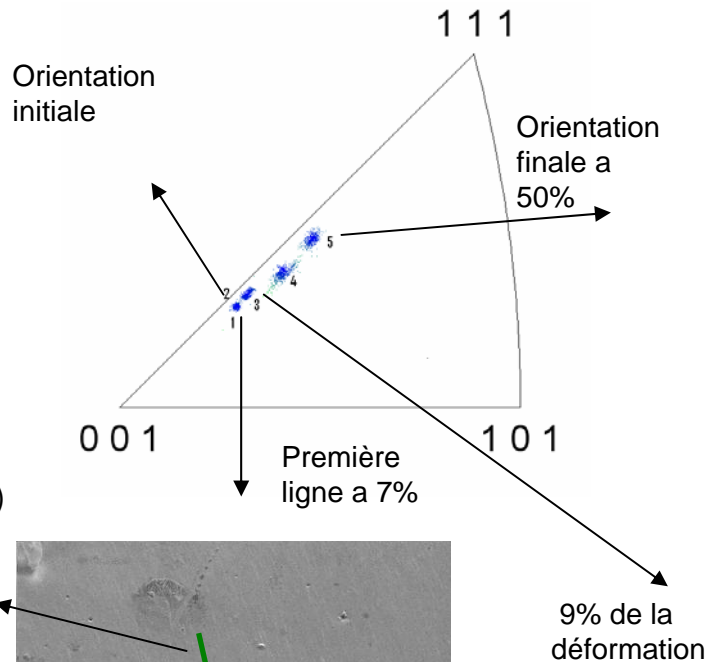
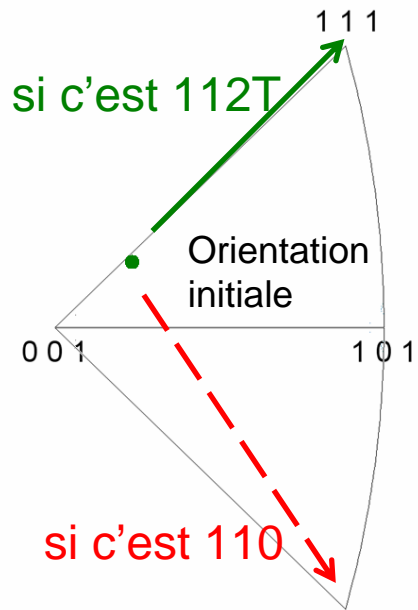
$$\alpha = \alpha_0 = 1$$

$$\alpha = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{-1}$$

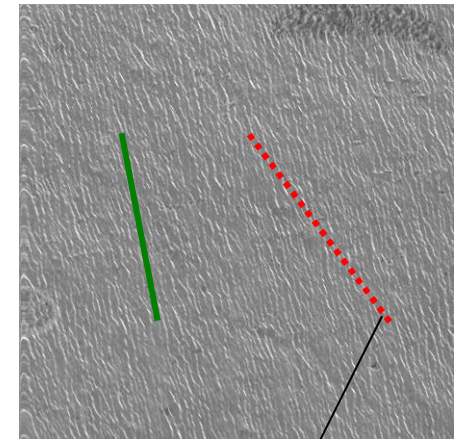
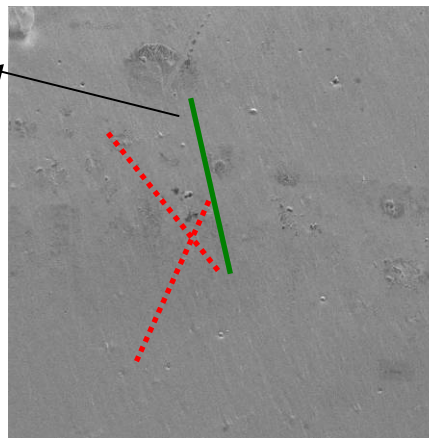
 φ 

Ex 2 : Orientation n°3

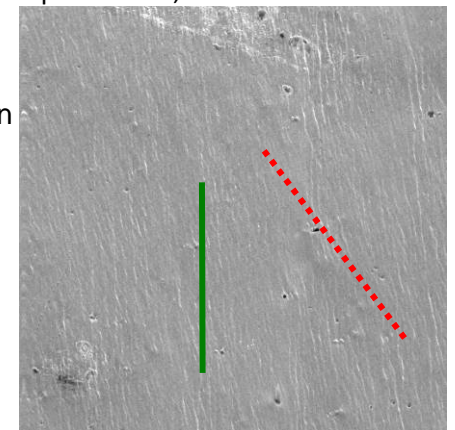
Dans certains cas, si on ne peut pas identifier le système de glissement par image micrographique, on peut regarder la rotation de l'orientation pour donner la conclusion.



Système $[111](-211)$ active, visibilité $k=0.63$



peut être active, visibilité $k=0.2$



Dans cet exemple, c'est le système 112T qui active

Ex 3 : Orientation n°2 : système 112AT

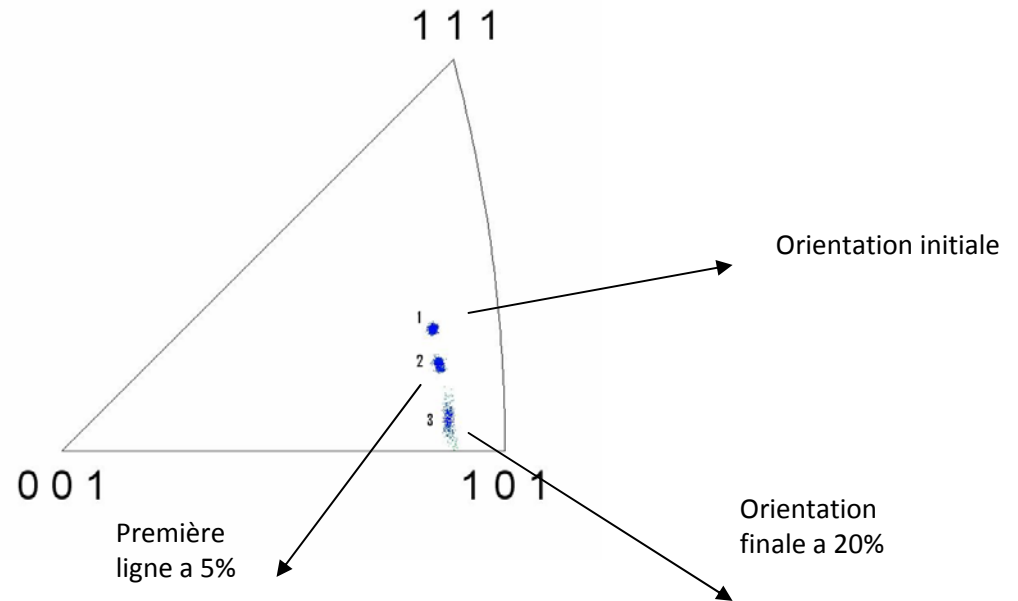
difficulté : système colineaire

Ligne bleue : Système $[1-11](-2-11)$

Ligne rouge : Système $[1-11](-101)$

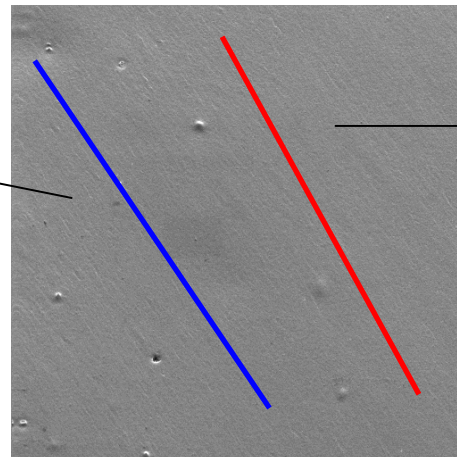
Tirets bleus : glissement double

On ne peut pas distinguer quel système de glissement est actif : soit le système 110, soit le système 112AT ou soit les deux



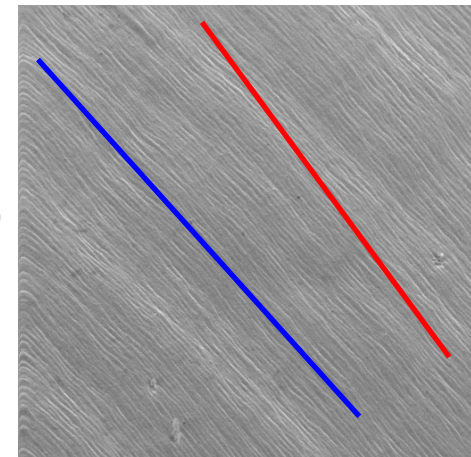
Système

$[1-11](-2-11)$,
visibilité $k=0.42$



Système

$[1-11](-101)$
visibilité
 $k=0.42$



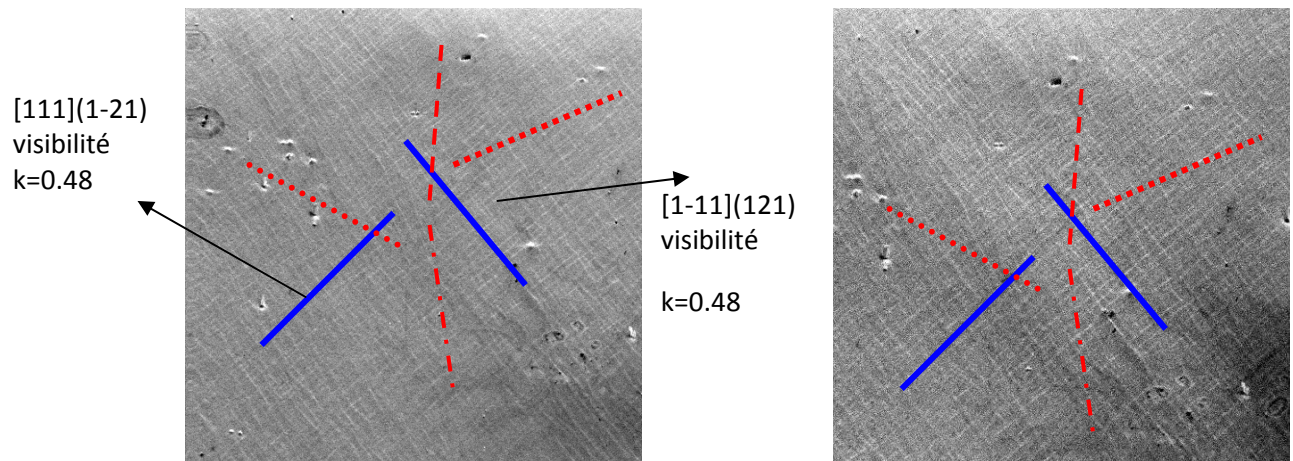
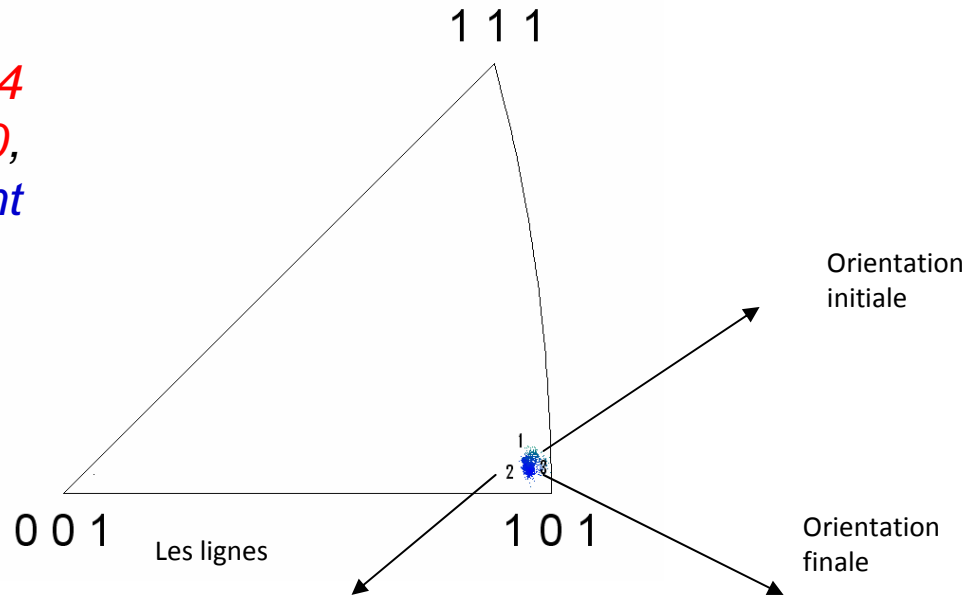
Ex 4 : Orientation 011

glissement multiple 112AT

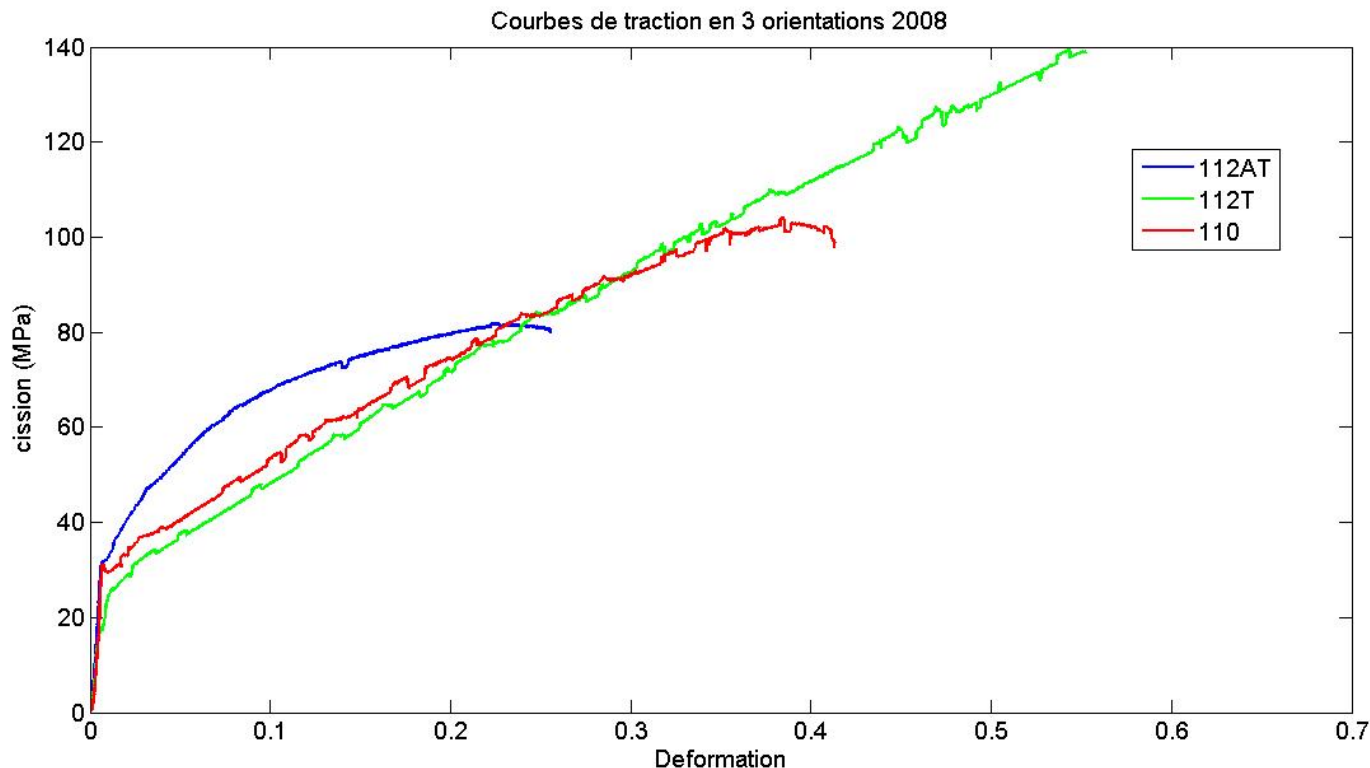
Orientation 011: *Soit 4 systèmes de glissement 110, soit 2 système de glissement 112AT ?*

Preuve du glissement 112AT

$T_{112AT} < 1.15 T_{110}$



Les courbes de traction



La valeur contrainte critique est 27MPa +/-3MPa

Théorie dynamique de dislocations :

$$\tau_c = \alpha \mu b \sqrt{\rho}$$

MESURE DE ρ par DIFFRACTION

$\alpha \mu b \approx 45 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}$ ρ a l'ordre de $2 \cdot 10^{13}$ a $3 \cdot 10^{13}$ a 5% de la deformation

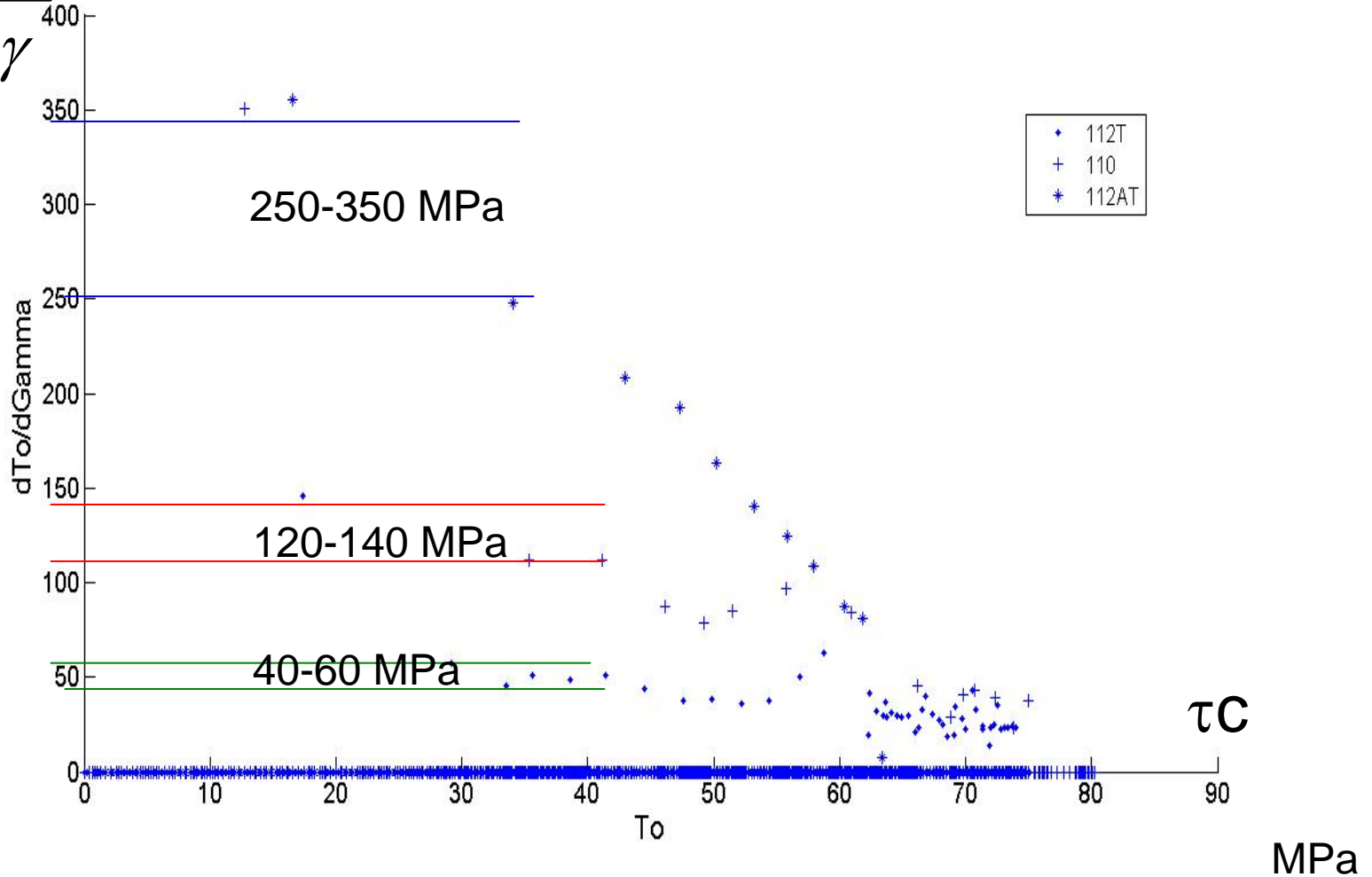
$$\tau_c = 22 \pm 5 \text{ MPa}$$

n'est pas trop éloignée de la valeur expérimentale 25-30MPa

Diagramme de module d'écrouissage H pour les 3 systèmes de glissement

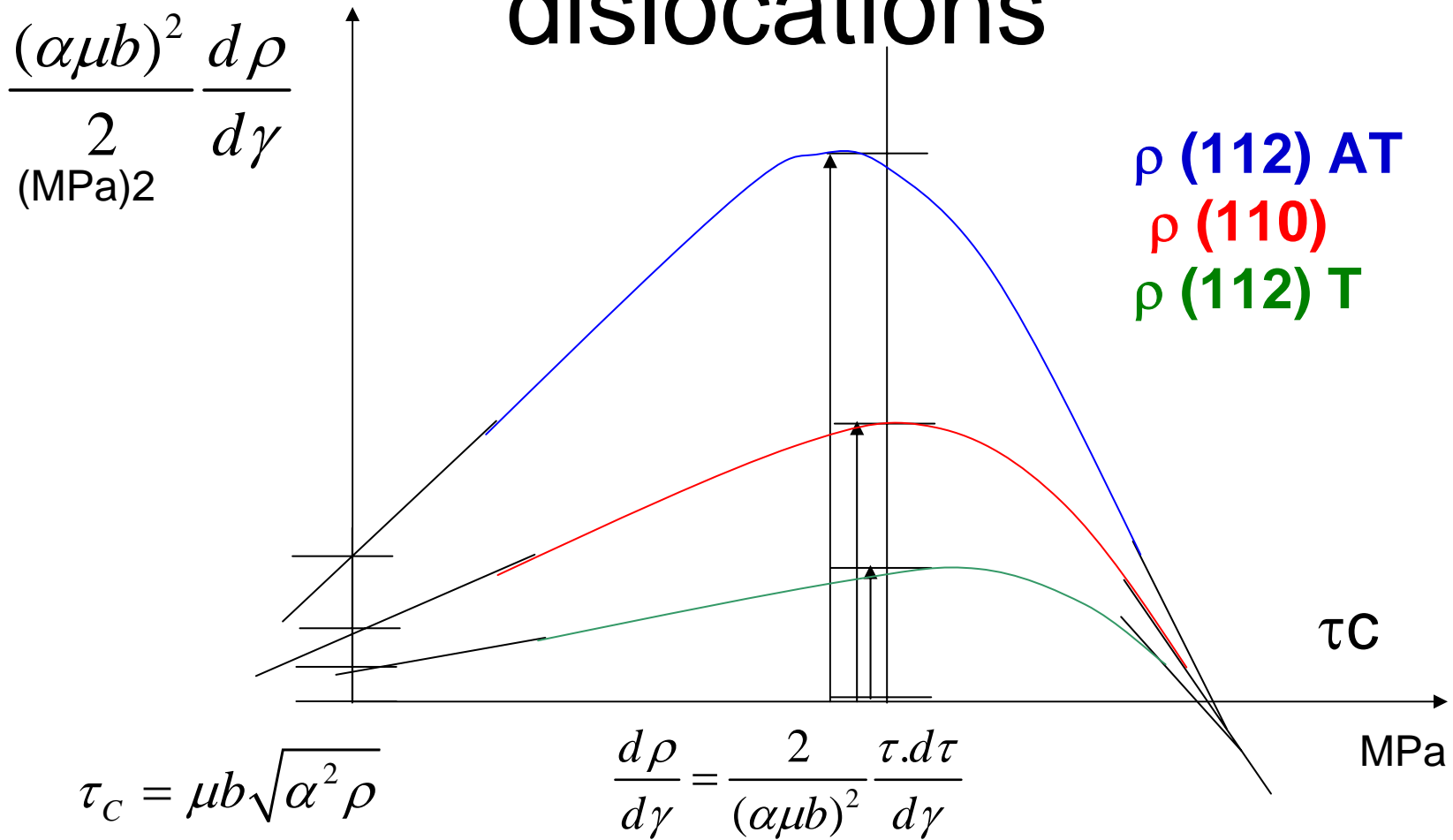
$$H = \frac{d\tau_c}{d\gamma}$$

MPa



Ordre: H (112) T < H (110) < H (112) AT

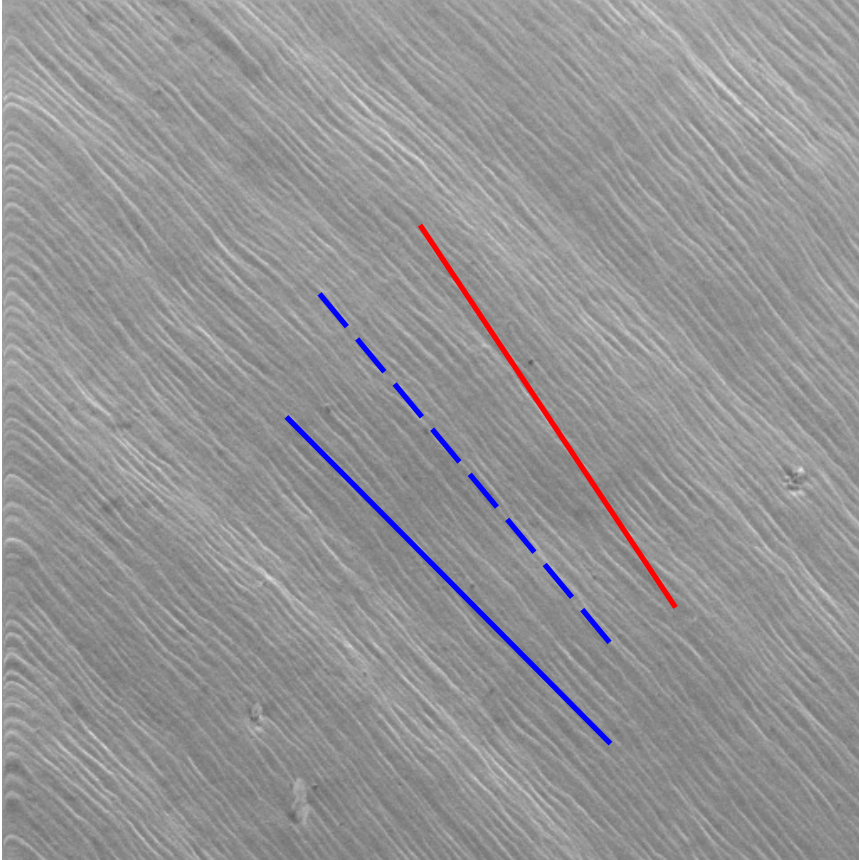
Relation à la densité de dislocations



Le tracer des courbes $\frac{\tau \cdot d\tau}{d\gamma}$ en fonction de τ représente la résistance de la densité de dislocation pour les 3 orientations **Analyse à poursuivre**

Orientation n°2 : système 112AT

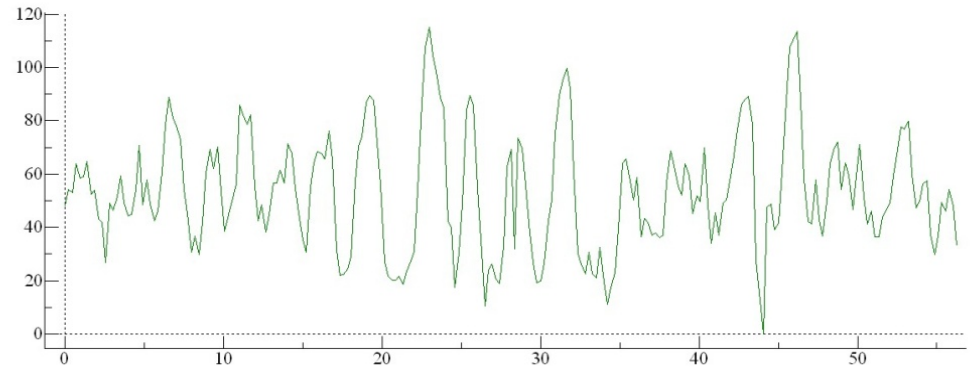
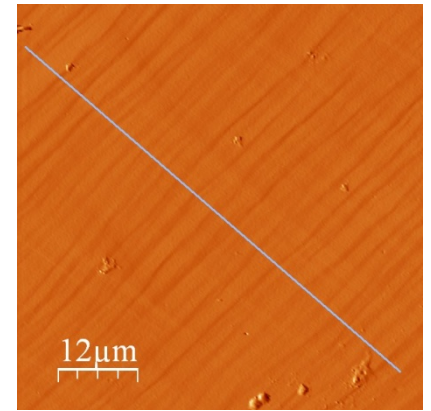
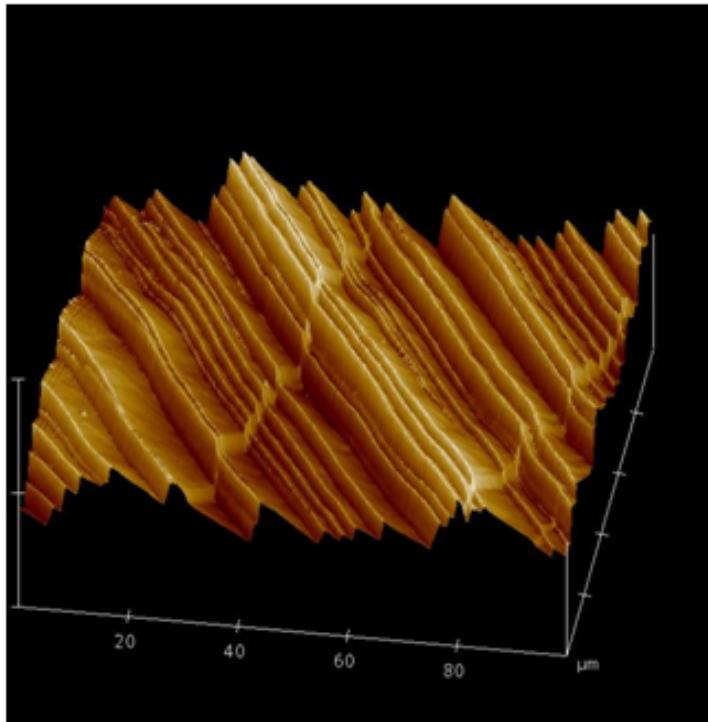
difficulté glissement multiple mixte ?



Comment obtenir des
informations supplémentaires ?

AFM ?

AFM



Profile de ligne de glissement

AFM de Cu en 3D

- Voir profile \Rightarrow étudier évolution de ligne de glissement
- Voir relief \Rightarrow ligne de glissement droit ? \Rightarrow glissement cristallographie ou non ?
- Distinguer les système de glissement différences
- Interaction entre des système de glissement : 110 et 112, v.v.

Conclusion

1. Analyse EBSD + analyse micrographique est une bonne méthode pour étudier les caractères cristallographiques de glissement.
2. Il y a des situations qui restent compliquées à analyser, lors que plusieurs familles de glissement sont activables, en structure CC et en structure HC.
3. Pour une analyse complémentaire, l'étude de relief de surface peut apporter des informations. L'AFM peut être une bonne direction ou le MEB FEG