

# Identification de mécanismes de déformation dans un alliage de titane à mémoire de forme par EBSD

Emmanuel Bertrand<sup>1</sup>, Philippe Castany<sup>2</sup>,  
Yang Yang<sup>2</sup>, Edern Menou<sup>1</sup>, Thierry Gloriant<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut des Matériaux Jean Rouxel, Nantes

<sup>2</sup> INSA Rennes, Institut des Sciences Chimiques de  
Rennes

Journées GnMEBA 2016, Nantes

# Sommaire

---

## ❖ Généralités

Contexte

Effet superélastique, mémoire de forme

Éléments sur les mécanismes de déformation

Matériau d'étude

## ❖ Technique de reconstruction de phase

Reconstruction de la phase mère par indexation directe des clichés de Kikuchi

## ❖ Identification de mécanismes de déformation

Identification des systèmes de maclage

Construction de la séquence de mécanismes de déformation

## ❖ Analogie entre différents systèmes de maclage

Outils de prédiction des variantes activées

Correspondance entre maclage de la martensite  $\alpha''$  et maclage de la phase  $\beta$

# Contexte

Alliages de titane  $\beta$ -métastables  $\longrightarrow$  applications biomédicales

## Haute biocompatibilité

(éléments d'addition : Nb, Ta, Mo, Zr,...)

## Bas module d'Young

(30-50 GPa)

## Effet mémoire de forme

## Superelasticité

### Prothèses, implants:

Aujourd'hui:

Ti-6Al-4V

Alliages Cr-Co

Aciers inox



$\rightarrow$  Problèmes de biocompatibilité:

V, Cr, Co, Al

$\rightarrow$  Haut Module d'Young:

$E_{\text{Ti-6Al-4V}} \sim 110 \text{ GPa}$       $E_{\text{Cr-Co}} \sim 200 \text{ GPa}$

$E_{\text{os}} \sim 20-30 \text{ GPa}$

### Dispositifs intelligents:

stents



Agrafes à mémoire de forme



T ambiante



37° C

Aujourd'hui: NiTi

$\rightarrow$  Problèmes of biocompatibilité:

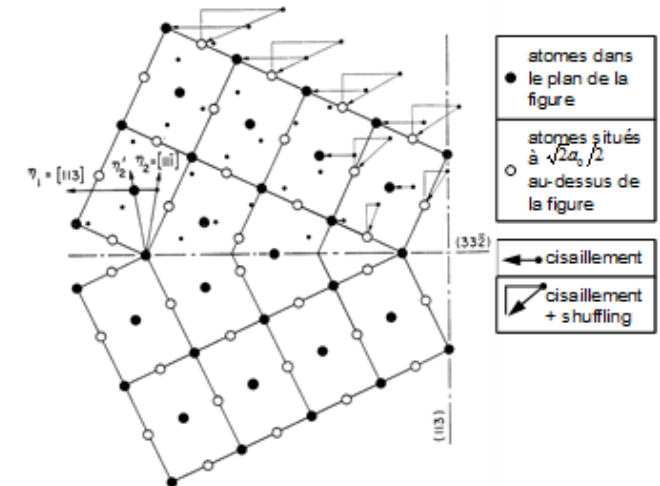
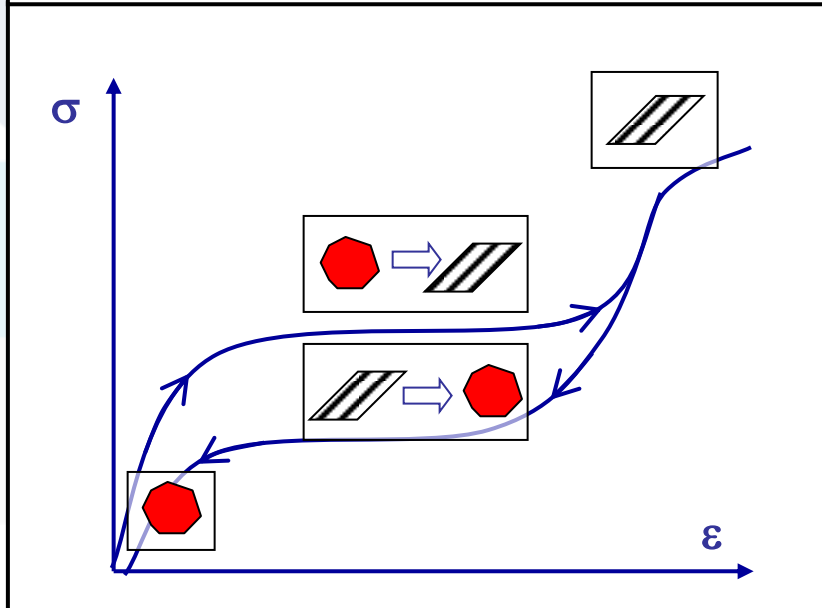
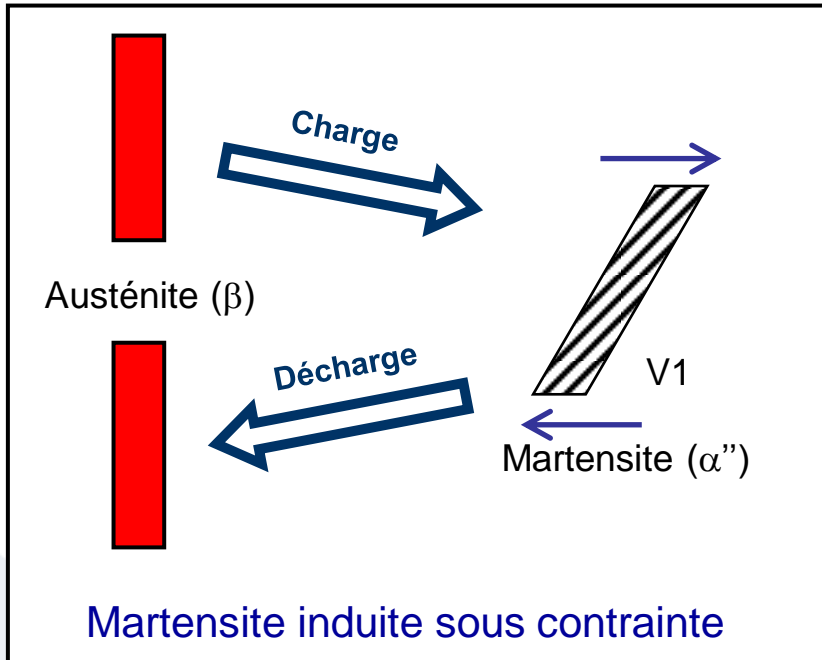
Ni

$\rightarrow$  Mise en forme:

Limitée à température ambiante

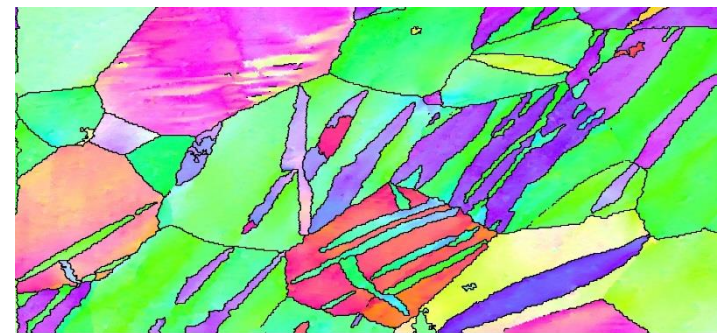
Presque inusable

# Mécanismes de déformation : alliages superélastiques



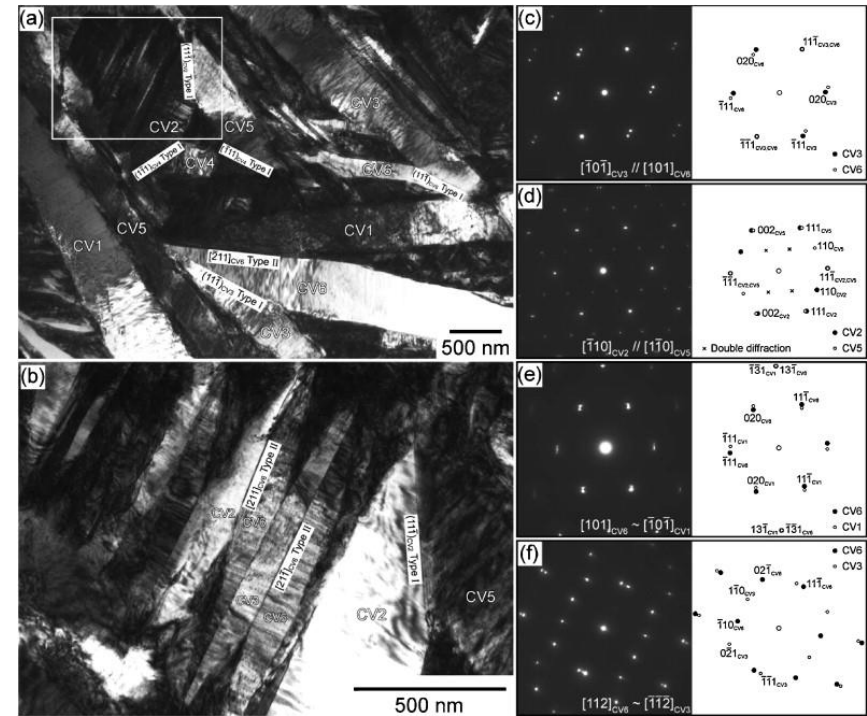
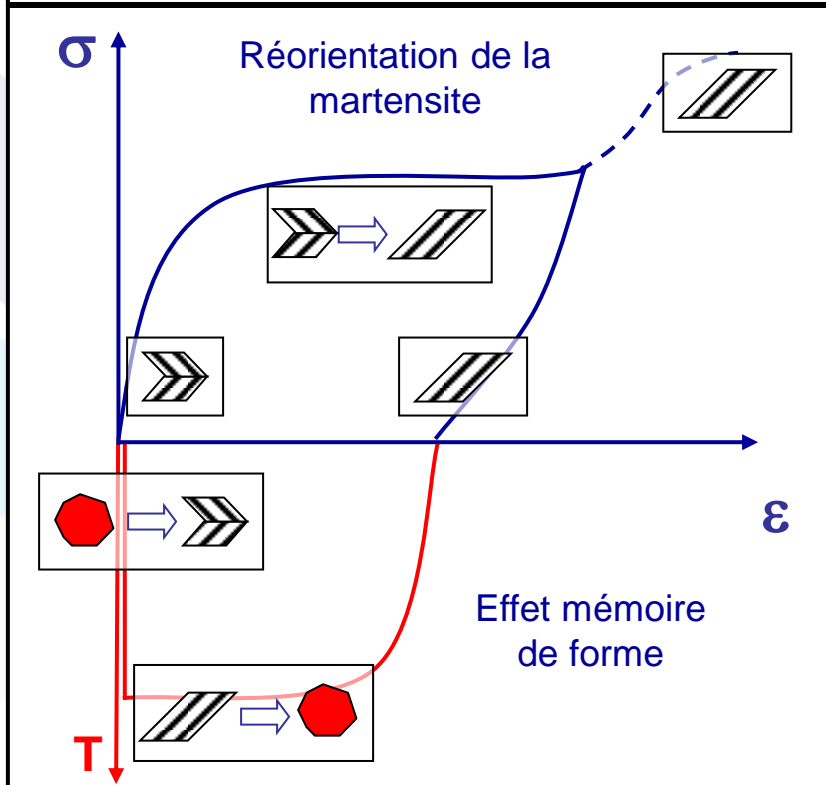
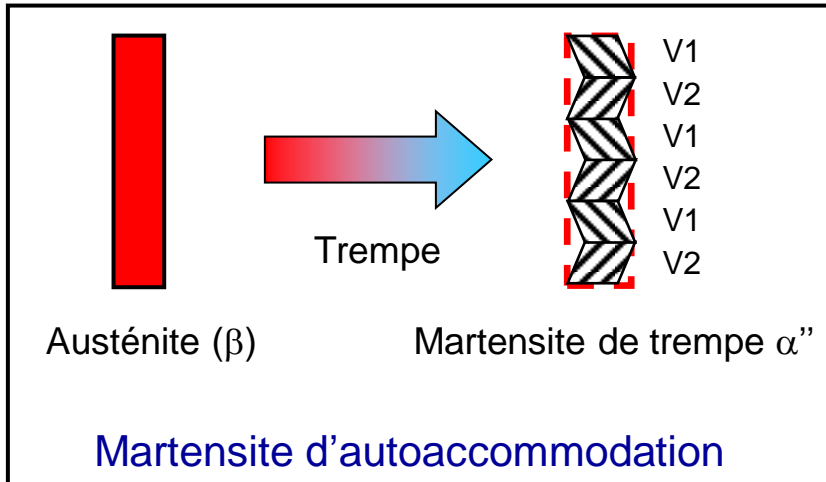
Maclage plastique

- Changement d'orientation du gain  $\beta$
- Système  $\{332\}\langle 113\rangle_{\beta}$  spécifique au Ti $\beta$
- Système  $\{112\}\langle 111\rangle$  dans les structures c.c. communes



Macles plastiques dans un alliage superélastique Ti-27Nb (at%) ( $\epsilon=6\%$ )

# Mécanismes de déformation : alliages à mémoire de forme



H. Tobe et al. J. Alloys Compd., 577S (2013) p. S435

Réorientation de la martensite par maclage  
 $\{111\}_{\alpha''}$  (type I) ou  $\langle 211 \rangle_{\alpha''}$  (type II)

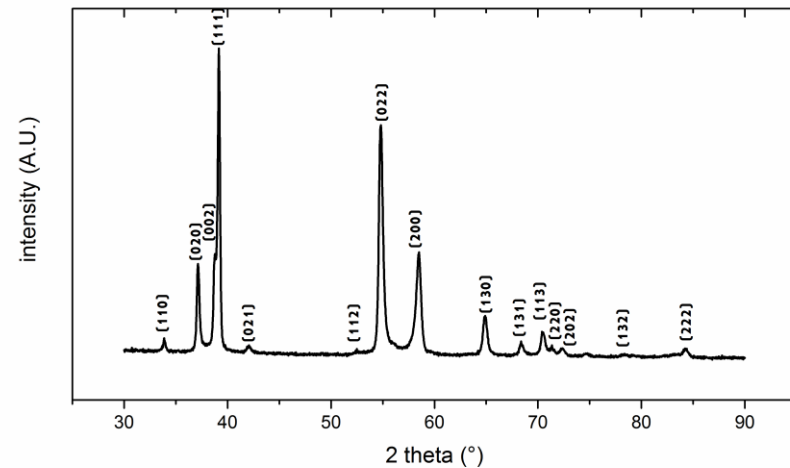
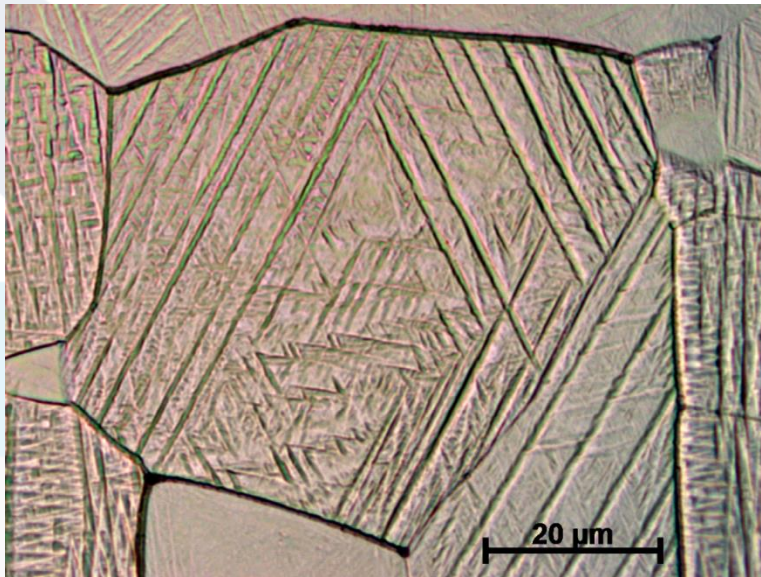
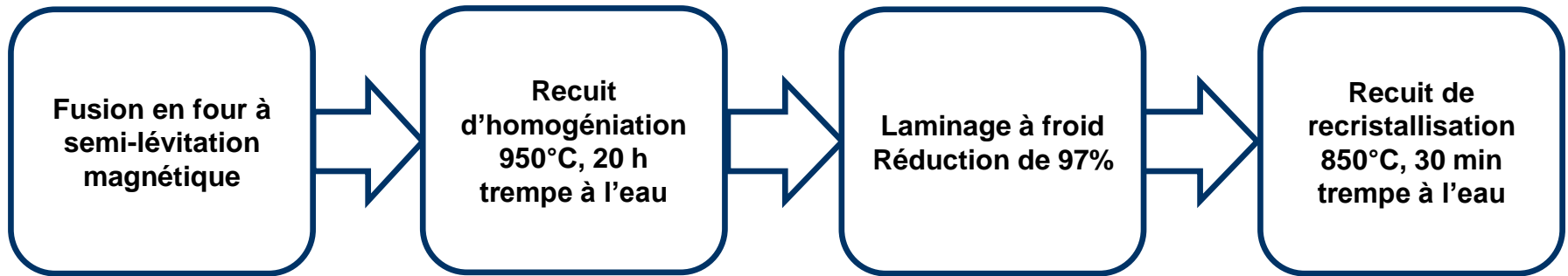
Maclage de réorientation

- Passage d'une variante  $\alpha''$  à une autre
- Chaque variante est en relation d'orientation avec l'ex grain  $\beta$

Effet mémoire de forme simple sens

- Suppression du maclage de réorientation au chauffage
- Retour à la microstructure d'autoaccommodation

## Ti-25Ta-20Nb (%m)



Microstructure composée de martensite  $\alpha'$  d'autoaccommodation

# Sommaire

---

## ✦ Généralités

Contexte

Effet superélastique, mémoire de forme

Éléments sur les mécanismes de déformation

Matériau d'étude

## ✦ Technique de reconstruction de phase

Reconstruction de la phase mère par indexation directe des clichés de Kikuchi

## ✦ Identification de mécanismes de déformation

Identification des systèmes de maclage

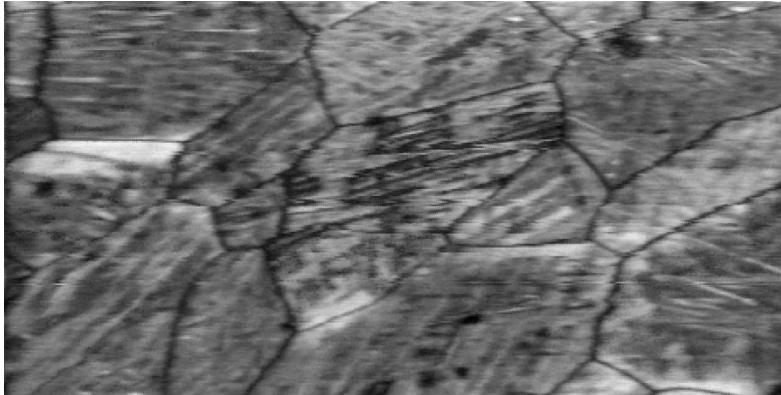
Construction de la séquence de mécanismes de déformation

## ✦ Analogie entre différents systèmes de maclage

Outils de prédiction des variantes activées

Correspondance entre maclage de la martensite  $\alpha''$  et maclage de la phase  $\beta$

# Caractérisation EBSD : premiers essais sur MEB-filament W



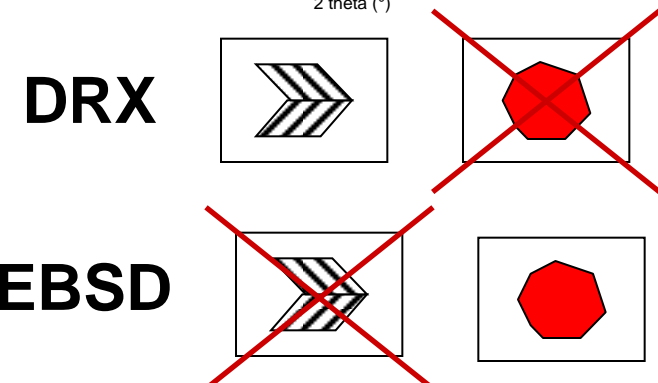
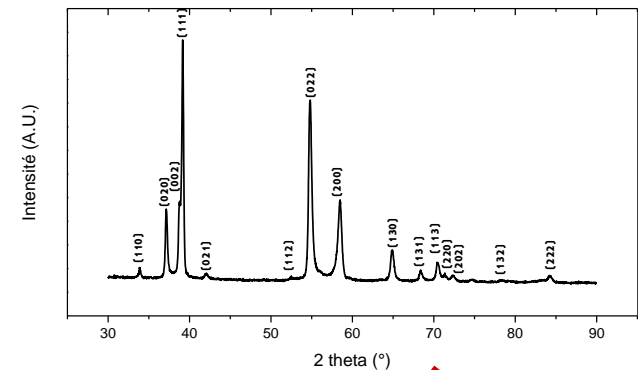
25.00  $\mu\text{m}$  = 100 steps IQ 20.7...101.1



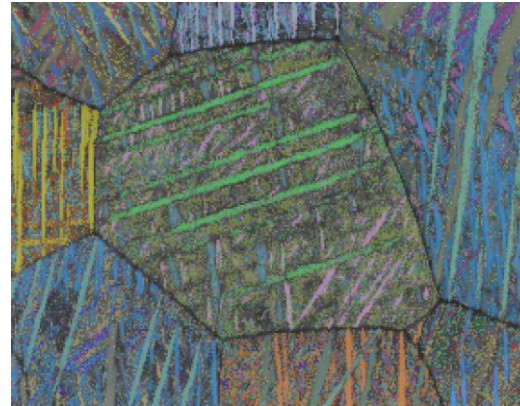
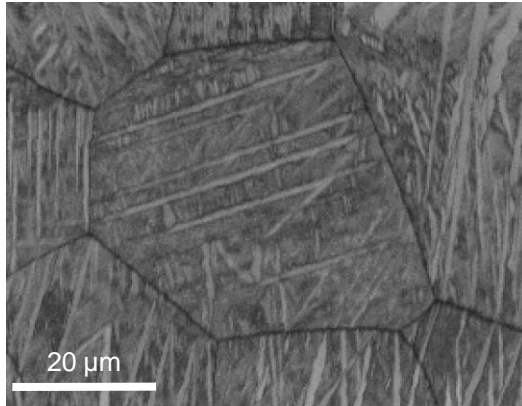
25.00  $\mu\text{m}$  = 100 steps Boundary levels: 15° IPF [001]



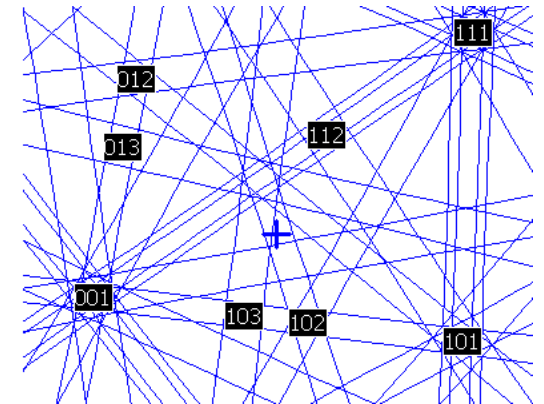
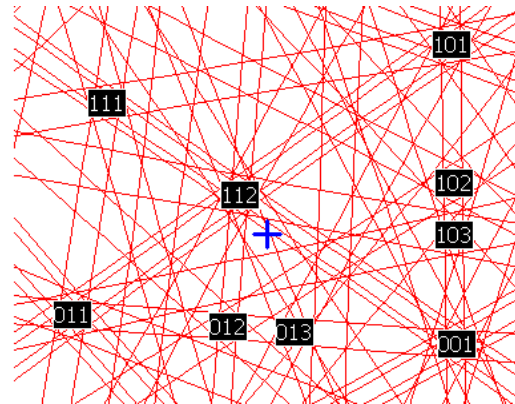
- ✦ Indexation des clichés de Kikuchi par  $\alpha''$  → Echec  
Microstructure trop fine
- ✦ Indexation des clichés par la phase  $\beta$  → Succès  
Il n'y a pas de phase  $\beta$



# Cartographie EBSD – MEB-FEG

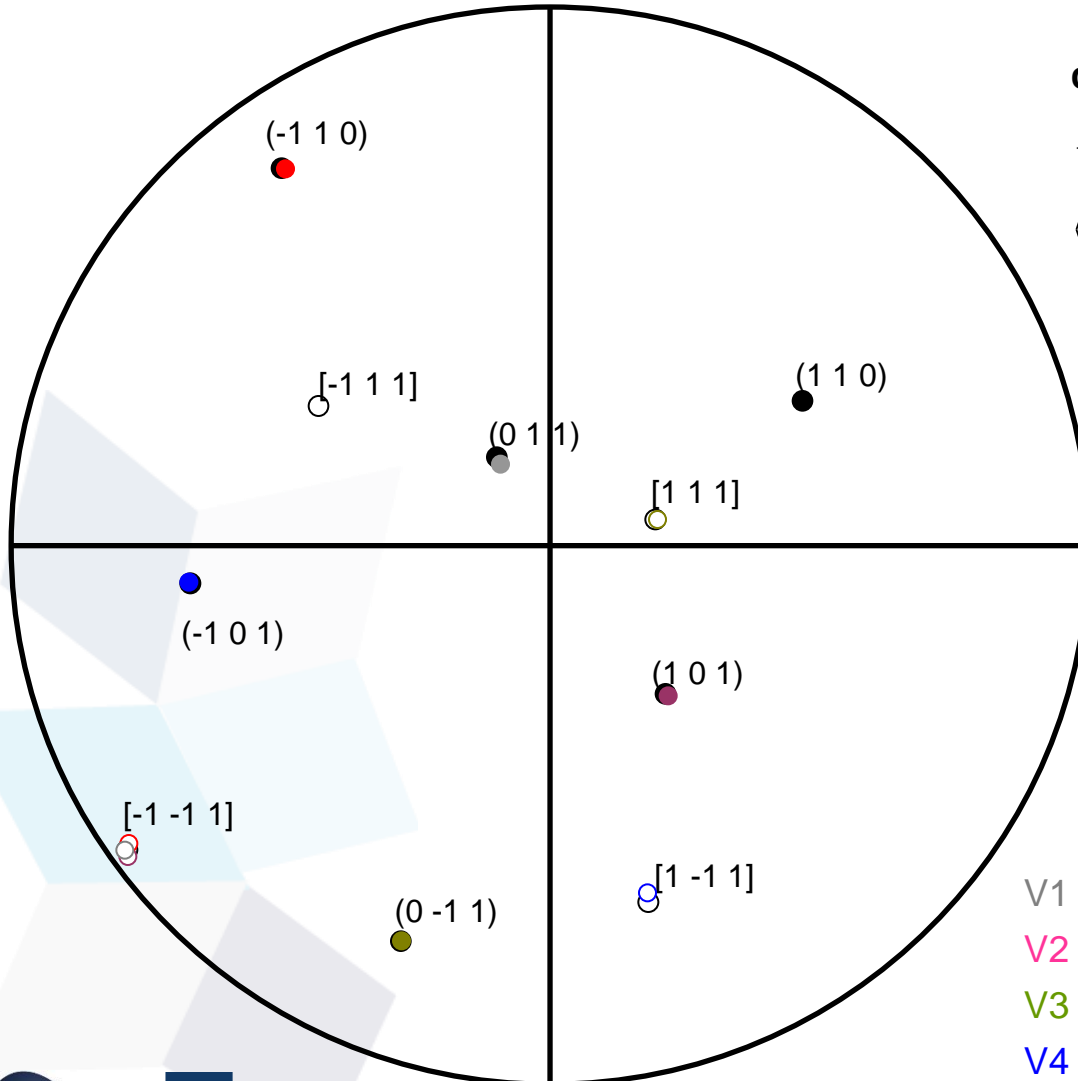


- Cartographie d'un grain  
Indexation  $\alpha''$   
Indexation  $\beta$   
(nettoyée)
- Proximité des clichés de Kikuchi



**Indexer directement par la phase mère agit comme une opération de reconstruction de phase**

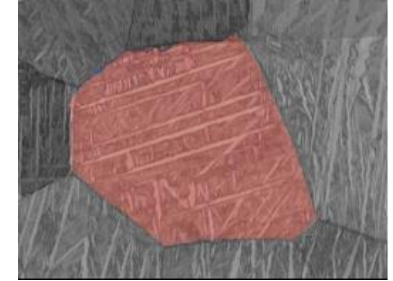
# Figure de pôles, identification des variantes



Relations d'orientation  $\beta//\alpha''$

$\{110\}_\beta // (001)_{\alpha''}$  ●

$\langle 11\bar{1} \rangle_\beta // \langle 110 \rangle_{\alpha''}$  ○



- ✦ Vérification des relations d'orientation
- ✦ Indexation  $\beta$ 
  - 1 orientation déterminée
- ✦ Indexation  $\alpha''$ 
  - 5 variants déterminés
- ✦ Erreur sur la mesure
  - 2° maximum
  - généralement moins de 1°

V1

V2

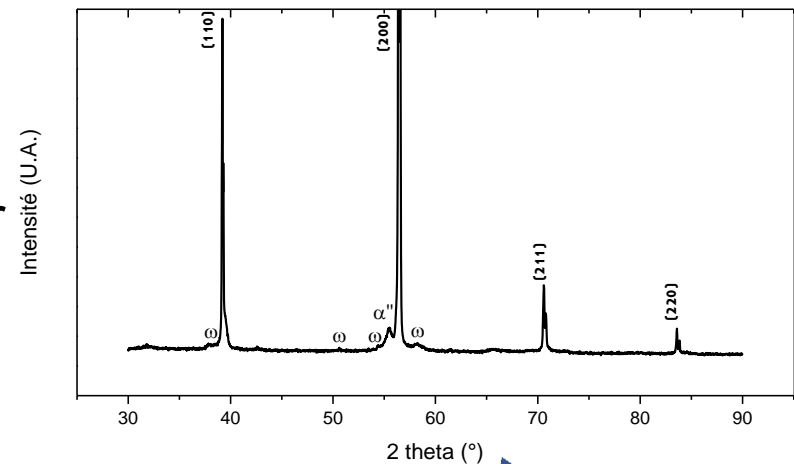
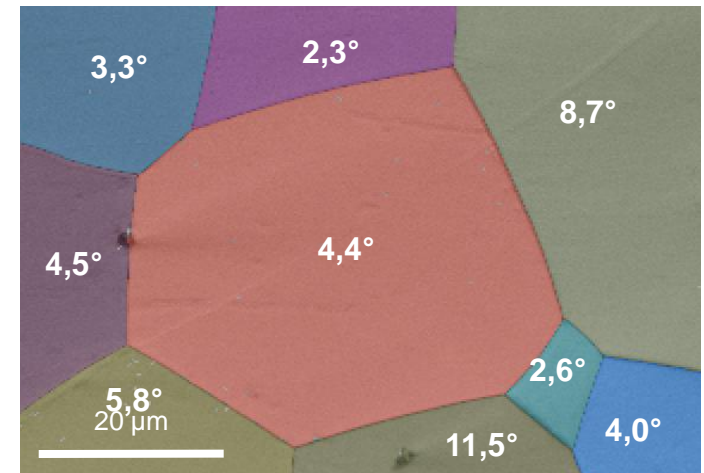
V3

V4

V5

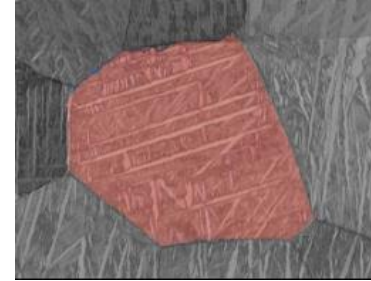
# Validation de la méthode

- ❖ Recuit de 1 min à 300°C et refroidissement à l'air
  - Restauration de la phase  $\beta$
  - Formation de phase  $\omega$  non détectable par EBSD
- ❖ Nouvelle préparation métallographique
  - Comparaison avec orientations  $\beta$  de la cartographie précédente
  - Estimation de l'erreur : 5° en moyenne
- ❖ Validation de la méthode mais l'erreur reste élevée
  - Reconstruction classique :  $\sim 1^\circ$



# Validation de la méthode

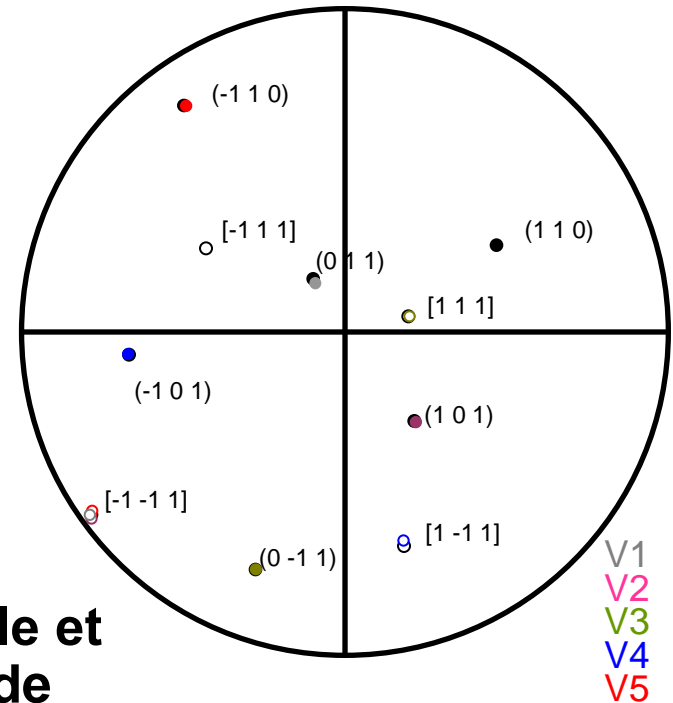
- ❖ Deux sources d'erreur
  - Méthode : indexation directe de la phase  $\beta$
  - Expérimentale : recuit, nouvelle préparation...
- ❖ Application des relations d'orientation aux 5 variants
  - Analogue à une reconstruction classique
  - Erreur de  $1,1^\circ$  en moyenne



Relations d'orientation  $\beta//\alpha''$

$$\{110\}_\beta // (001)_{\alpha''}$$

$$\langle 11\bar{1} \rangle_\beta // \langle 110 \rangle_{\alpha''}$$



**L'erreur est essentiellement expérimentale et comparable aux méthodes classiques de reconstruction**

# Avantages et limites de la technique

---

- ❖ Les premiers résultats paradoxaux (DRX vs. EBSD) sont expliqués
- ❖ Une nouvelle technique simple de reconstruction cristallographique en est déduite
- ❖ La précision de cette reconstruction est analogue à celle obtenue par les techniques classiques
- ❖ Avantages
  - rapide
  - ne nécessitant aucun calcul
  - peut être appliquée même si la microstructure martensitique est trop fine pour être résolue
- ❖ Inconvénients
  - réservée à des transformations simples (un seul chemin pour la transformation martensitique inverse)

# Sommaire

---

## ✦ Généralités

Contexte

Effet superélastique, mémoire de forme

Éléments sur les mécanismes de déformation

Matériau d'étude

## ✦ Technique de reconstruction de phase

Reconstruction de la phase mère par indexation directe des clichés de Kikuchi

## ✦ Identification de mécanismes de déformation

Identification des systèmes de maclage

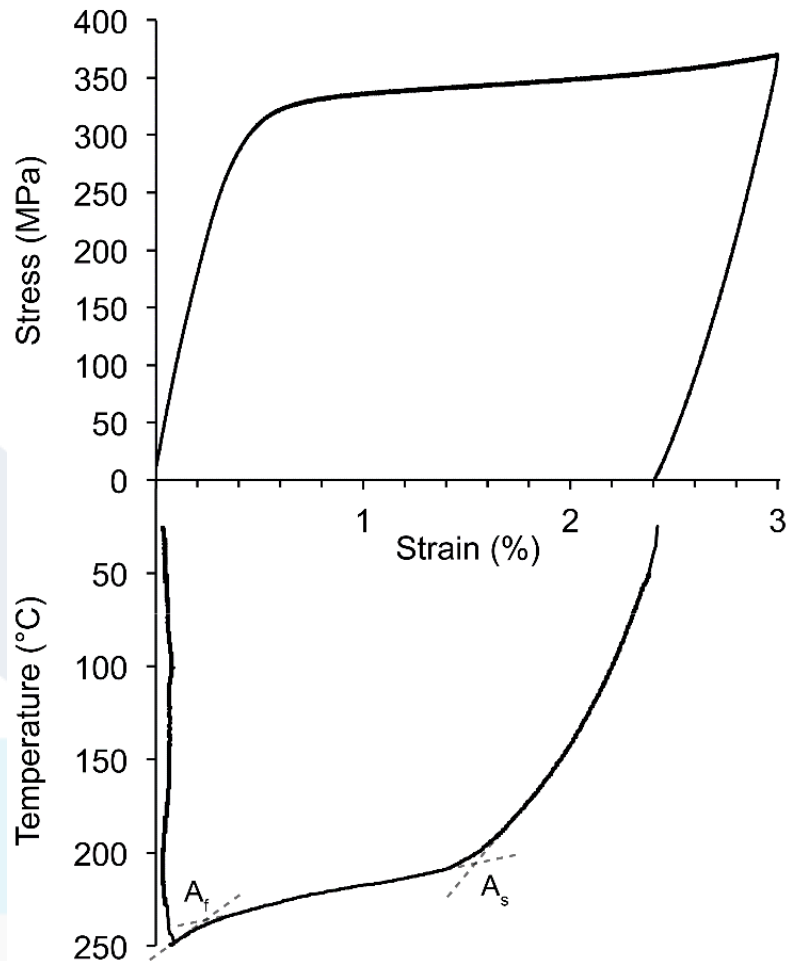
Construction de la séquence de mécanismes de déformation

## ✦ Analogie entre différents systèmes de maclage

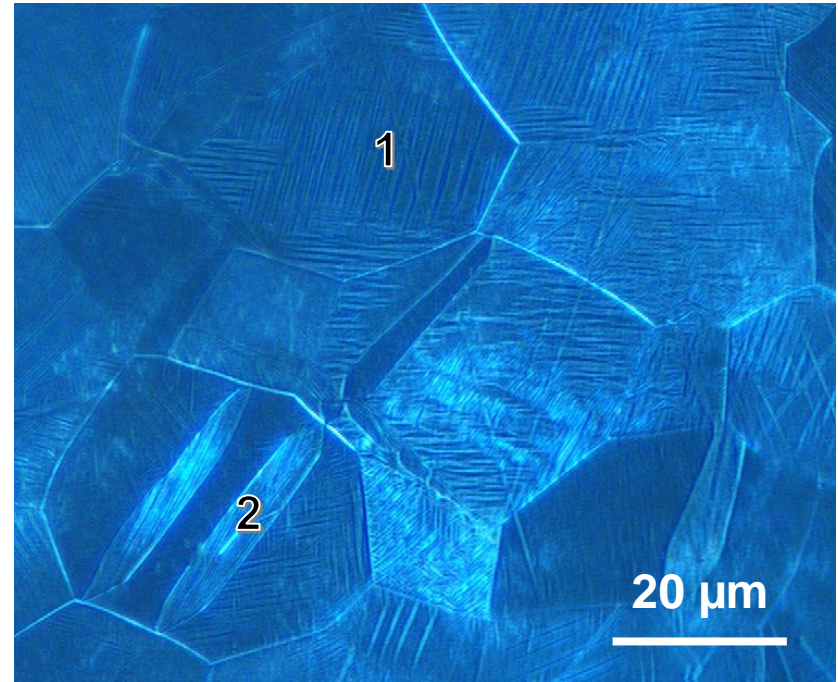
Outils de prédiction des variantes activées

Correspondance entre maclage de la martensite  $\alpha''$  et maclage de la phase  $\beta$

# Application aux microstructures déformées



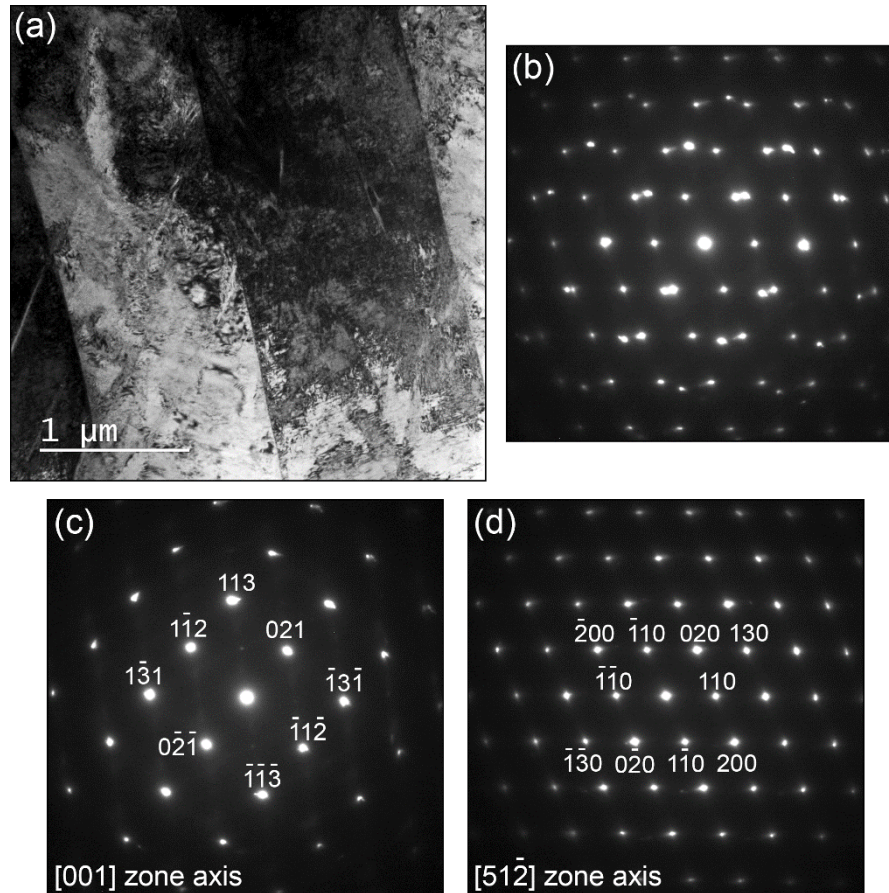
**Effet mémoire de forme  
confirmé**



Ti-25Ta-20Nb déformé en traction ( $\epsilon=6\%$ )

1. **Bandes fines : réorientation de la martensite**
2. **Bandes larges : maclage de la martensite à l'échelle de l'ex-grain  $\beta$  ?**

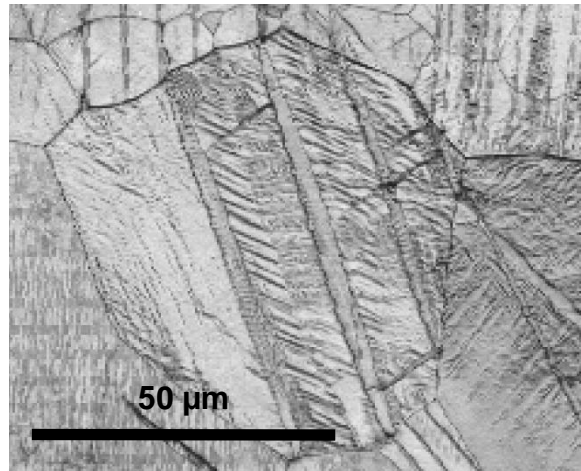
# Microscopie Electronique en Transmission



**Pas de plan commun ni de direction commune**

# Diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD)

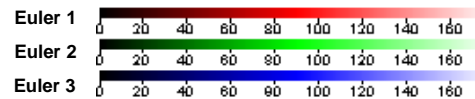
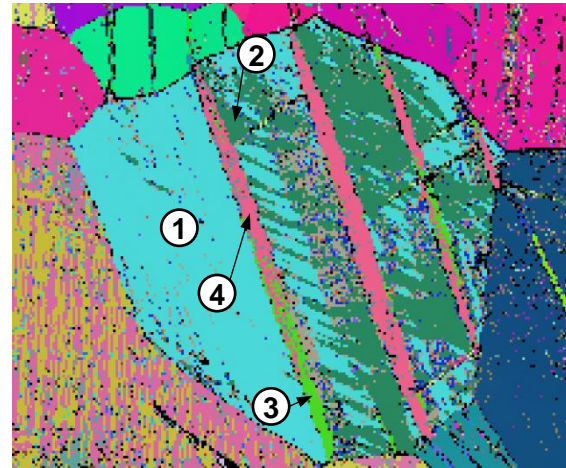
Band Contrast



Orientation des ex-grains  $\beta$   
par indexation directe des  
clichés de Kikuchi par la  
phase  $\beta$

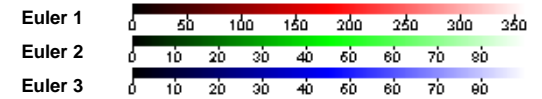
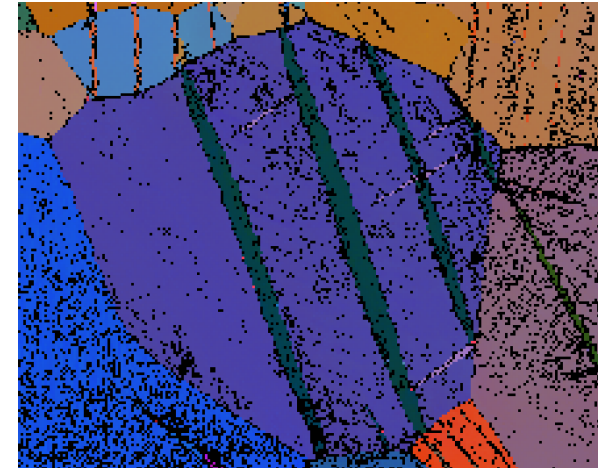
E. Bertrand et al.  
Scr. Mater. 83 (2014) p.41

Indexation par phase  $\alpha''$



Quatre orientations  
principales  
- Deux dans l'ex grain  $\beta$   
- Deux dans les bandes de  
déformation

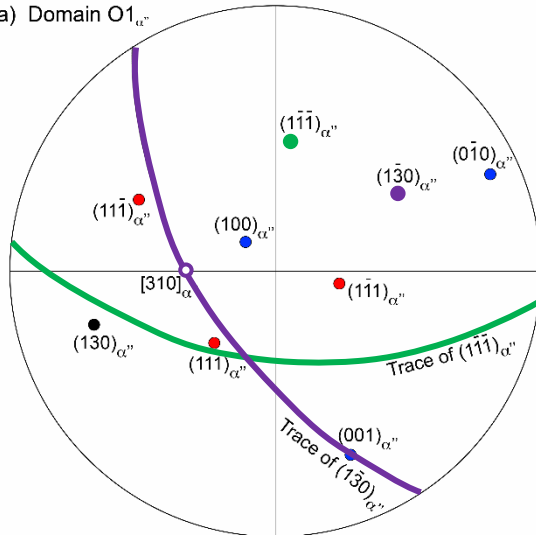
Indexation par phase  $\beta$



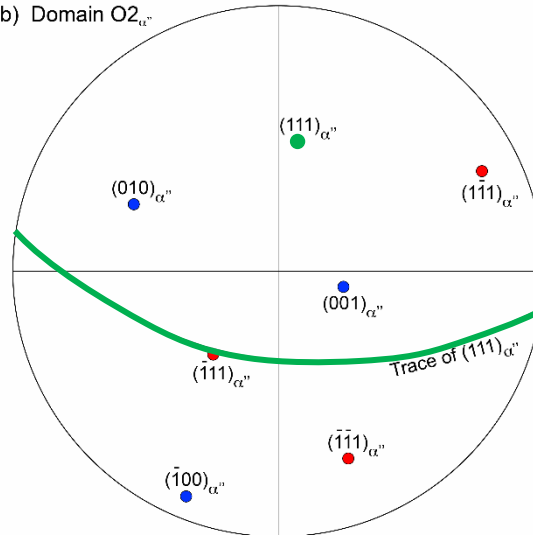
Deux orientations  
- Une pour l'ex-grain  $\beta$   
- Une pour les bandes de  
déformation

# Identification des systèmes de maclage

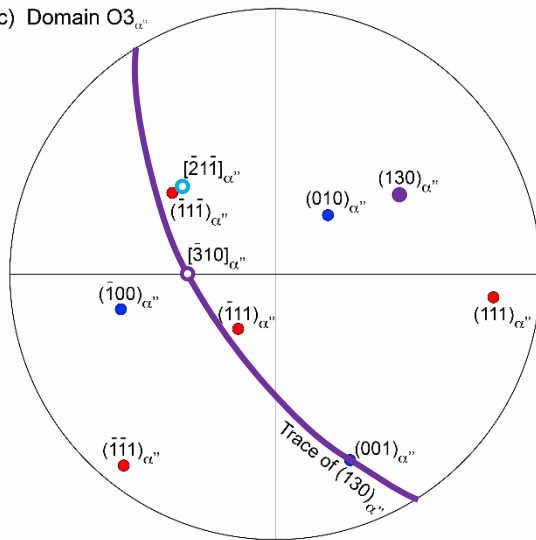
(a) Domain O1<sub>α''</sub>



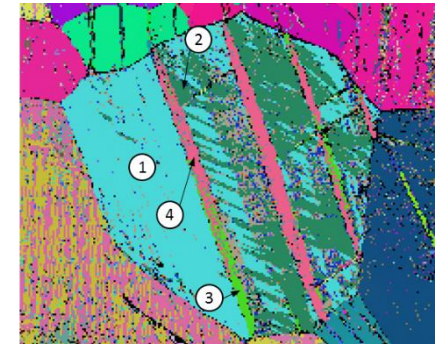
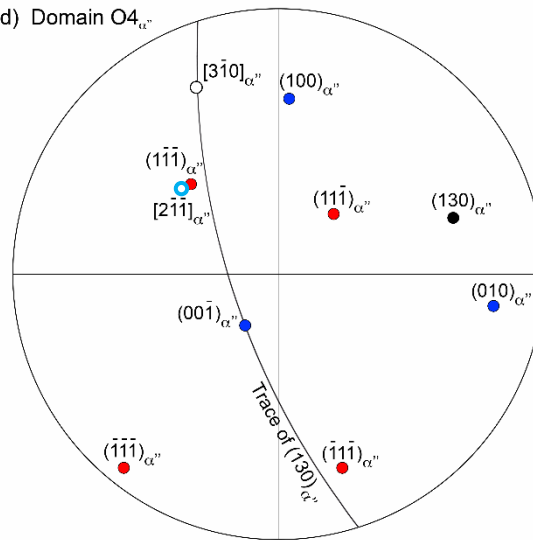
(b) Domain O2<sub>α''</sub>



(c) Domain O3<sub>α''</sub>



(d) Domain O4<sub>α''</sub>



**O1<sub>α''</sub>//O2<sub>α''</sub>**

- {111} commun
- maclage de réorientation de type I

**O1<sub>α''</sub>//O4<sub>α''</sub>**

- pas de relation d'orientation

**O1<sub>α''</sub>//O3<sub>α''</sub>**

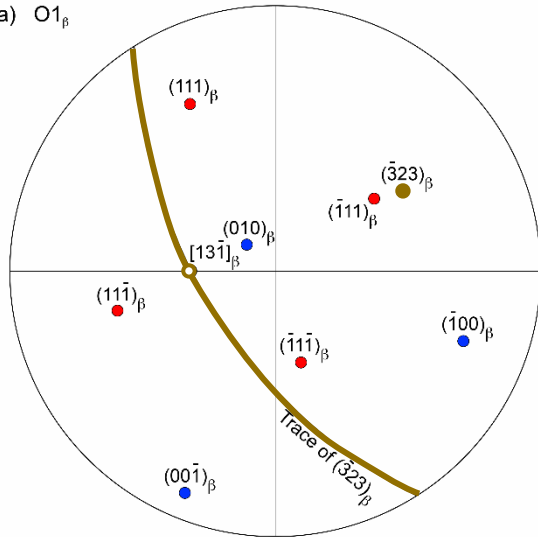
- {130} et <310> communs
- nouveau système de maclage plastique de la martensite α''

**O3<sub>α''</sub>//O4<sub>α''</sub>**

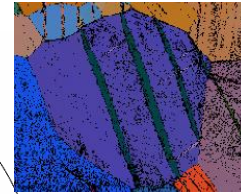
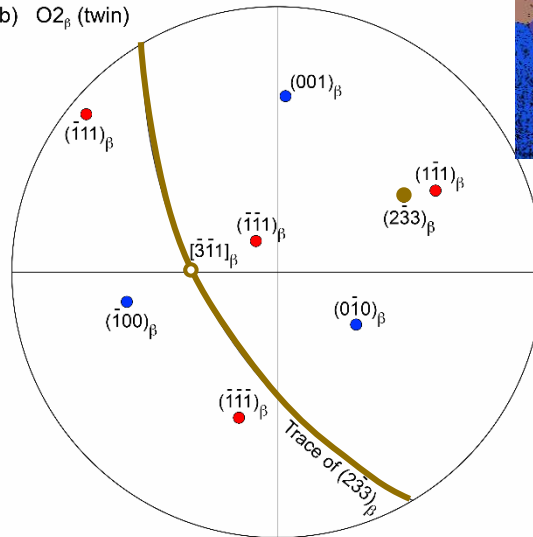
- <211> commun
- maclage de réorientation de type II dans la bande de déformation

# Comparaison avec l'indexation $\beta$

(a)  $O1_\beta$

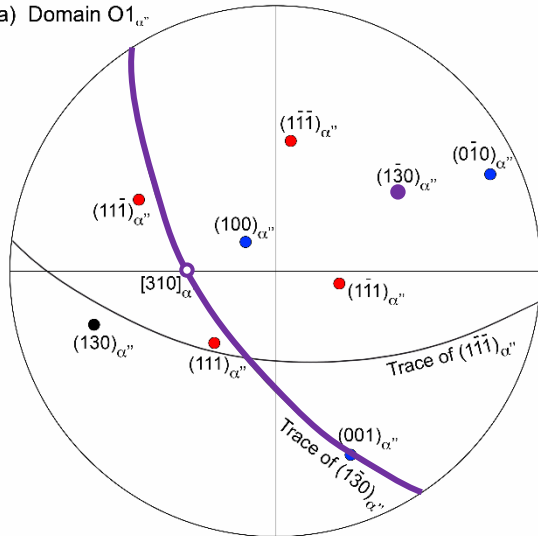


(b)  $O2_\beta$  (twin)

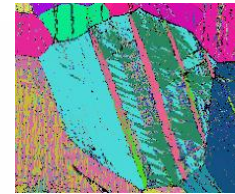
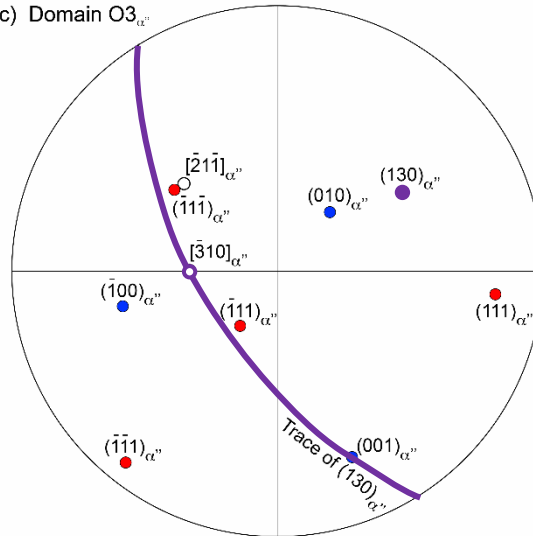


$O1_\beta // O2_\beta$   
 → Système de maillage  $\{332\}\langle 113\rangle$

(a) Domain  $O1_{\alpha''}$



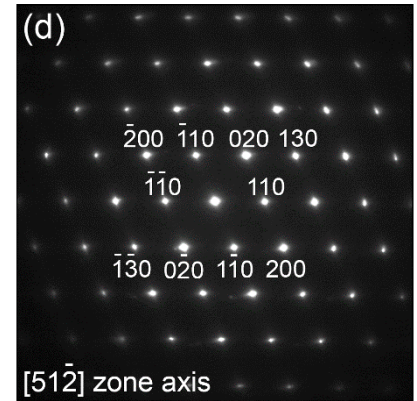
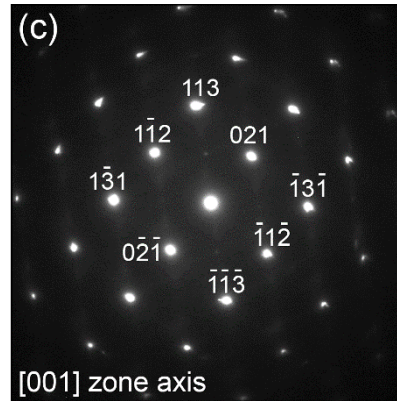
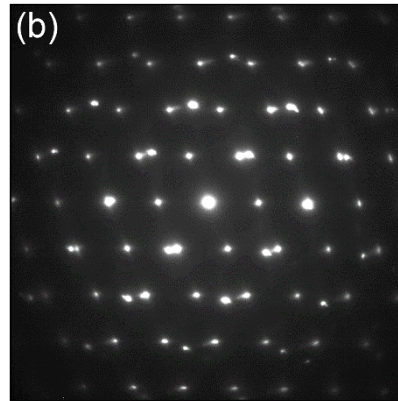
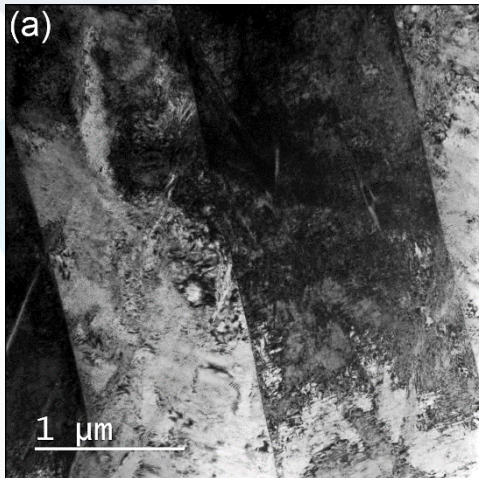
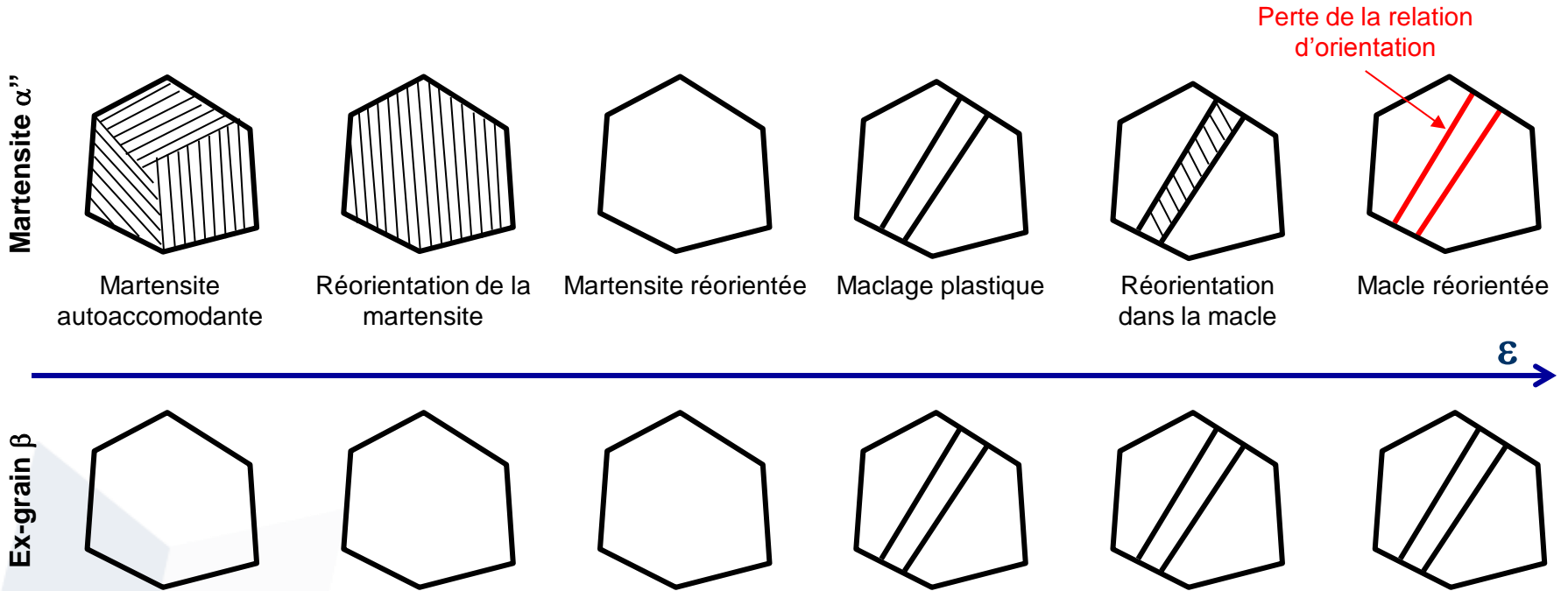
(c) Domain  $O3_{\alpha''}$



$O1_\beta // O2_\beta$  vs.  $O1_{\alpha''} // O3_{\alpha''}$   
 → Correspondance des plans de macle  $\{332\}_\beta$  et  $\{130\}_{\alpha''}$   
 → Correspondance des directions de maillage  $\langle 113\rangle_\beta$  et  $\langle 310\rangle_{\alpha''}$

Analogie entre les systèmes de maillage  $\{332\}\langle 113\rangle_\beta$  et  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$

# Séquence de déformation



Maclage plastique  $\{130\}\langle 310\rangle$  + Maclage de réorientation  $\langle 211\rangle$  (type II)

# Sommaire

---

## ✦ Généralités

Contexte

Effet superélastique, mémoire de forme

Éléments sur les mécanismes de déformation

Matériau d'étude

## ✦ Technique de reconstruction de phase

Reconstruction de la phase mère par indexation directe des clichés de Kikuchi

## ✦ Identification de mécanismes de déformation

Identification des systèmes de maclage

Construction de la séquence de mécanismes de déformation

## ✦ Analogie entre différents systèmes de maclage

Outils de prédiction des variantes activées

Correspondance entre maclage de la martensite  $\alpha''$  et maclage de la phase  $\beta$

# Outils de prédiction de la variante activée

## Maclage de réorientation Plus grande déformation de réseau

Lattice correspondence variants (CVs).

	$[100]_{\alpha'}$	$[010]_{\alpha'}$	$[001]_{\alpha'}$
CV1	$[100]_{\beta}$	$[011]_{\beta}$	$[0\bar{1}1]_{\beta}$
CV2	$[100]_{\beta}$	$[0\bar{1}1]_{\beta}$	$[01\bar{1}]_{\beta}$
CV3	$[010]_{\beta}$	$[101]_{\beta}$	$[10\bar{1}]_{\beta}$
CV4	$[010]_{\beta}$	$[10\bar{1}]_{\beta}$	$[\bar{1}0\bar{1}]_{\beta}$
CV5	$[001]_{\beta}$	$[110]_{\beta}$	$[\bar{1}10]_{\beta}$
CV6	$[001]_{\beta}$	$[\bar{1}10]_{\beta}$	$[\bar{1}\bar{1}0]_{\beta}$

$$\varepsilon^{(1)} = \begin{pmatrix} \eta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta_2 + \eta_3}{2} & \frac{\eta_2 - \eta_3}{2} \\ 0 & \frac{\eta_2 - \eta_3}{2} & \frac{\eta_2 + \eta_3}{2} \end{pmatrix}$$

$$\eta_1 = \frac{a_{\alpha'} - a_{\beta}}{a_{\beta}}$$

$$\eta_2 = \frac{b_{\alpha'} - a_{\beta}}{a_{\beta}}$$

$$\eta_3 = \frac{c_{\alpha'} - a_{\beta}}{a_{\beta}}$$

Calcul de la plus grande déformation selon l'axe de traction

### Alliages superélastiques

- Prédiction de la variante de martensite induite sous contrainte

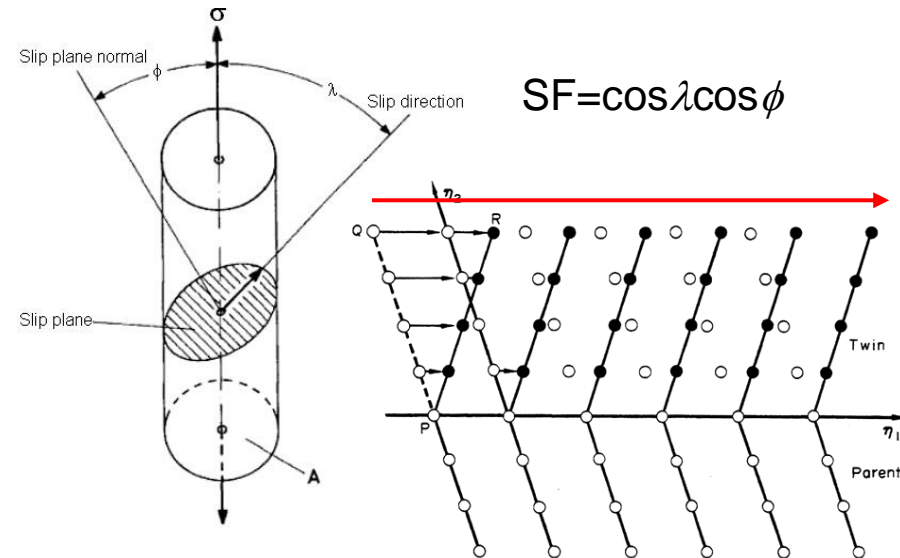
H.Y. Kim et al. Acta. Mater., 54 (2006) p. 423

### Alliages à mémoire de forme

- Prédiction de la variante majoritaire après réorientation

H. Tobe et al. J. Alloys Compd., 577S (2013) p. S435

## Maclage plastique Facteur de Schmid



Facteur géométrique maximisant le cisaillement dû à la traction

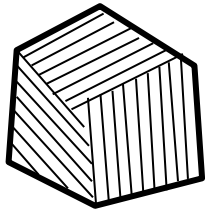
### Alliages superélastiques

- Nécessite une adaptation au maclage (SF entre -0,5 et +0,5)
- Permet de prédire la variante de maclage activée

E. Bertrand et al. Scr. Mater., 64 (2011) p. 1110

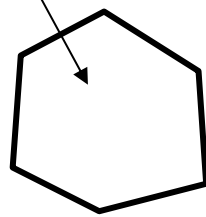
# Application à la séquence de déformation

Martensite  $\alpha''$



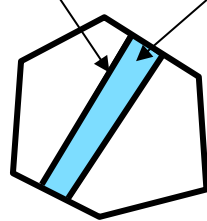
Martensite autoaccommodante

CVmax



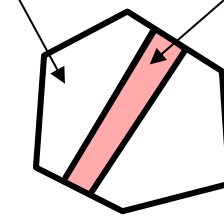
Martensite réorientée  
- La variante formée est donne la plus grande déformation (CVmax)

SFmax $\alpha''$  CV



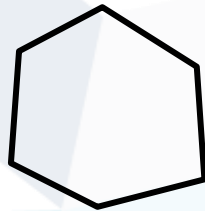
Maillage plastique  
- Le système de maillage a le plus grand SF $\alpha''$   
- La macle plastique n'est pas une CVmax

CVmax CVmax

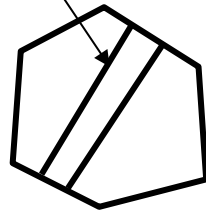


Macle réorientée  
- Après réorientation, la macle plastique est une CVmax

Ex-grain  $\beta$



SFmax $\beta$



Maillage plastique  
- Le système de maillage a le plus grand SF $\beta$

**Le maillage de réorientation est prédit par la plus grande déformation de réseau**  
**Le maillage plastique obéit à la loi de Schmid avec la martensite  $\alpha''$  mais aussi avec la phase  $\beta$**

Twinning elements of each variant used for Schmid factor analysis for  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$  and  $\{332\}\langle 113\rangle_{\beta}$  twinning systems.

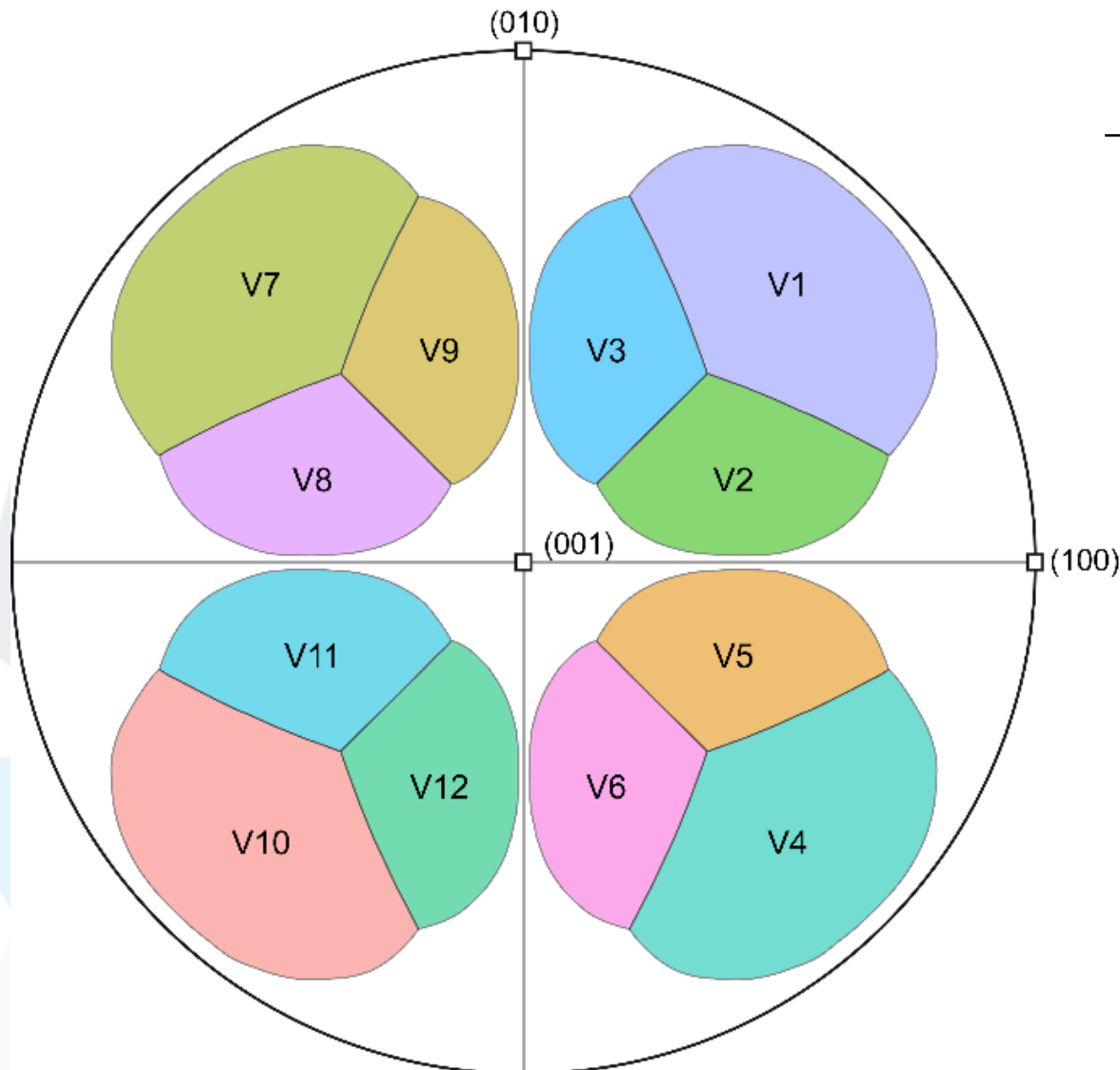
Variant	$K_1$	$\eta_1$	$K_2$	$\eta_2$
V1 $\alpha''$	$\begin{pmatrix} 130 \\ -130 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 310 \\ 310 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 110 \\ -110 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 110 \\ 110 \end{pmatrix}$
V2 $\alpha''$	$\begin{pmatrix} 130 \\ -130 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 310 \\ 310 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 110 \\ -110 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 110 \\ 110 \end{pmatrix}$
V1 $\beta$	$\begin{pmatrix} 332 \\ -332 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 113 \\ 113 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 112 \\ -112 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V2 $\beta$	$\begin{pmatrix} 323 \\ -323 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 131 \\ 131 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 121 \\ -121 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V3 $\beta$	$\begin{pmatrix} 233 \\ -233 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 311 \\ 311 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 211 \\ -211 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V4 $\beta$	$\begin{pmatrix} 332 \\ -332 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 113 \\ 113 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 112 \\ -112 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V5 $\beta$	$\begin{pmatrix} 323 \\ -323 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 131 \\ 131 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 121 \\ -121 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V6 $\beta$	$\begin{pmatrix} 233 \\ -233 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 311 \\ 311 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 211 \\ -211 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V7 $\beta$	$\begin{pmatrix} 332 \\ -332 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 113 \\ 113 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 112 \\ -112 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V8 $\beta$	$\begin{pmatrix} 323 \\ -323 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 131 \\ 131 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 121 \\ -121 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V9 $\beta$	$\begin{pmatrix} 233 \\ -233 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 311 \\ 311 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 211 \\ -211 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V10 $\beta$	$\begin{pmatrix} 332 \\ -332 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 113 \\ 113 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 112 \\ -112 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V11 $\beta$	$\begin{pmatrix} 323 \\ -323 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 131 \\ 131 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 121 \\ -121 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$
V12 $\beta$	$\begin{pmatrix} 233 \\ -233 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 311 \\ 311 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 211 \\ -211 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 111 \\ 111 \end{pmatrix}$

2 variantes  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$

12 variantes  $\{332\}\langle 113\rangle_{\beta}$

**Il y a toujours un système  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$  correspondant au système  $\{332\}\langle 113\rangle_{\beta}$  de plus haut SF**

# Figures inverses de pôles



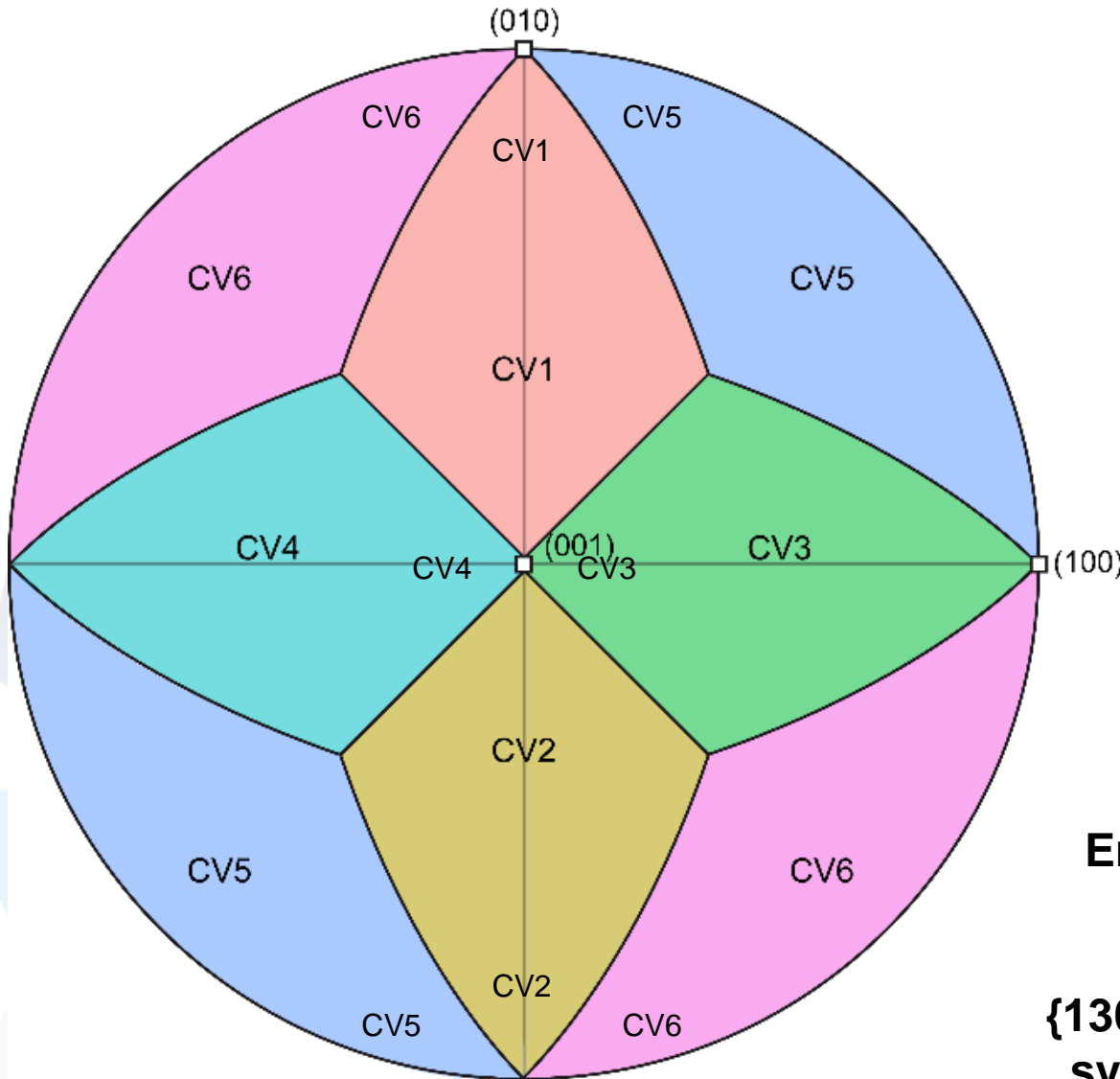
$\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$ variant	CV and $\{130\}\langle 310 \rangle_{\alpha'}$ variant
V1 <sub>β</sub>	CV5 – V2 <sub>α''</sub>
V2 <sub>β</sub>	CV3 – V2 <sub>α''</sub>
V3 <sub>β</sub>	CV1 – V1 <sub>α''</sub>
V4 <sub>β</sub>	CV6 – V1 <sub>α''</sub>
V5 <sub>β</sub>	CV3 – V1 <sub>α''</sub>
V6 <sub>β</sub>	CV2 – V2 <sub>α''</sub>
V7 <sub>β</sub>	CV6 – V2 <sub>α''</sub>
V8 <sub>β</sub>	CV4 – V1 <sub>α''</sub>
V9 <sub>β</sub>	CV1 – V2 <sub>α''</sub>
V10 <sub>β</sub>	CV5 – V1 <sub>α''</sub>
V11 <sub>β</sub>	CV4 – V2 <sub>α''</sub>
V12 <sub>β</sub>	CV2 – V1 <sub>α''</sub>

**L'activation d'une « variante  $\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$  » est la combinaison de :**

- La présence d'une variante de réorientation  $\alpha''$  particulière (CV)
- L'activation du système d'une variante de maillage  $\{130\}\langle 310 \rangle$

Domaines d'activation de la variante de plus haut  $SF_{\beta}$  ( $SF > 0,4$ ) en fonction de la direction de traction

# Figures inverses de pôles

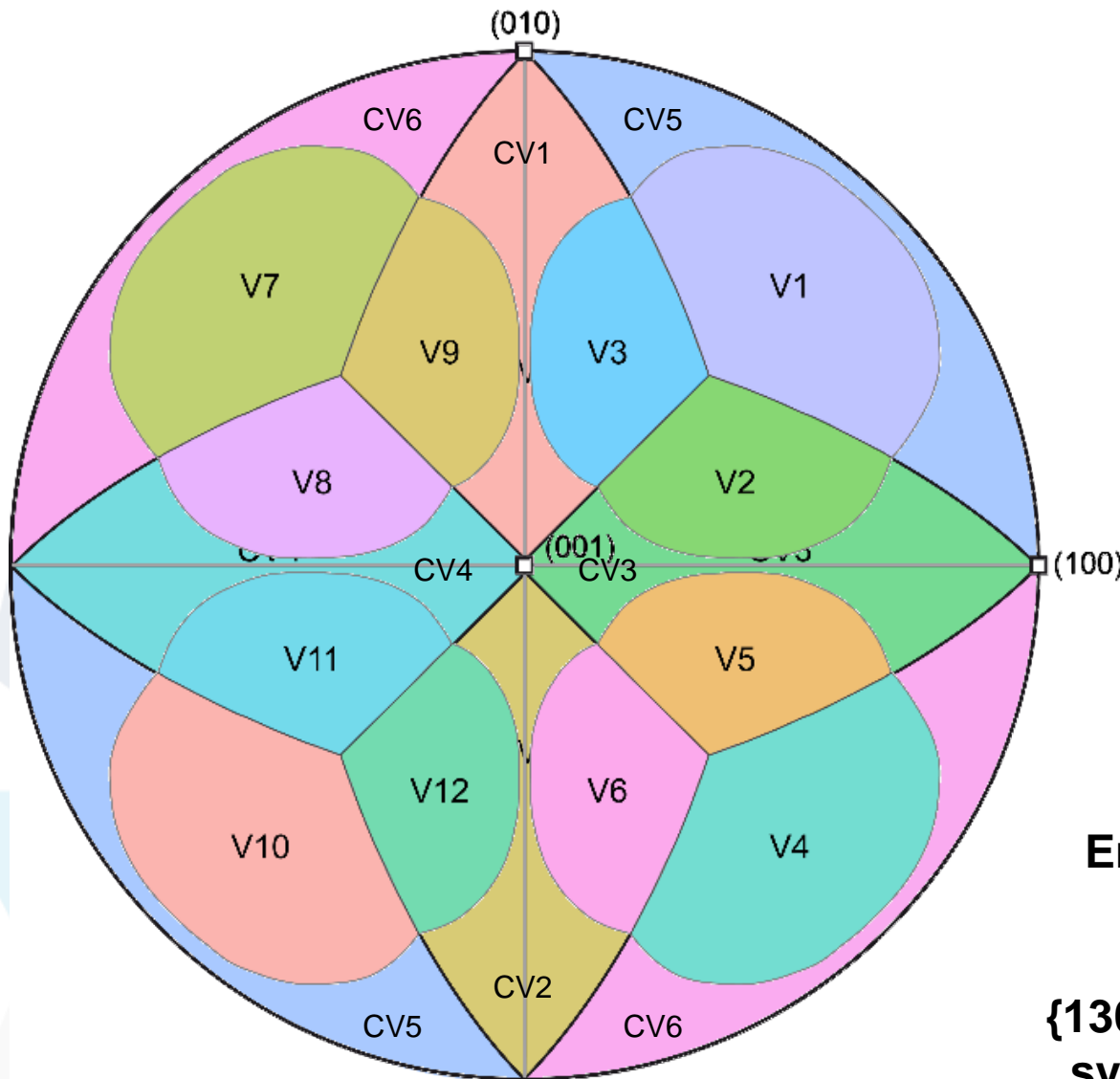


$\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$ variant	CV and $\{130\}\langle 310 \rangle_{\alpha'}$ variant
V1 <sub>β</sub>	CV5 – V2 <sub>α'</sub>
V2 <sub>β</sub>	CV3 – V2 <sub>α'</sub>
V3 <sub>β</sub>	CV1 – V1 <sub>α'</sub>
V4 <sub>β</sub>	CV6 – V1 <sub>α'</sub>
V5 <sub>β</sub>	CV3 – V1 <sub>α'</sub>
V6 <sub>β</sub>	CV2 – V2 <sub>α'</sub>
V7 <sub>β</sub>	CV6 – V2 <sub>α'</sub>
V8 <sub>β</sub>	CV4 – V1 <sub>α'</sub>
V9 <sub>β</sub>	CV1 – V2 <sub>α'</sub>
V10 <sub>β</sub>	CV5 – V1 <sub>α'</sub>
V11 <sub>β</sub>	CV4 – V2 <sub>α'</sub>
V12 <sub>β</sub>	CV2 – V1 <sub>α'</sub>

Domaines d'existence des variantes de martensite après réorientation en fonction de la direction de traction

**En traction, la réorientation favorise une variante permettant du maclage  $\{130\}\langle 310 \rangle_{\alpha'}$  correspondant au système  $\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$  de plus haut SF**

# Figures inverses de pôles



$\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$ variant	CV and $\{130\}\langle 310 \rangle_{\alpha'}$ variant
V1 <sub>β</sub>	CV5 – V2 <sub>α'</sub>
V2 <sub>β</sub>	CV3 – V2 <sub>α'</sub>
V3 <sub>β</sub>	CV1 – V1 <sub>α'</sub>
V4 <sub>β</sub>	CV6 – V1 <sub>α'</sub>
V5 <sub>β</sub>	CV3 – V1 <sub>α'</sub>
V6 <sub>β</sub>	CV2 – V2 <sub>α'</sub>
V7 <sub>β</sub>	CV6 – V2 <sub>α'</sub>
V8 <sub>β</sub>	CV4 – V1 <sub>α'</sub>
V9 <sub>β</sub>	CV1 – V2 <sub>α'</sub>
V10 <sub>β</sub>	CV5 – V1 <sub>α'</sub>
V11 <sub>β</sub>	CV4 – V2 <sub>α'</sub>
V12 <sub>β</sub>	CV2 – V1 <sub>α'</sub>

Domaines d'existence des variantes de martensite après réorientation en fonction de la direction de traction

**En traction, la réorientation favorise une variante permettant du maclage  $\{130\}\langle 310 \rangle_{\alpha'}$  correspondant au système  $\{332\}\langle 113 \rangle_{\beta}$  de plus haut SF**

# Conclusion

- Le nouveau système de maclage plastique  $\{130\}\langle 310\rangle$  a été identifié dans la martensite  $\alpha''$
- Une séquence de mécanismes de déformation est proposée pour les alliages de titane à mémoire de forme
  - réorientation de la martensite
  - maclage plastique
  - réorientation de la macle
- L'activation des mécanismes de déformation est expliquée par
  - la plus grande déformation de réseau (réorientation)
  - la loi de Schmid (maclage plastique)
- Une analogie est mise en évidence entre le maclage  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$  et le maclage spécifique des  $\beta$ -métastables  $\{332\}\langle 113\rangle_{\beta}$ 
  - AMF:  $\{332\}\langle 113\rangle_{\beta} \leftrightarrow$  sélection de CV +  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$



Contents lists available at ScienceDirect

Acta Materialia

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/actamat](http://www.elsevier.com/locate/actamat)



Full length article

Deformation twinning in the full- $\alpha''$  martensitic Ti–25Ta–20Nb shape memory alloy



Emmanuel Bertrand <sup>a,\*</sup>, Philippe Castany <sup>b</sup>, Yang Yang <sup>b</sup>, Edern Menou <sup>a</sup>, Thierry Gloriant <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), Université de Nantes, CNRS, Rue Christian Pauc, BP 50609, 44306 Nantes Cedex 3, France

<sup>b</sup> INSA Rennes, Institut des Sciences Chimiques de Rennes (ISCR CNRS 6226), 20 Avenue des Buttes de Coësmes, F-35708 Rennes Cedex 7, France

## ARTICLE INFO

*Article history:*  
Received 19 October 2015  
Received in revised form 1 December 2015  
Accepted 2 December 2015  
Available online xxx

*Keywords:*  
EBSD  
Twinning  
 $\alpha''$  martensite  
Titanium  
Shape memory alloy

## ABSTRACT

Deformation twinning of the Ti–25Ta–20Nb (mass%) shape memory alloy is characterized using EBSD and TEM. The selfaccommodating  $\alpha''$  microstructure is shown to be first deformed using  $\{111\}_{\alpha''}$  type I and  $\langle 211\rangle_{\alpha''}$  type II reorientation twinning. Plastic deformation occurs further by plastic twinning with a new  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$  twinning system. Maximum lattice deformation calculation is a relevant parameter to predict the variant of martensite that is favored during the reorientation process. Conversely, Schmid factor analysis can be used to predict the selection of  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$  twinning variants during deformation. Analogy between  $\{130\}\langle 310\rangle_{\alpha''}$  and  $\{332\}\langle 113\rangle_{\beta}$  twinning systems is highlighted.

© 2015 Acta Materialia Inc. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Merci pour votre attention !

Avez-vous des questions ?

