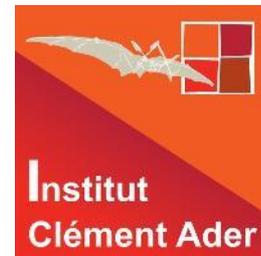




INSTITUT  
Mines-Télécom

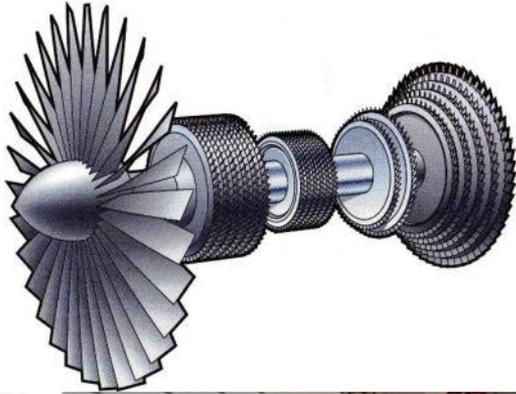
# Influence de la précipitation de taille nanométrique sur le compromis résistance mécanique - ténacité d'aciers à très haute performance



Denis Delagnes (Mines Albi/ICAA)

31 Mars 2016

## Aciers à très haute résistance



**SNECMA Turbine Shaft in ML340,  
UTS = 2300 MPa**



**Pièce de train d'atterrissage,  
UTS = 1800 Mpa  
Ténacité > 70-80 MPam<sup>1/2</sup>**

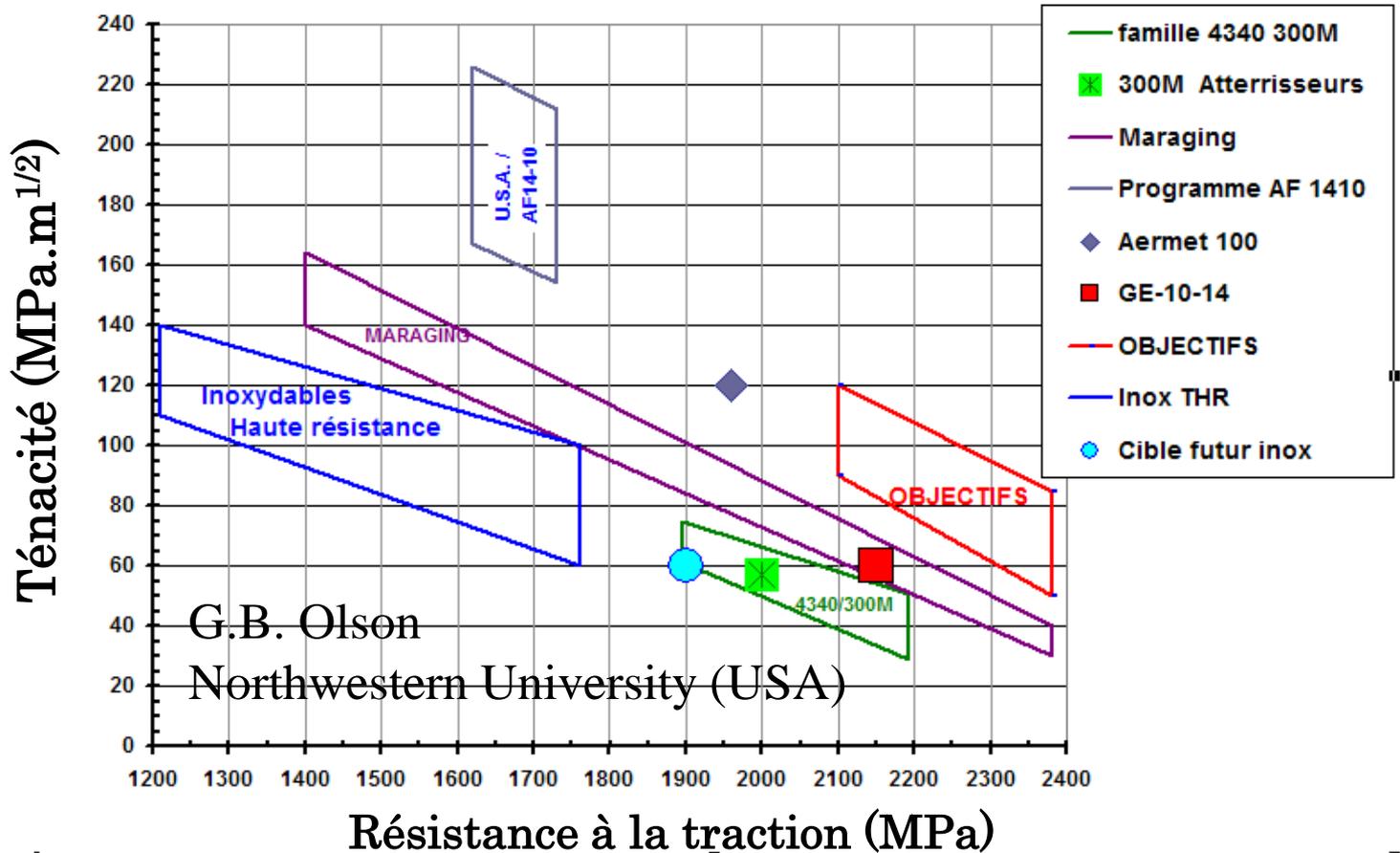
% mas.	C	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Fe
	0,2	2,5	1,4	14,0	0,9	10,0	Base

## Aciers à double précipitation : $\beta$ -NiAl + $M_2C$

Objectifs  
ambitieux

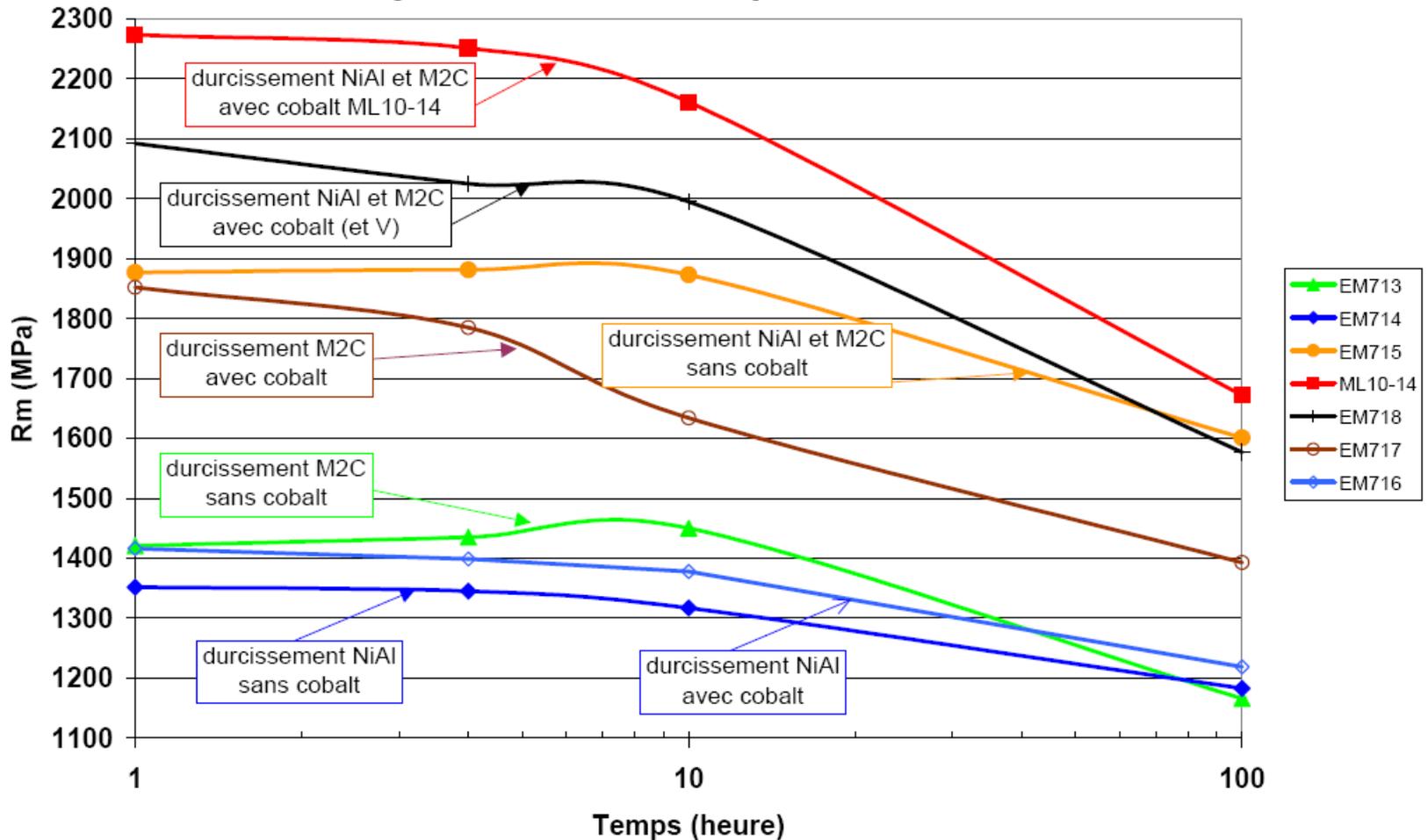
$R_m \sim 2300\text{MPa}$

$K_{Ic} > 70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

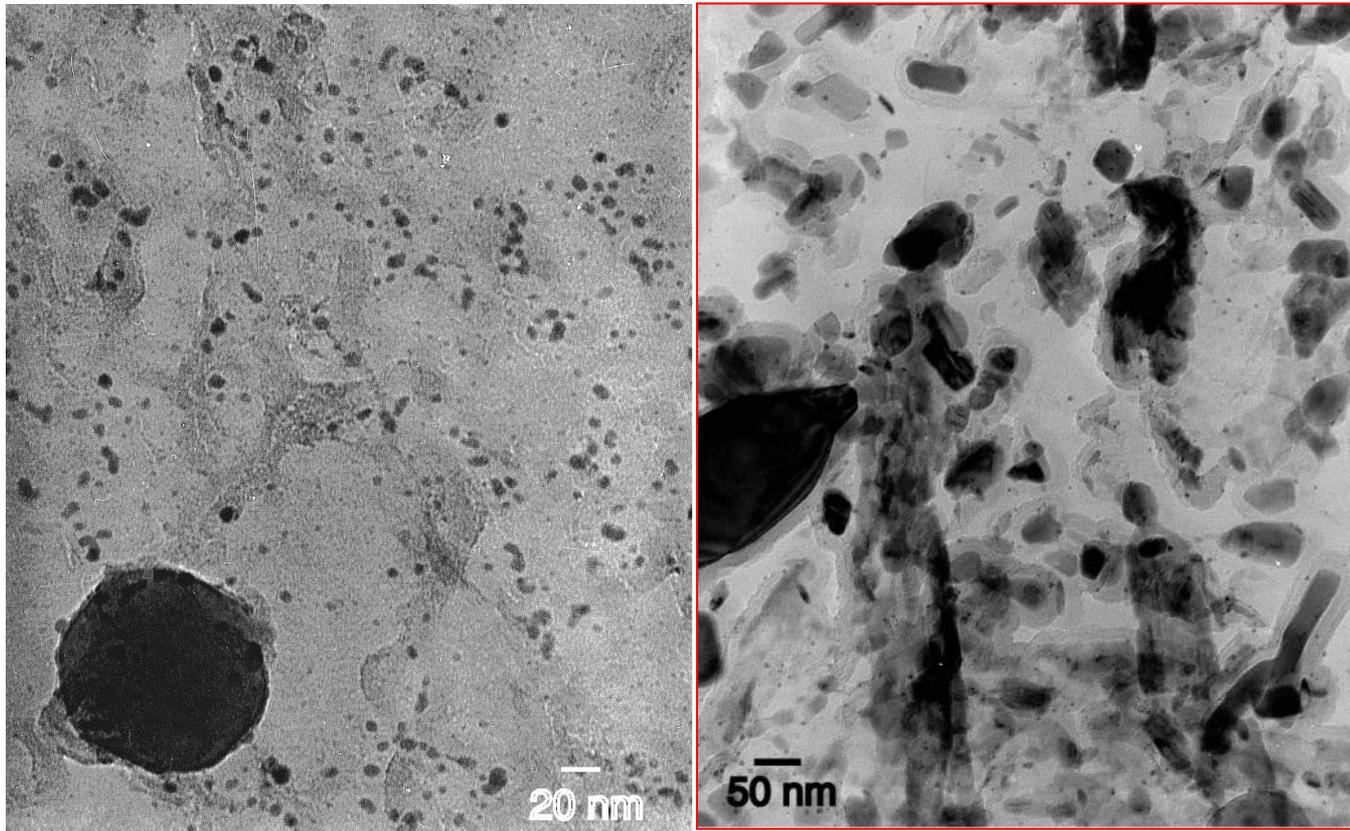


# Effets de la composition chimique initiale sur la résistance mécanique

Figure 1 – Evolution du Rm avec le temps de vieillissement à 500°C



# Distribution de la population de carbures en microscopie en transmission!!!



2 populations + répartition hétérogène

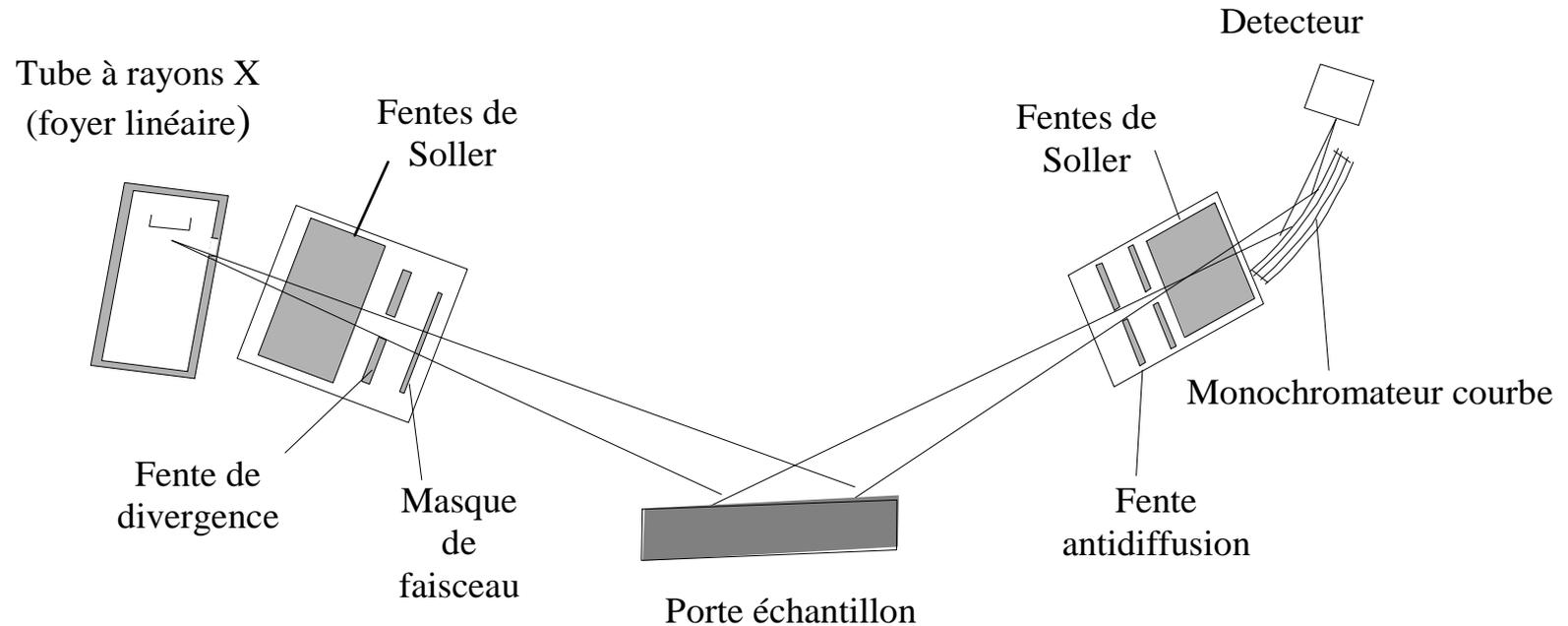
## Ténacité ??

- ⇒ **Comprendre les mécanismes mis en jeu au traitement thermique**
- Quantifier les éléments microstructuraux responsables des propriétés mécaniques requises**
- ⇒ **Se donner les bons outils pour caractériser la microstructure à une échelle pertinente**
- ⇒ **Donner des voies pour modifier les compromis actuels**

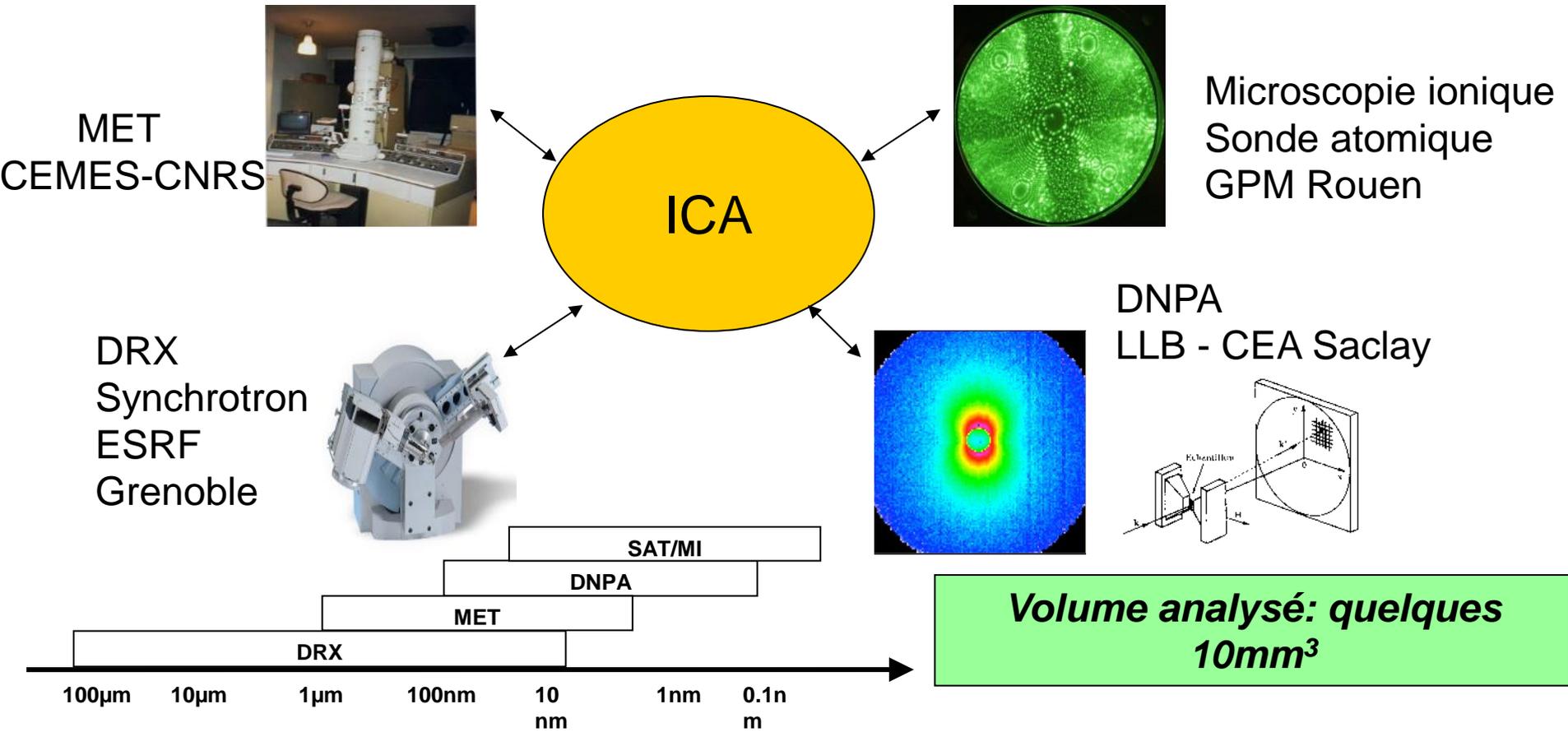
# Caractérisation microstructurale multi-échelles

## Développement interne : Méthode de dissolution sélective

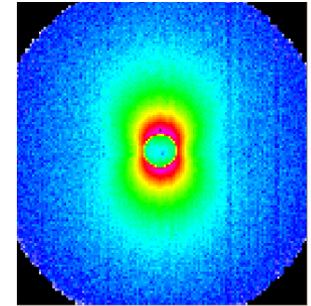
Extraction des précipités de la matrice / attaque chimique + centrifugation



# Caractérisation microstructurale multi-échelles



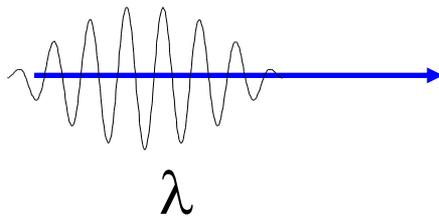
# Diffusion de Neutrons aux Petits Angles



Faisceau incident

Vecteur d'onde

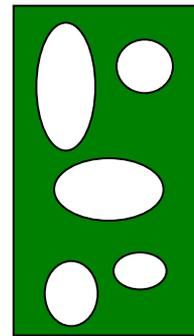
$$\|\vec{k}_i\| = 2\pi/\lambda$$



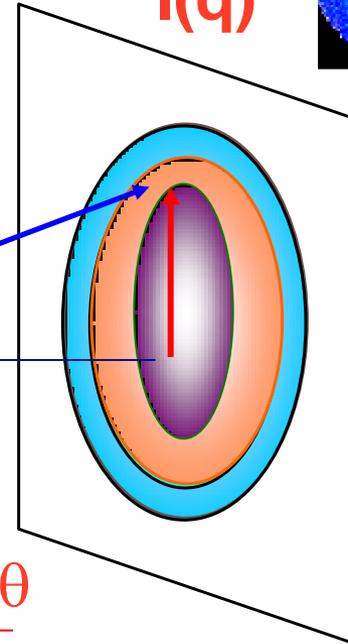
Rayons-X, lumière, neutrons

Faisceau diffusé

$$\|\vec{k}_s\| = 2\pi/\lambda$$



$\theta$

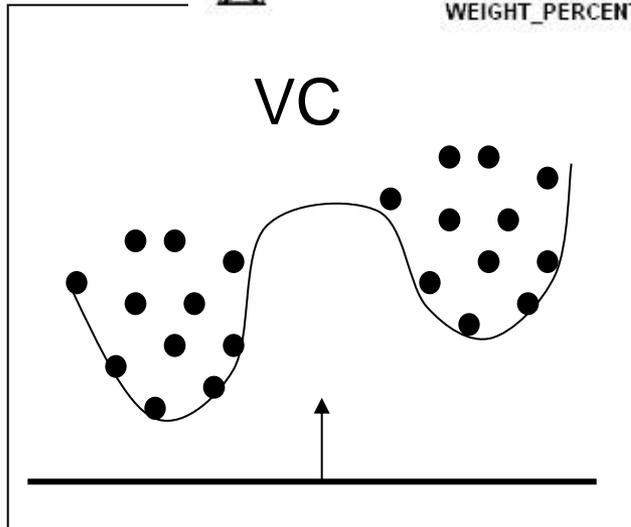
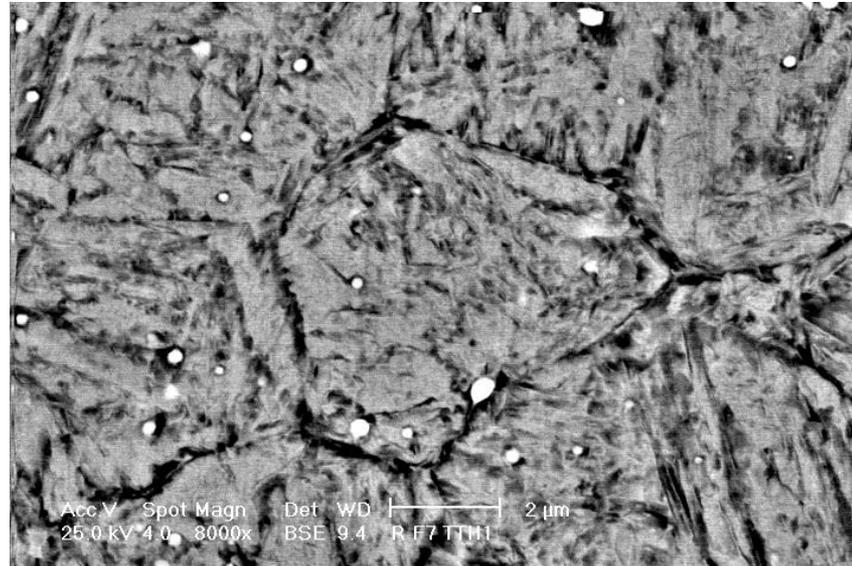
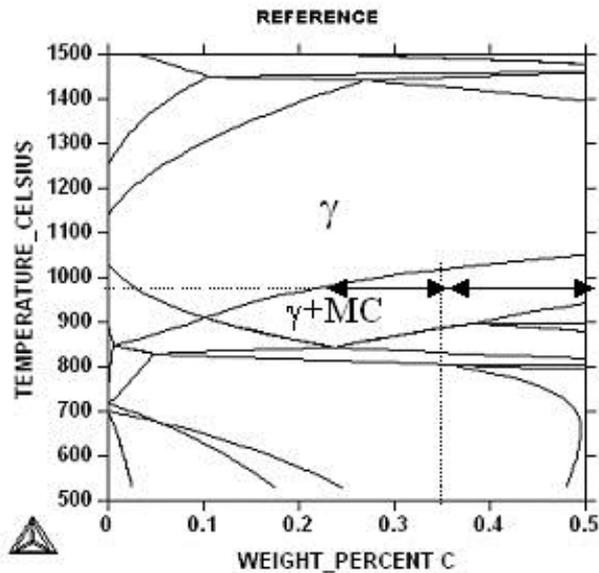


$$\vec{k}_s = \vec{k}_i + \vec{q}$$

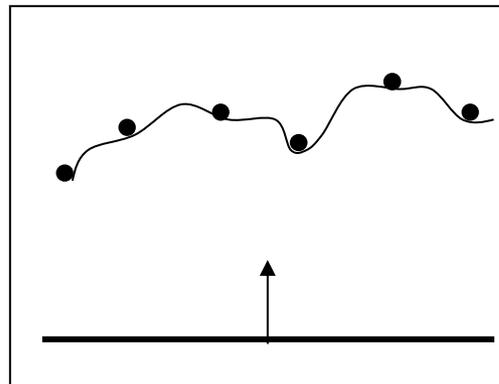
$$\|\vec{q}\| = \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda}$$

**$I(\vec{q})$**   $\equiv$  **taille, forme, densité, répartition, nature**

# Compromis résistance-ténacité : Remise en solution du vanadium dans la phase austénitique



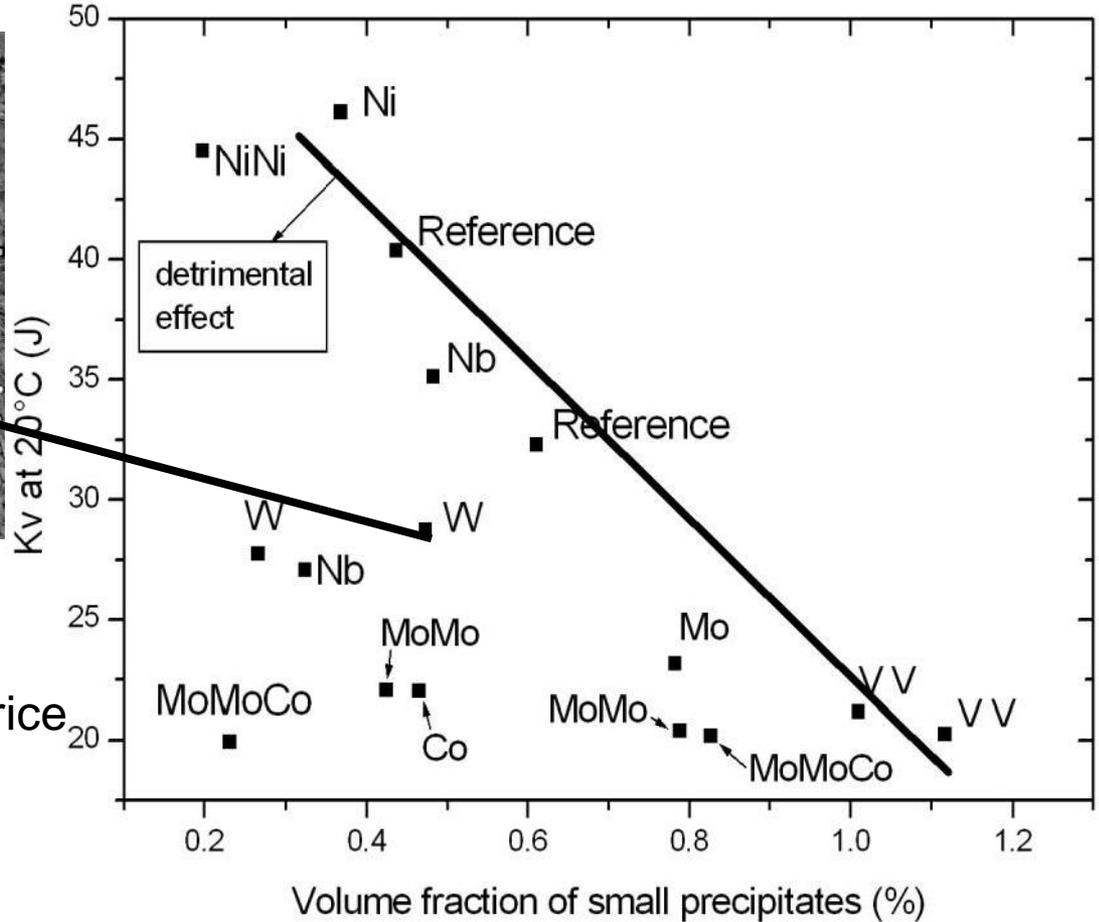
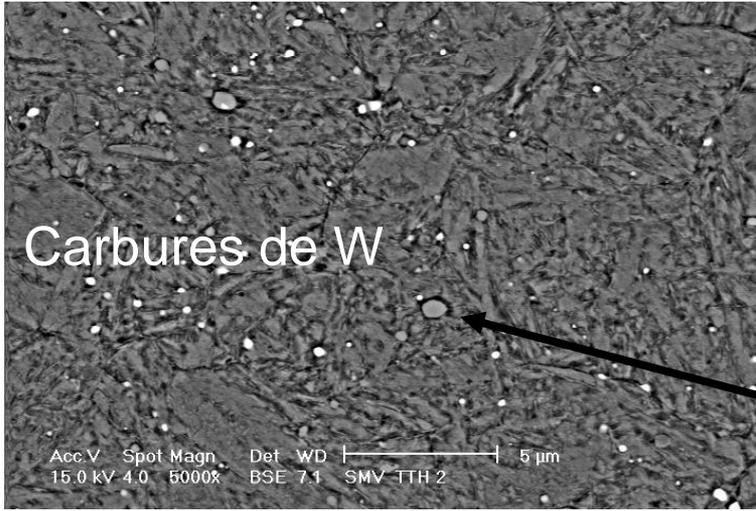
≠



$$D_V^\gamma = 3,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$l = \sqrt{2Dt} \cong 1 \mu\text{m}$$

# Relations précipitation-résilience

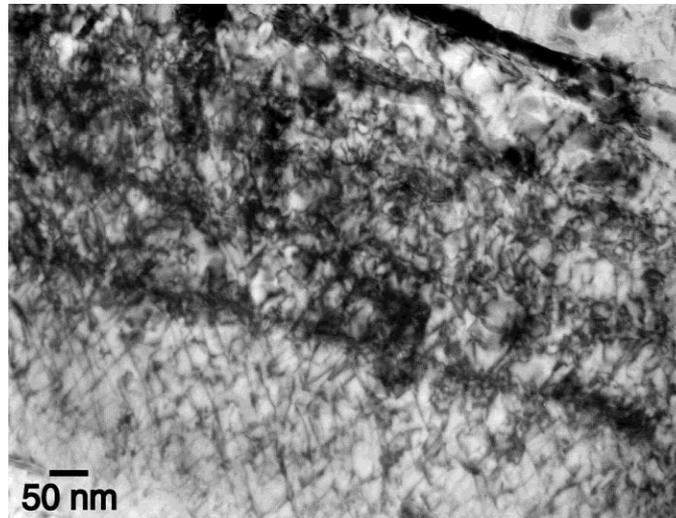


Hétérogénéités de distribution des particules durcissantes dans la matrice

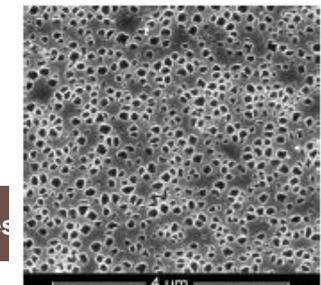
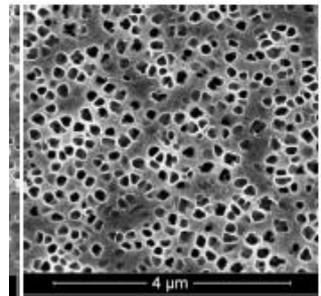
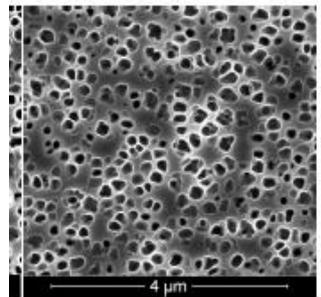
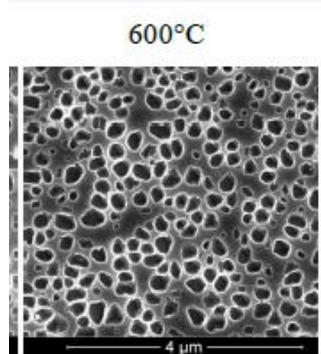
## Les causes de la distribution hétérogène des particules

⇒ Une solubilité en éléments d'alliage différente aux différentes températures..notamment aux températures modérées !!!!!

⇒ La structure de dislocations issues de la trempe



⇒ Les joints de grains, de lattes..

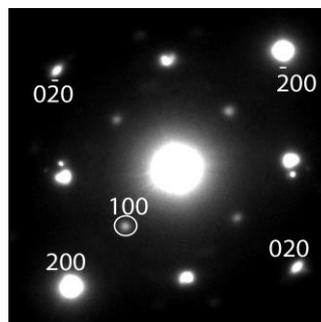


## Les remèdes : le cheval de Troie



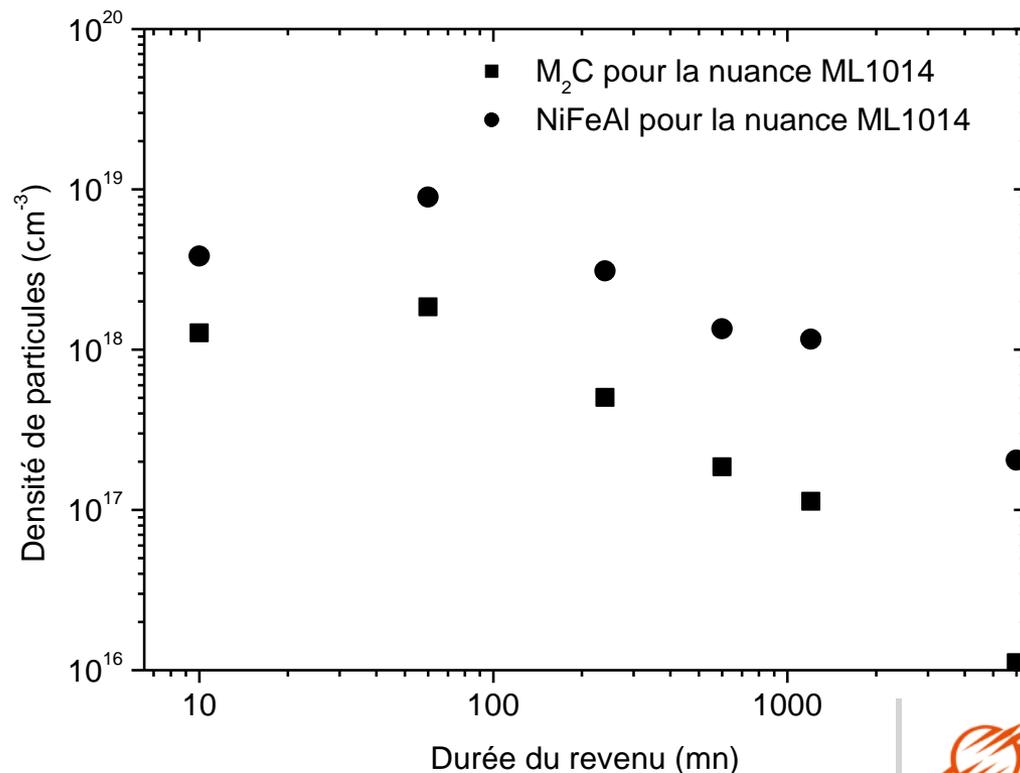
NiAl cohérent avec la matrice

Résistance mécanique limitée à 1300-1400MPa pour une mono-précipitation



$M_2C$  partiellement cohérent

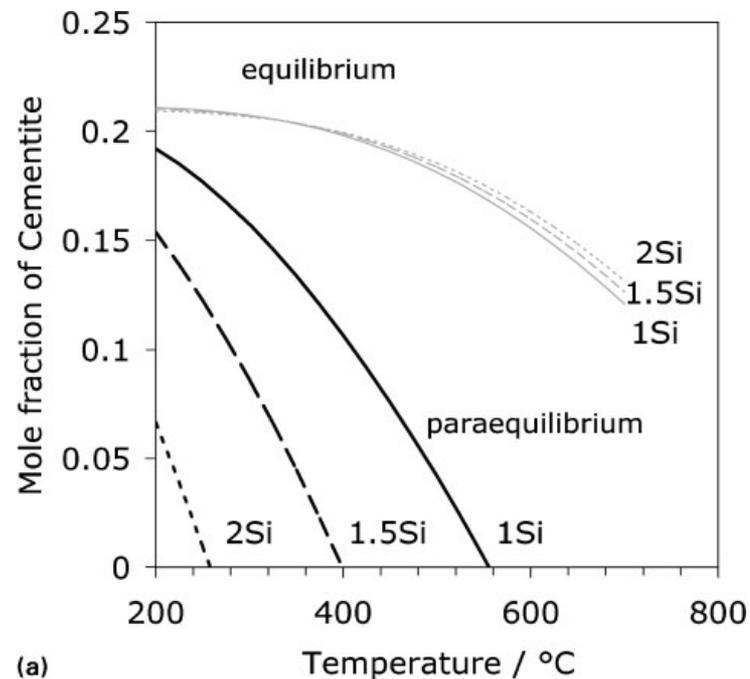
Résistance mécanique bien plus élevée que 1300 MPa



## Les remèdes : le court-circuit de précipitation

Introduire les éléments d'alliage qui décalent la cinétique de précipitation

Silicium, Aluminium  $\Rightarrow$  rejet à l'interface ralentit la diffusion  
carbure de fer instable

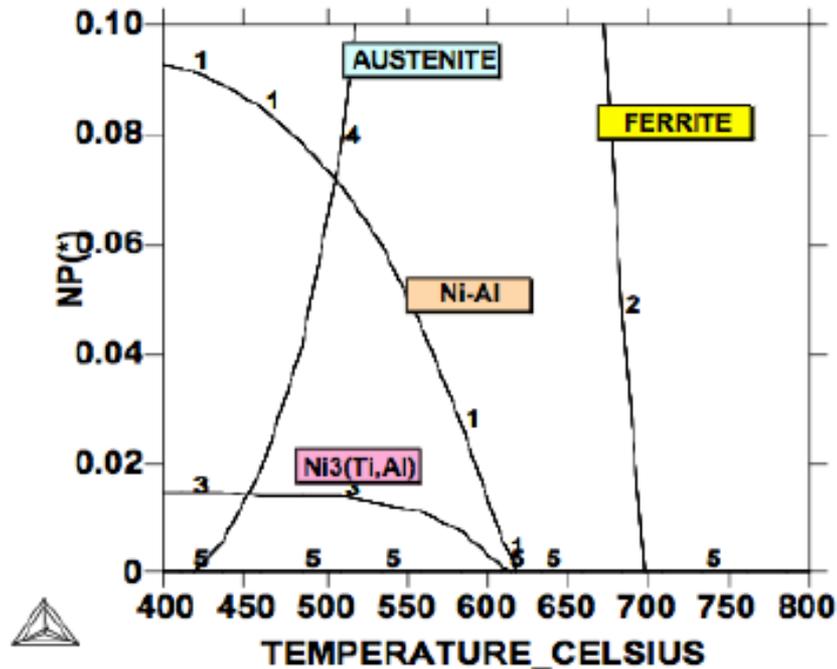


Bhadeshia

Les remèdes :

Les soins avant la mise en service (redonner une microstructure adaptée)

➤ Calcul thermodynamique indique l'instabilité de la phase NiAl



Germination au refroidissement après revenu=très néfaste pour la ténacité

Refroidissement très rapide ou bien revenu multiple

## CONCLUSION

JOURNEES ANNUELLES SF2M  
JA 2016  
25 - 27 Octobre 2016, à Albi

1<sup>ère</sup> annonce

« Matériaux pour le domaine  
aérospatial :  
de l'innovation dans l'air »



Albi

École des Mines d'Albi-Carmaux

Appel à communications :  
propositions avant le 4 mai 2016.

<http://sf2m.fr/JA2016>

Secrétariat :

SF2M, 28 rue Saint Dominique, 75007 PARIS

Tel : +33(0)1 46 33 08 00

Mail : [secretaariat@sf2m.fr](mailto:secretaariat@sf2m.fr)

