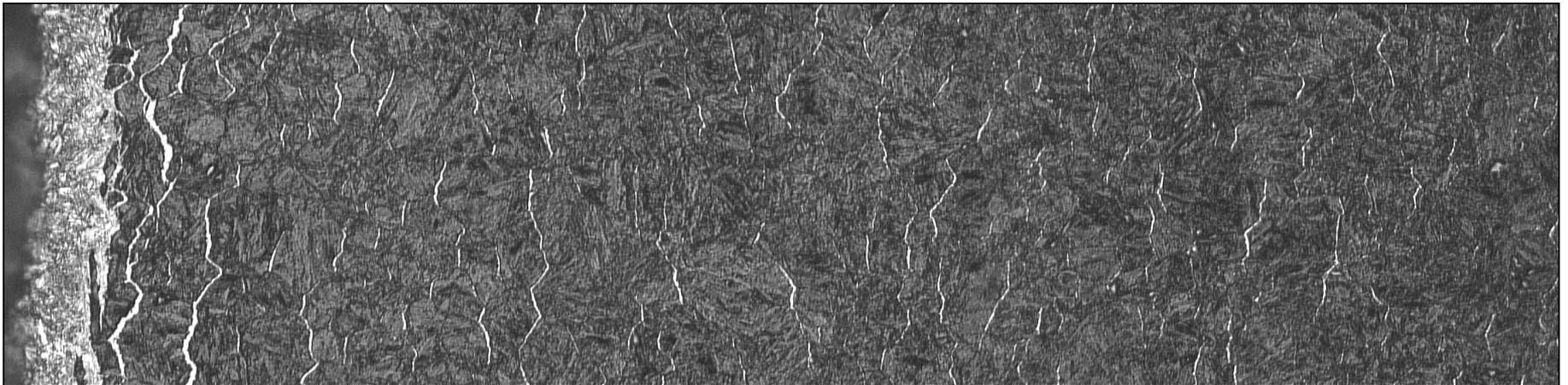


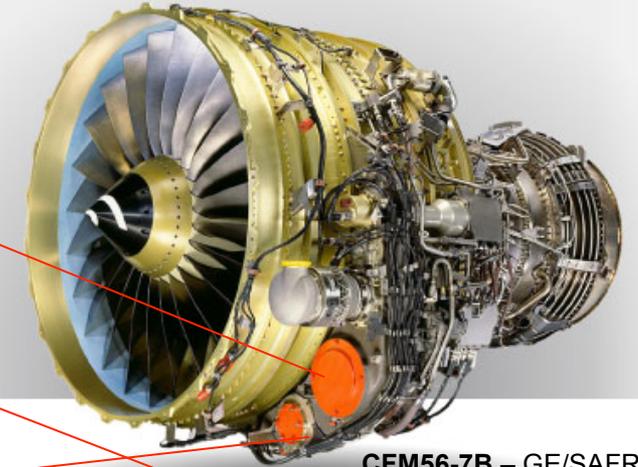
## Nitruration

Génération des contraintes et fatigue



Microstructure d'une couche nitrurée

## Ensemble mécanique de transmission de puissance



**CFM56-7B** – GE/SAFRAN  
1,6mx2,5m – 2600kg – 140kN  
B737...

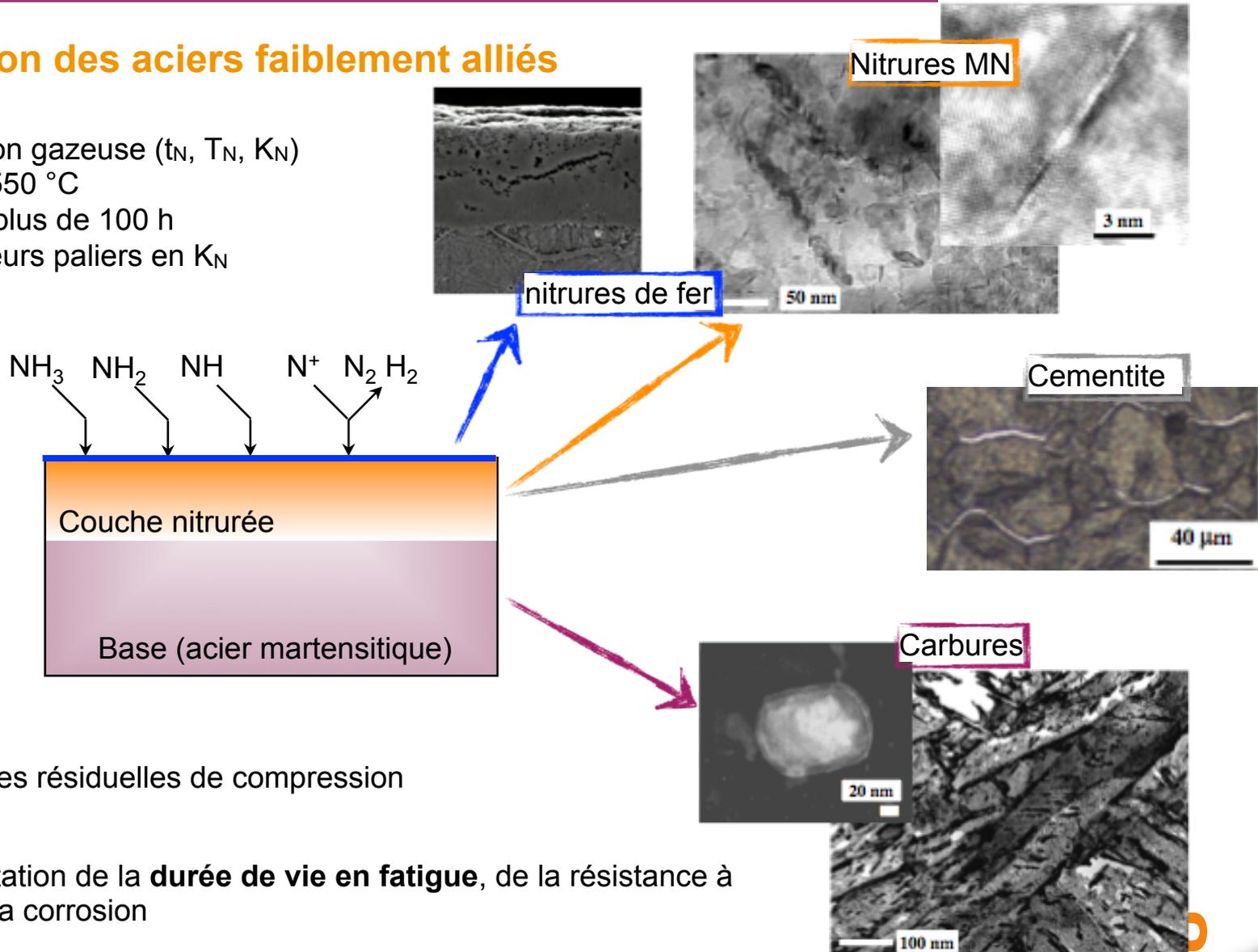
Forte sollicitation mécanique :

- Pression de contact supérieure à 1000 MPa.
  - Frottements importants et récurrents.
- ⇒ fatigue superficielle (pitting), usure,...



### Nitruration des aciers faiblement alliés

- Nitruration gazeuse ( $t_N$ ,  $T_N$ ,  $K_N$ )
- $T_N = 450$  à  $550$  °C
- $t_N$  de 10h à plus de 100 h
- Un ou plusieurs paliers en  $K_N$

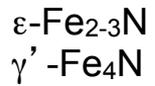


- ☉ Dureté
- ☉ Contraintes résiduelles de compression

⇒ Augmentation de la **durée de vie en fatigue**, de la résistance à l'usure et à la corrosion

### Nitruration : rappel

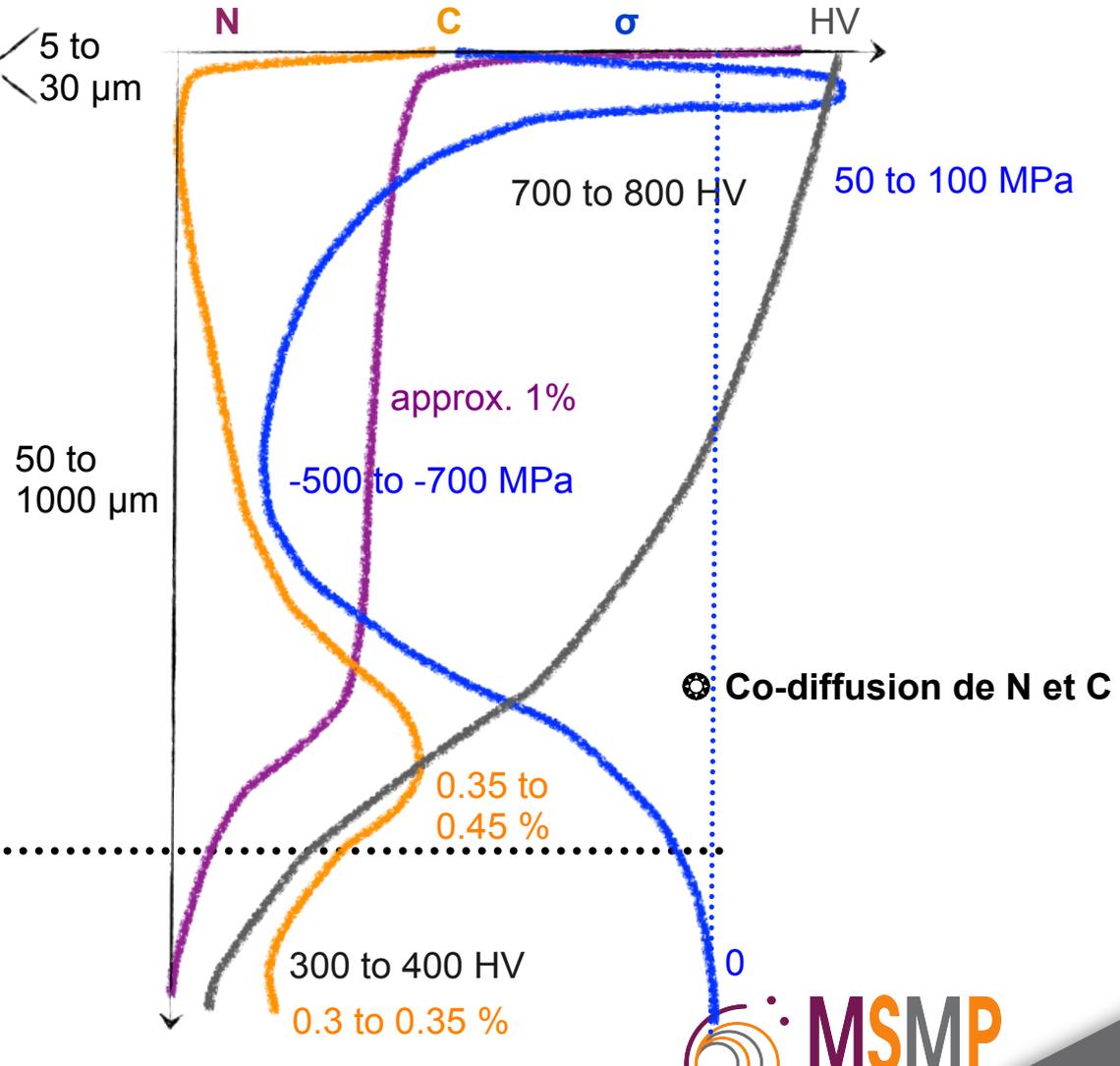
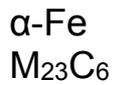
Couche de combinaison



Couche de diffusion



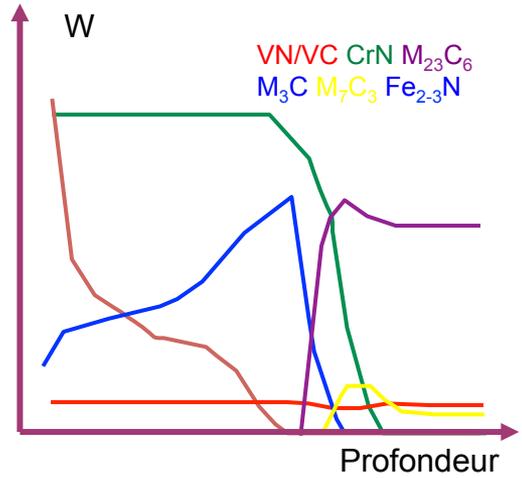
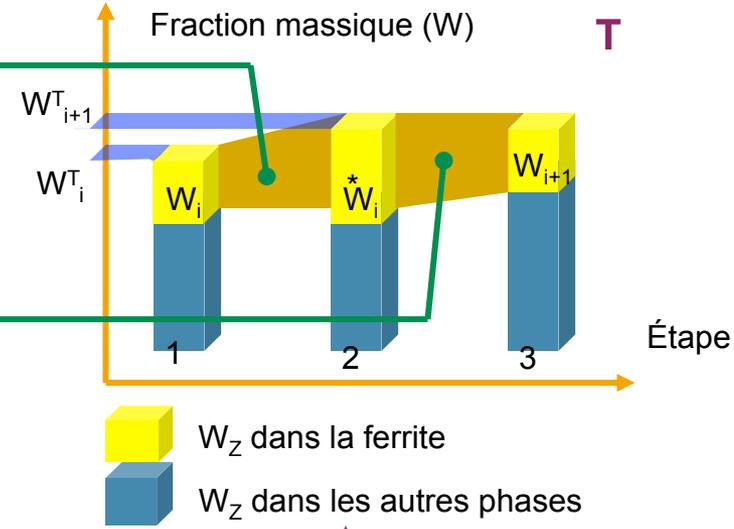
Matériau de base



### Nitruration : diffusion / précipitation

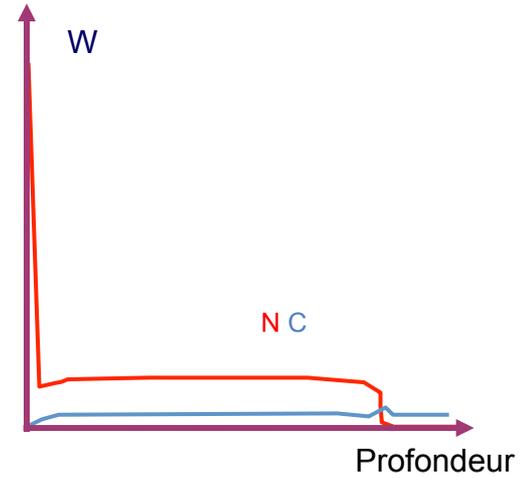
Équation de la diffusion :  
 longue distance  
 Azote et carbone  
 Coefficients de diffusion effectifs  
 Conditions aux limites : flux entrant  
 Aspect mécanique?

Logiciel thermodynamique :  
 courte distance  
 Composition du matériau  
 Équilibre thermodynamique ?



Observation /  
 modélisation

Distribution de tailles



Utilisation d'un code thermodynamique (Thermo-calc®, ...)

## Nituration : diffusion, mise en équation

- Equation de la diffusion pour l'azote (N) et le carbone (C)

$$\frac{\partial c_N}{\partial t} = \nabla \cdot (D_N \nabla c_N)$$

$$\frac{\partial c_C}{\partial t} = \nabla \cdot (D_C \nabla c_C)$$

Avec:

- $c_N, c_C$  concentrations (potentiels chimiques) dans la **matrice ferritique**
- $D_C, D_N$  coefficients fonctions des concentrations

- Conditions initiales ( $t=0$ )

- $C_N=0$
- $C_C=C_C$  (dans la ferrite du matériau de base)

- Conditions aux limites

- $C_N^{\text{coeur}}=0, C_C^{\text{coeur}}=C_C^{\text{ferrite}}$
- $C_N^{\text{surface}}=C_{N0}^{\text{surface}}, C_C^{\text{surface}}=C_{C0}^{\text{surface}}$
- $J_N^{\text{surface}}=J_{N0}^{\text{surface}}, J_C^{\text{surface}}=J_{C0}^{\text{surface}}$
- $J_N^{\text{surface}}=J_N^{\text{surface}}(t), J_C^{\text{surface}}=J_C^{\text{surface}}(t)$

→ concentrations constantes

→ flux superficiels constants

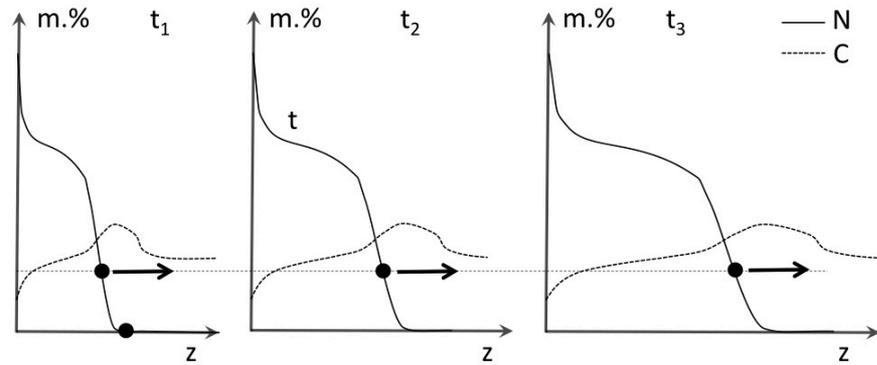
→ flux superficiels variables



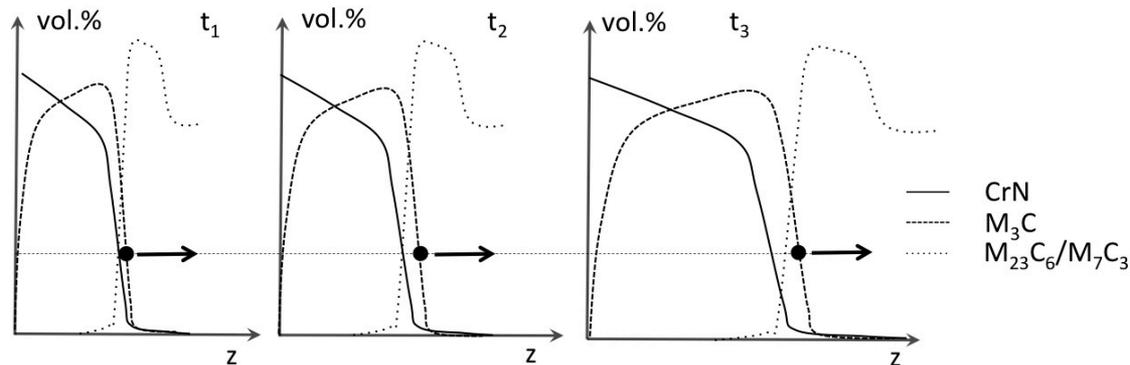
Intégration  
d'équations  
différentielles

Fonction de la  
géométrie 2D ou  
3D

## Nitruration : cinétique



Diffusion



Thermodynamique (diagramme complexe)

## Nitruration : mécanique

► Équilibre local

$$\text{div} \underline{\sigma} = 0 \Rightarrow \sigma_{ij,j} = 0$$

► Compatibilité des déformation totales

$$\text{inc} \underline{\epsilon} = 0 \Rightarrow \begin{cases} \epsilon_{ii,jj} + \epsilon_{jj,ii} - 2\epsilon_{ij,ij} = 0 \\ (\epsilon_{ki,j} + \epsilon_{ij,k} - \epsilon_{jk,i})_j - \epsilon_{ii,jk} = 0 \end{cases}$$

► Déformations

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^l \text{ with } \epsilon_{ij}^l = \epsilon_{ij}^s + \epsilon_{ij}^d$$

Changement de volume

⊗ precipitation

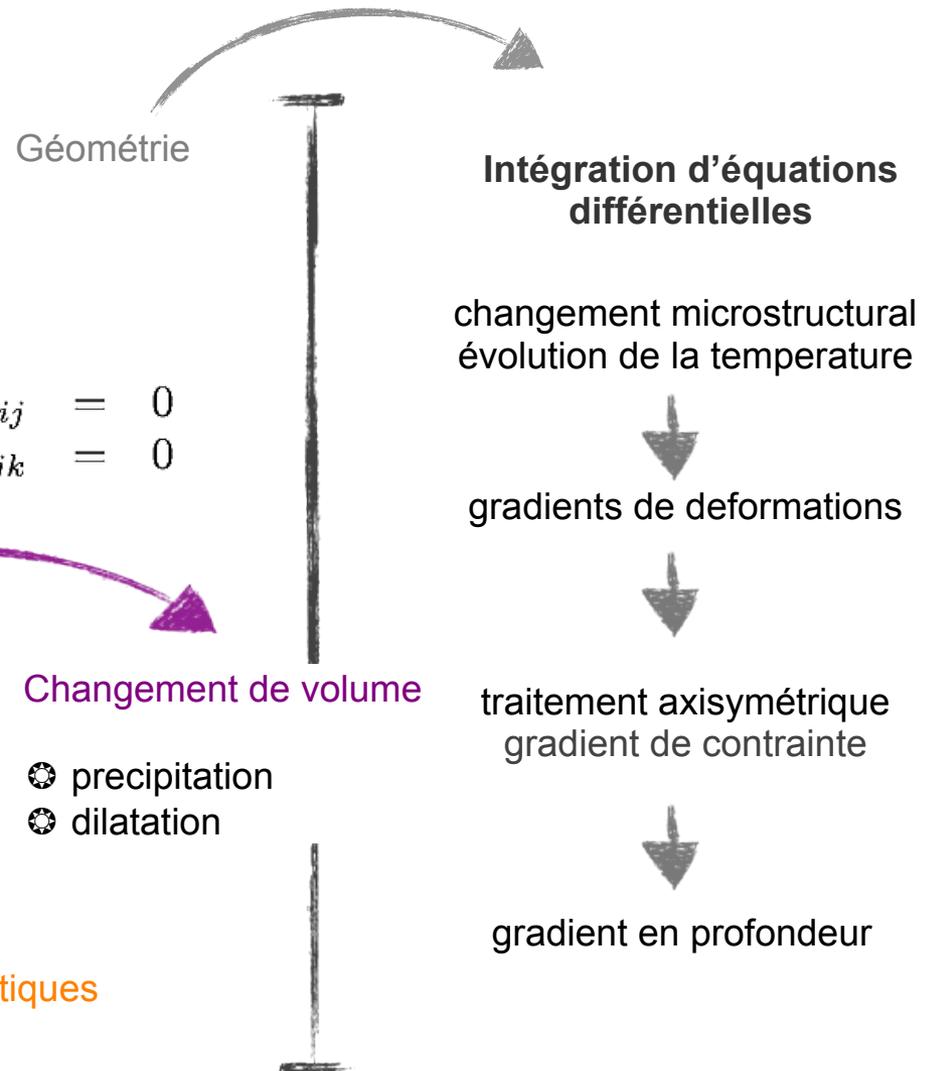
⊗ dilatation

► Lois de comportement

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}^e$$

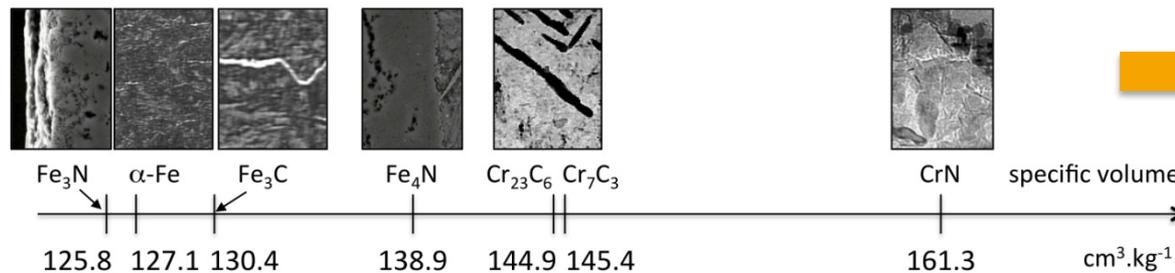
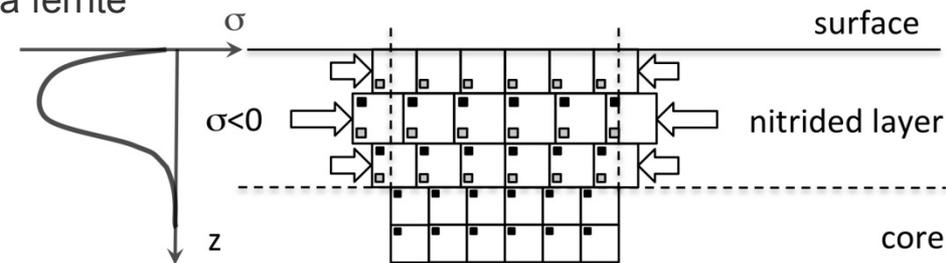
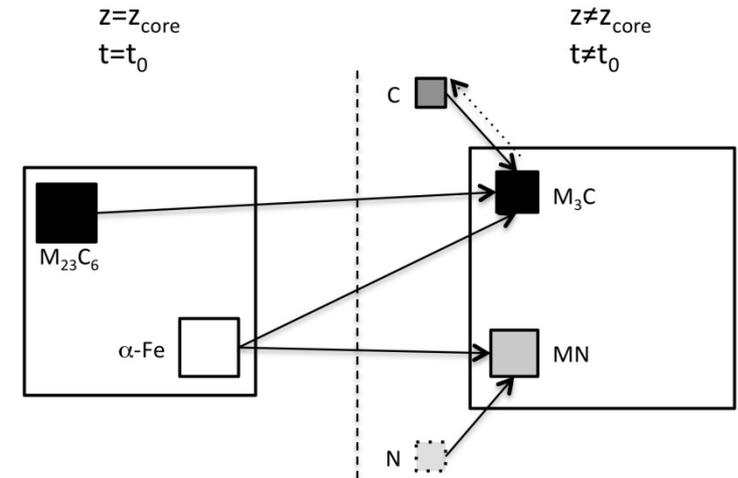
$$\sigma_{ij} = g(\epsilon_{ij}^p)$$

Deformations plastiques



### Nitruration : local / global

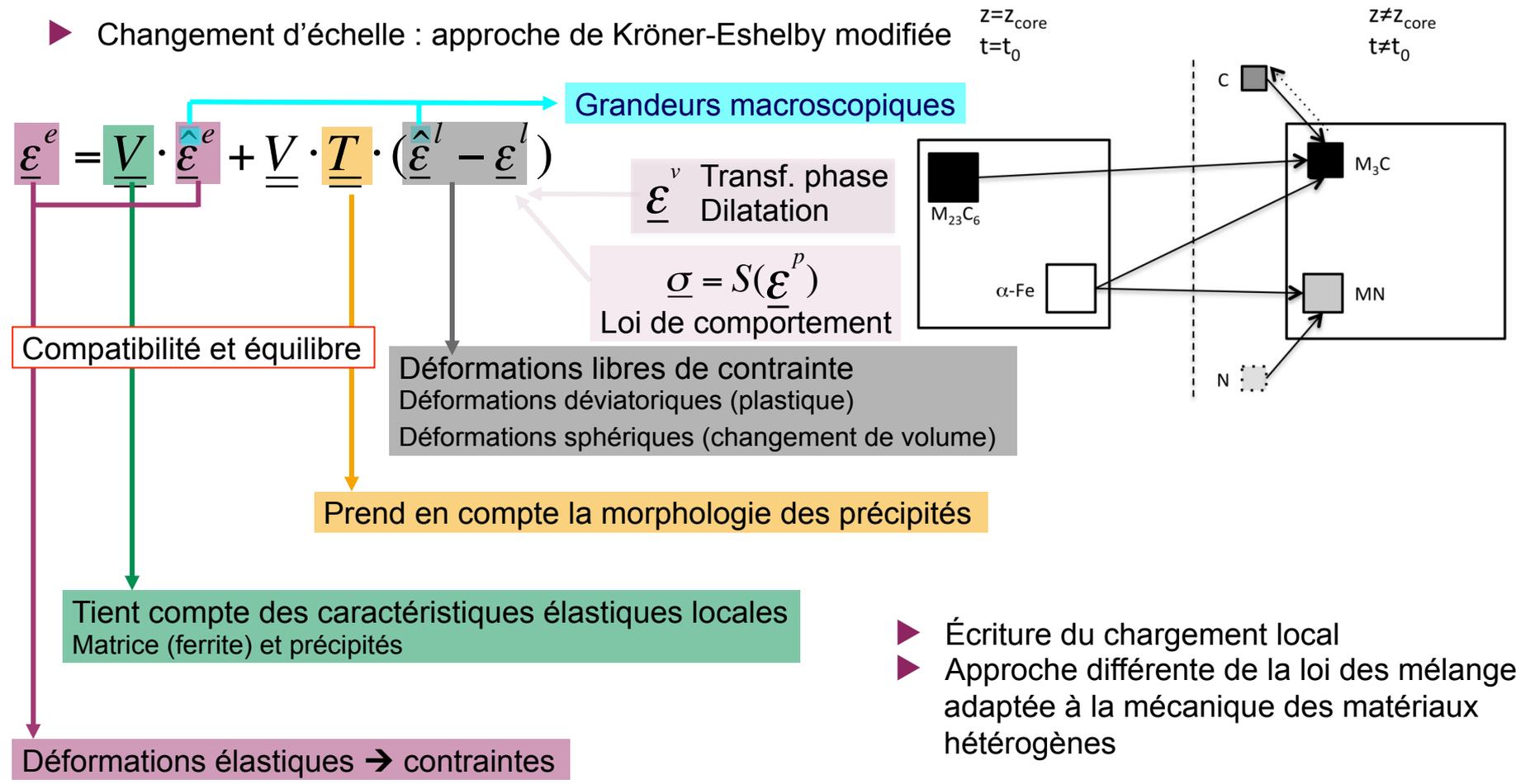
- ▶ Matériau multiphasé
- ▶ Génération du chargement volumique :
  - ⊗ volume spécifique  
carbures, ferrite -> nitrures
  - ⊗ dilatation thermique  
température de nitruration -> ambiante
  - ⊗ paramètres de maille  
ex. : evolution de la solubilité de N dans la ferrite
- ▶ Gradients chimiques et microstructuraux
- ⇒ changements volumiques multi-échelles



➔ **Changement d'échelle**

### Nitruration : mécanique locale

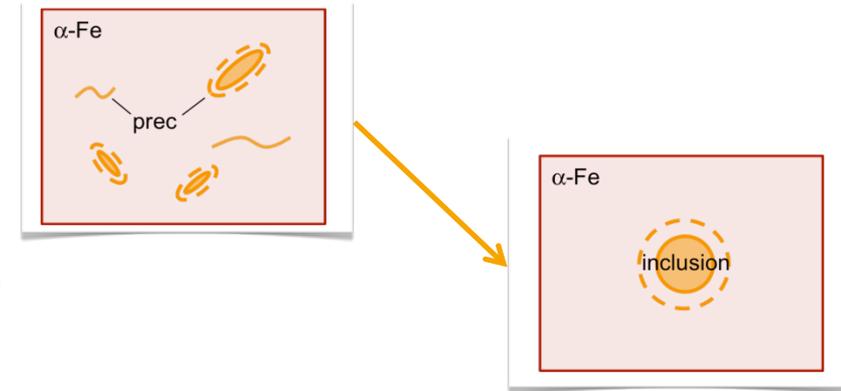
► Changement d'échelle : approche de Kröner-Eshelby modifiée



- Écriture du chargement local
- Approche différente de la loi des mélanges, adaptée à la mécanique des matériaux hétérogènes

### Nitruration : mécanique locale

- ⊗ pendant la diffusion/précipitation :  $\frac{\Delta V}{V} \Big|_{\alpha-Fe} = 0$
- ⊗  $\alpha$ -Fe : comportement élastoplastique
- ⊗ inclusion : forme sphérique et comportement élastique
- ⊗ massif semi-infini



Déformation liée aux transformations de phase :

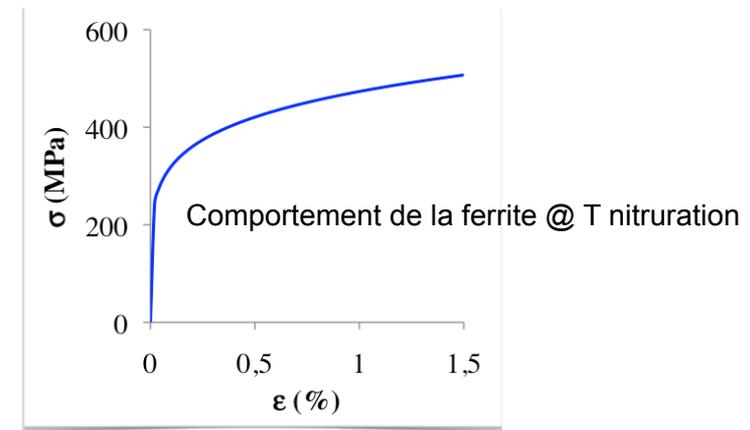
$$\hat{\underline{\underline{\epsilon}}} = (1 - y_{prec}) \cdot \hat{\underline{\underline{\epsilon}}}_{\alpha-Fe}^P + \dot{y}_{prec} \cdot \underline{\underline{\epsilon}}_{prec}^{tr}$$

$\hat{\underline{\underline{\epsilon}}}$  déformation libre de contrainte macroscopique

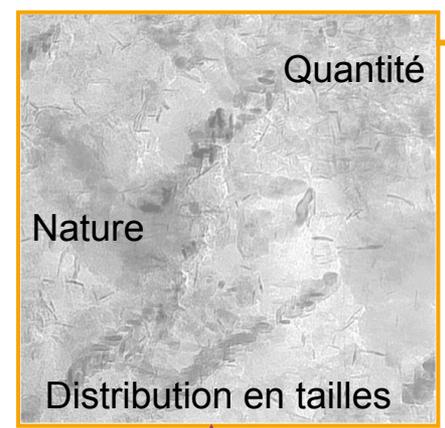
$\hat{\underline{\underline{\epsilon}}}_{\alpha-Fe}^P$  déformation plastique

$\underline{\underline{\epsilon}}_{prec}^{tr}$  déformation de transformation

$\dot{y}_{prec}$  vitesse de fraction volumique



### Nitruration : loi de comportement locale



Comportement plastique local

Limite d'élasticité  
Écrouissage

Élasticité (fraction volumique)  
Contrainte

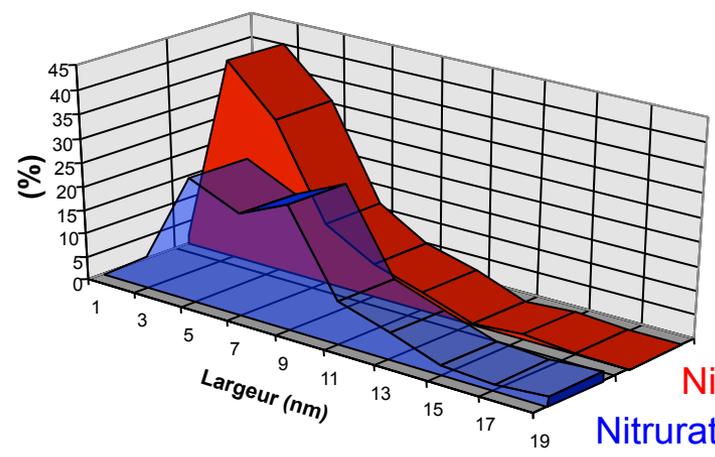
Interaction dislocation / précipité  
Contournement / cisaillement  
Dans le grain (les carbures aux joints de grains n'ont pas d'influence)

$$\Delta\tau \approx \mu \cdot b \cdot \frac{y^{1/2}}{d_p}$$

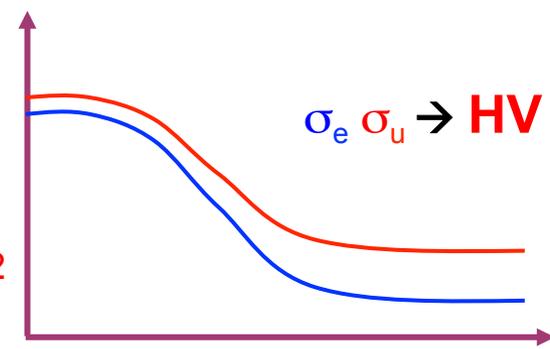
$$\Delta\tau \approx \frac{\gamma_P^{3/2}}{\Gamma^{1/2} \cdot b} \cdot d_p^{1/2} \cdot y^{1/2}$$

avec :

- $\tau$  : cission critique
- $y$  : fraction volumique de précipités
- $d_p$  : diamètre de précipités
- $\nu$  : module de cisaillement de la matrice
- $b$  : vecteur de Burgers
- $\gamma_P$  : énergie par unité de surface interne créée par le cisaillement
- $\Gamma$  : tension de ligne de dislocation



Gradient en profondeur



Taille CrN globulaire (nm)



Cinétique de transformation

### Approche de Locquet (1998)

Contournement ou cisaillement des précipités

$$\tau_{cis} = \frac{2 \gamma_p R_s}{b \lambda}$$

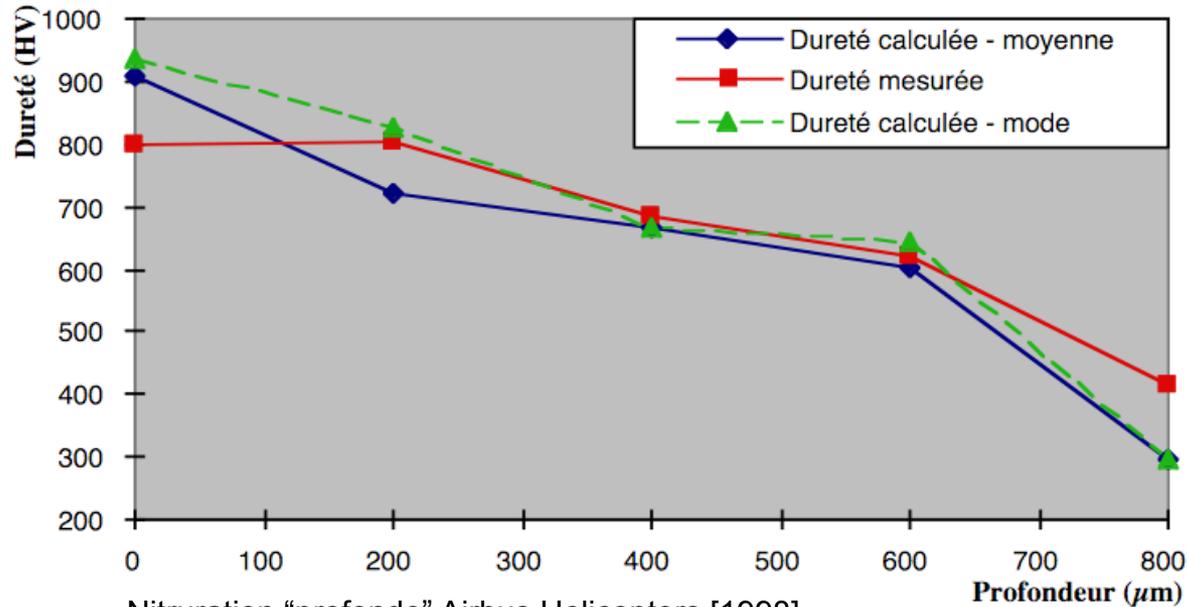
$$\lambda = 1,18 \left\{ \frac{\pi}{6y_{\varphi_i}} \left( 1 + \frac{\sigma_a^2}{\bar{d}_a^2} \right) \right\}^{1/2} \bar{d}_a$$

$$\tau_{cont} = \frac{Gb}{\lambda}$$

Distribution des tailles et des distances

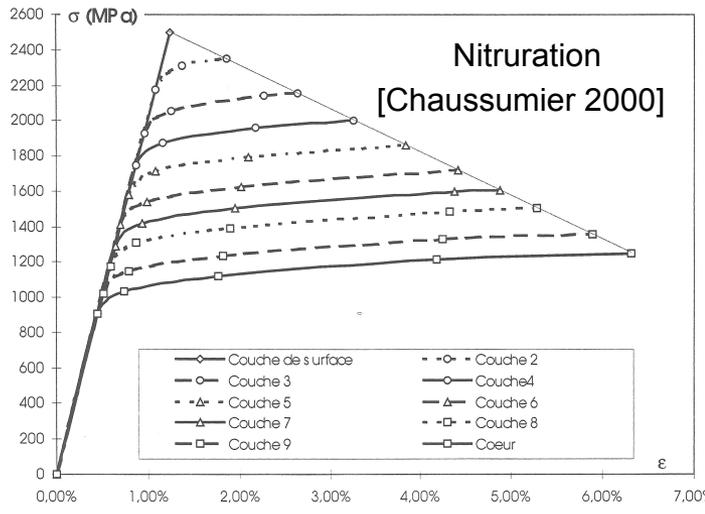
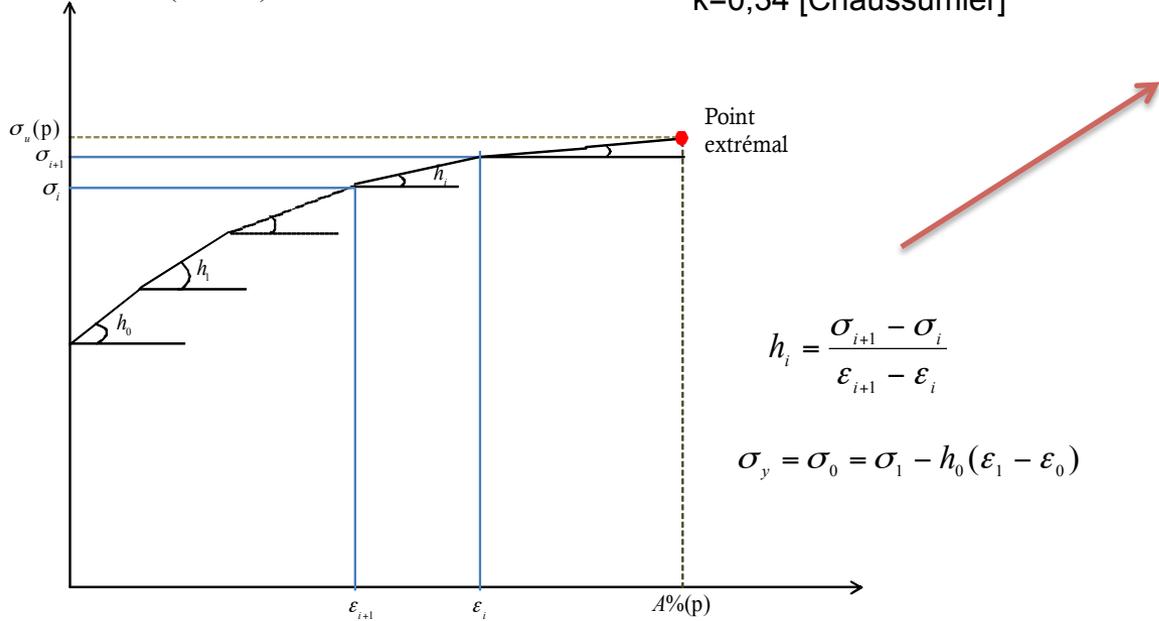
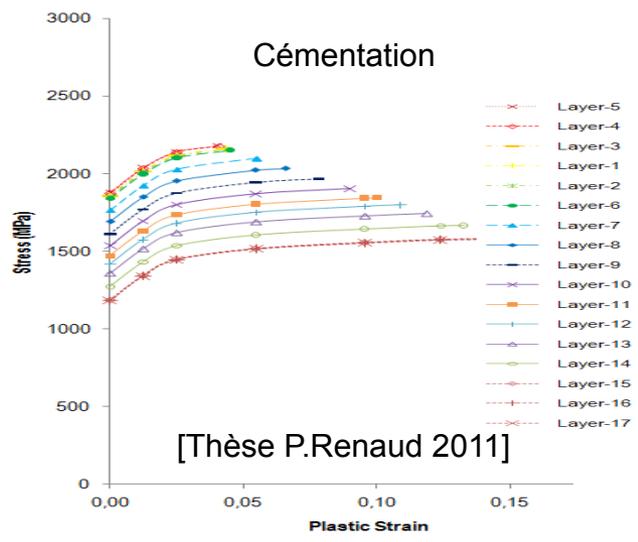
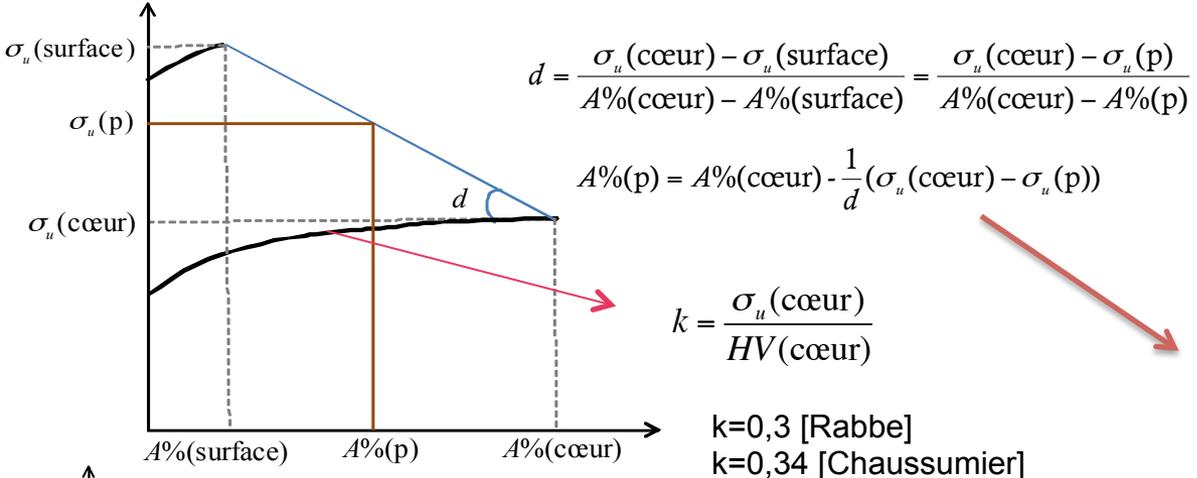
$$k' = \frac{\sigma_c(\text{cœur})}{HV(\text{cœur})}$$

k'=0,4 pour le 32CrMoV13

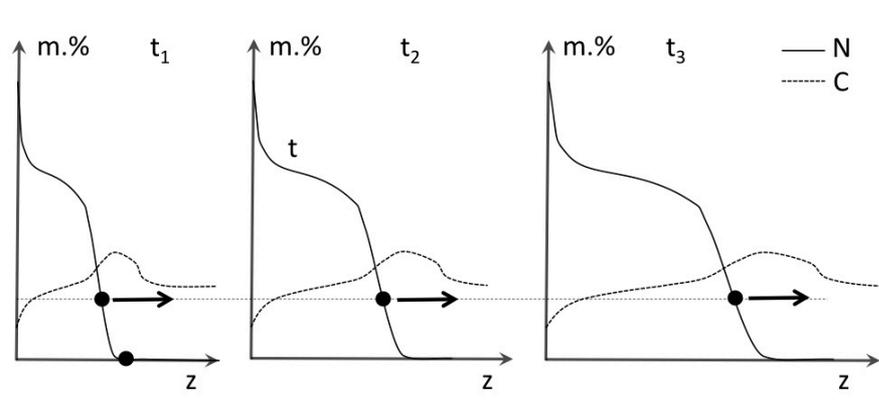


Nituration "profonde" Airbus Helicopters [1998]

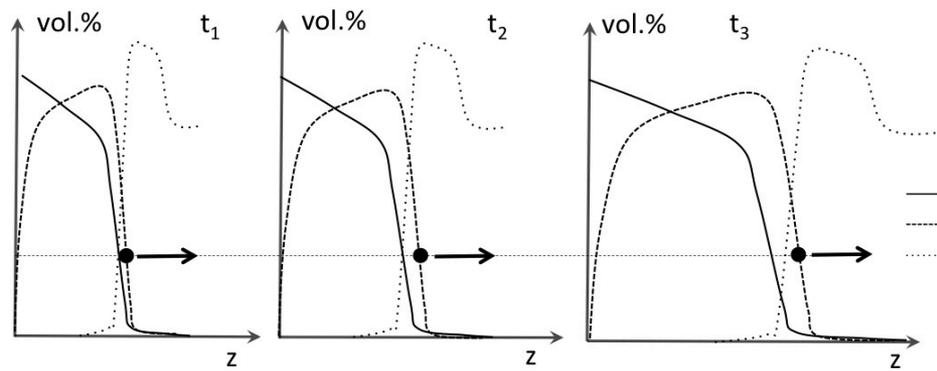
### Méthode de Chaussumier (2000)



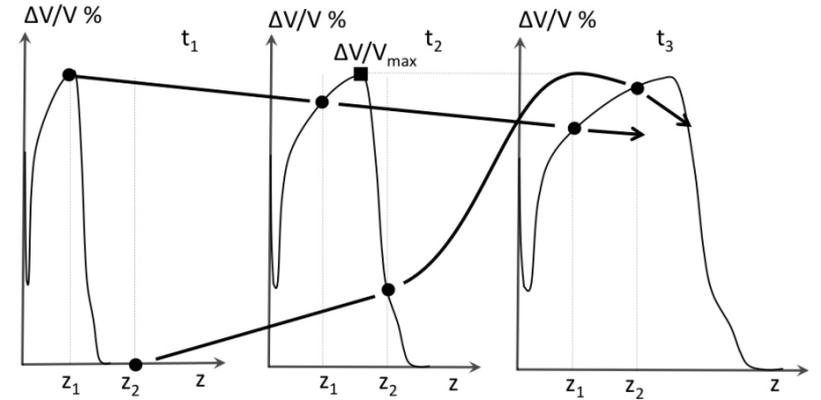
## Nitruration : cinétique



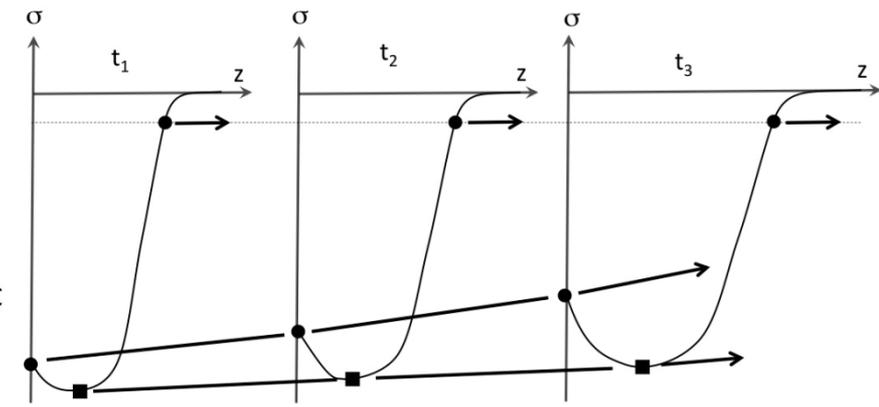
Diffusion



Thermodynamique (diagramme complexe)



Chargement



Mécanique des matériaux hétérogènes (Kröner-Eshelby)

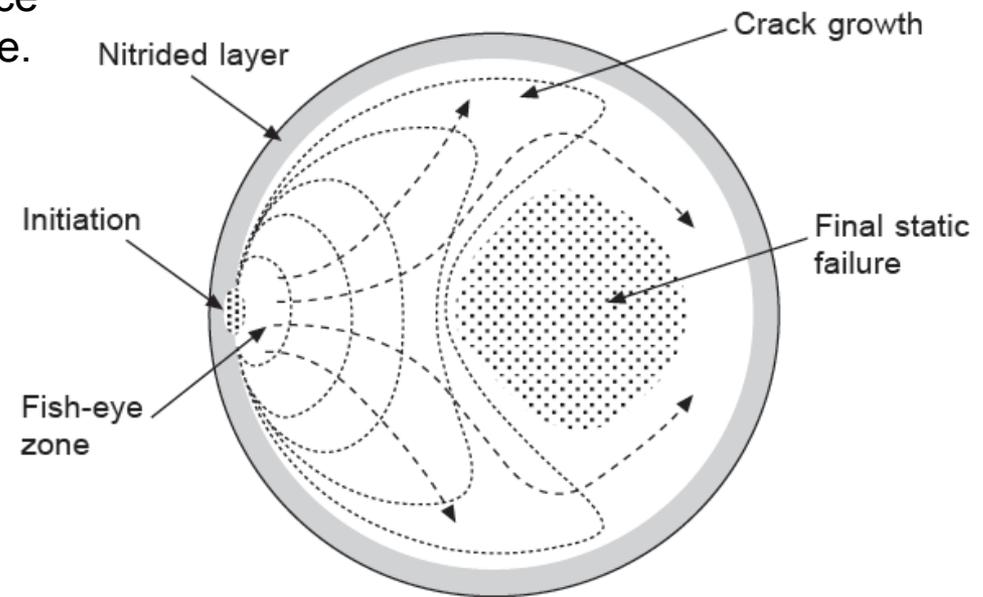


Couplage métallurgie/mécanique à chaque pas de temps

## Fissuration

### ► Apports de la nitruration

- Initiation des fissures sous la surface nitrurée au niveau du métal de base.
- Propagation des fissures dans le matériau de base.



L. BARRALLIER. *Classical nitriding of heat treatable steel*. Thermochemical Surface Engineering of Steels, 2015.

## Courbe de Wöhler

### ► Apports de la nitruration



– Efficace pour les grands cycles à rupture par la présence de contraintes résiduelles de compressions et l'augmentation de la dureté



– Niveau de dureté : risque de rupture pour de fortes amplitudes de contraintes (ténacité à la rupture en surface réduite, effet de la couche de combinaison,...)

