



CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES

Dr. JÉGOU Sébastien, Pr. BARRALLIER Laurent, GERMAIN Lisa

21 janvier 2010

Colloque National Mécamat

20-24 janvier 2020, Aussois



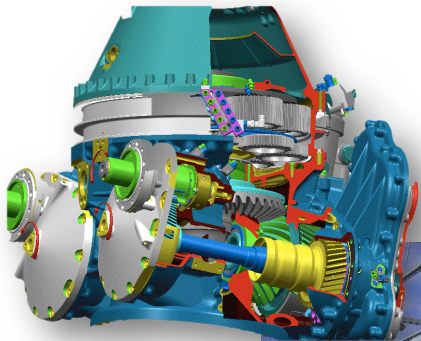
1. Contexte
2. Définition
3. Classification
4. Genèse des contraintes résiduelles
5. Stabilité des contraintes résiduelles
 - a. Relaxation thermique
 - b. Relaxation mécanique
6. Maîtrises des géométries
 - a. Déformations macro
 - b. Enlèvement de matière
 - c. Surépaisseurs – Chaînages des procédés
7. Intégrité des surfaces
 - a. Homogénéité des surfaces
8. Couplage Diffusion – Gradient de microstructure
 - a. Généralité – Couplage auto-induit
 - b. Chaînage des procédés
9. Conclusion



Augmenter la durée de vie en service ?



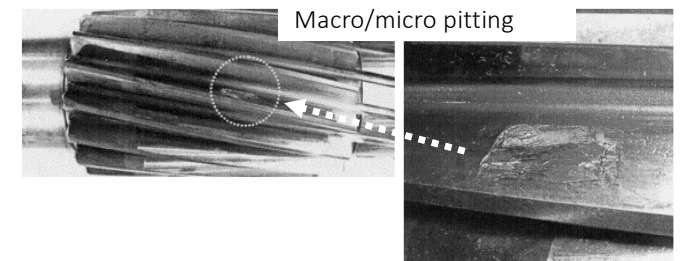
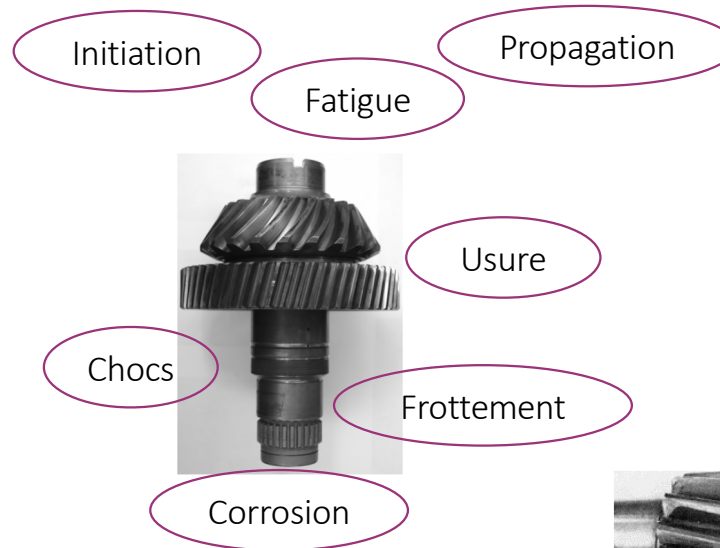
- Système
- Chargement
- Environnement



AS332 Super Puma
Airbus Helicopters



Transformateur Électrique



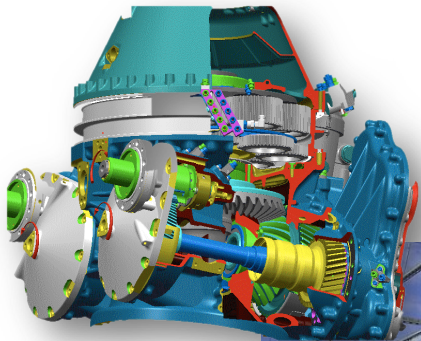
Traitements de surface ...



Augmenter la durée de vie en service ?



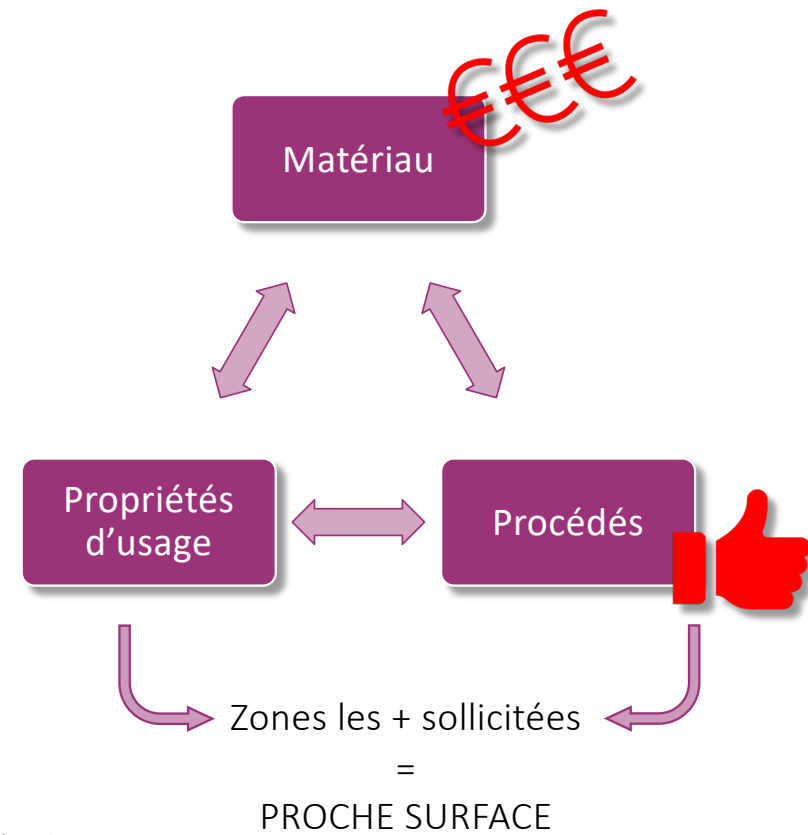
- Système
- Chargement
- Environnement

AS332 Super Puma
Airbus Helicopters

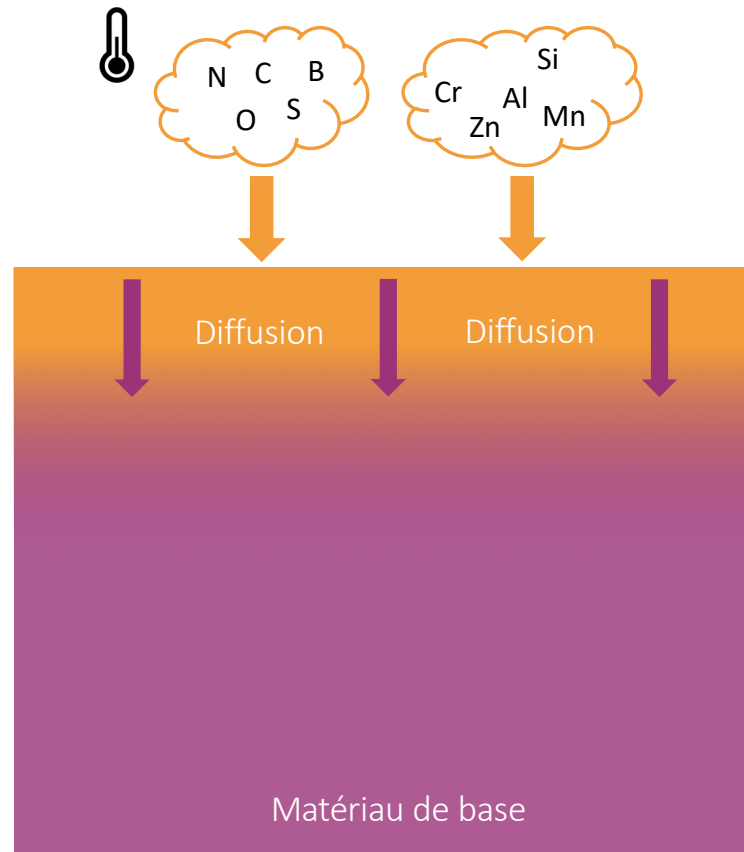
Transformateur Électrique

21/01/2020

Aussois2020 - Jégou Ssébastien



Traitements de surface thermo-chimiques



- Réaction chimique
- Température
- Milieu donneur
- Élément(s)
- Diffusion

} Système ouvert

Liquide/solide

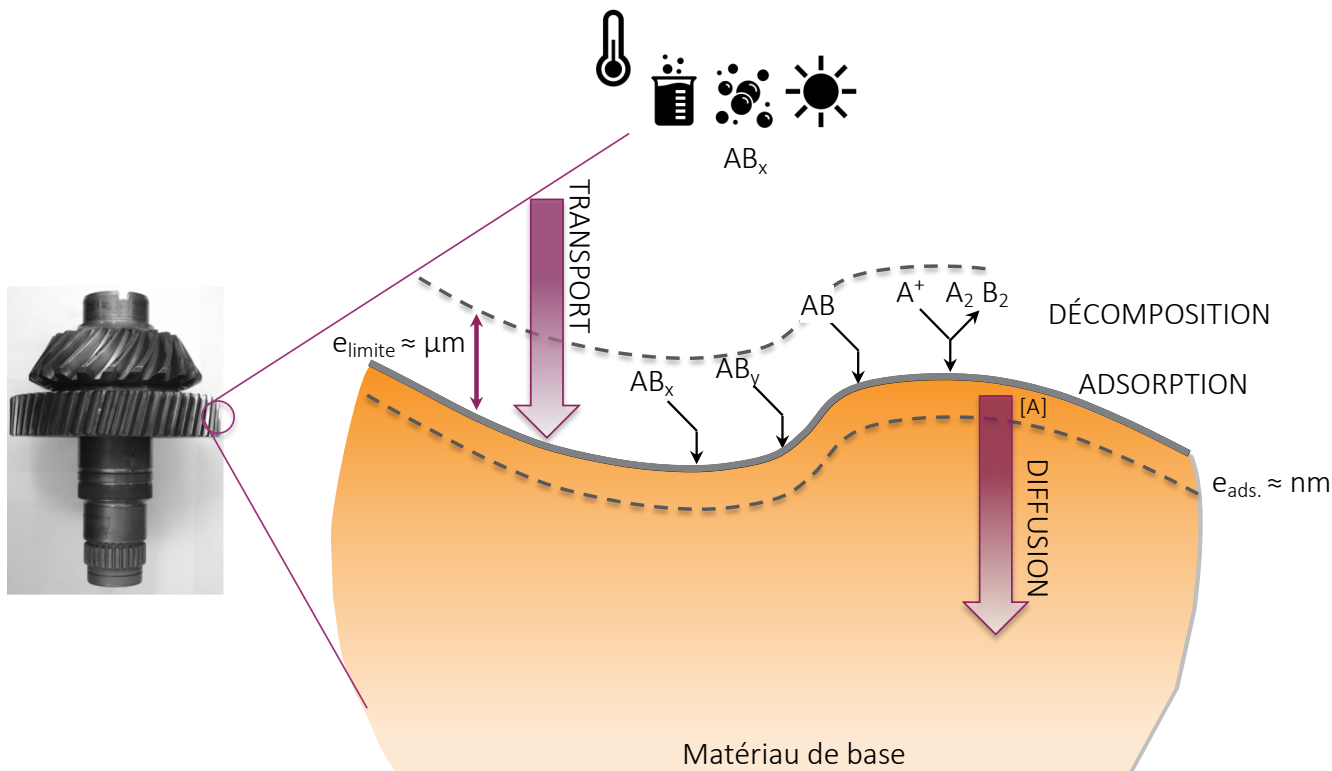


gazeux



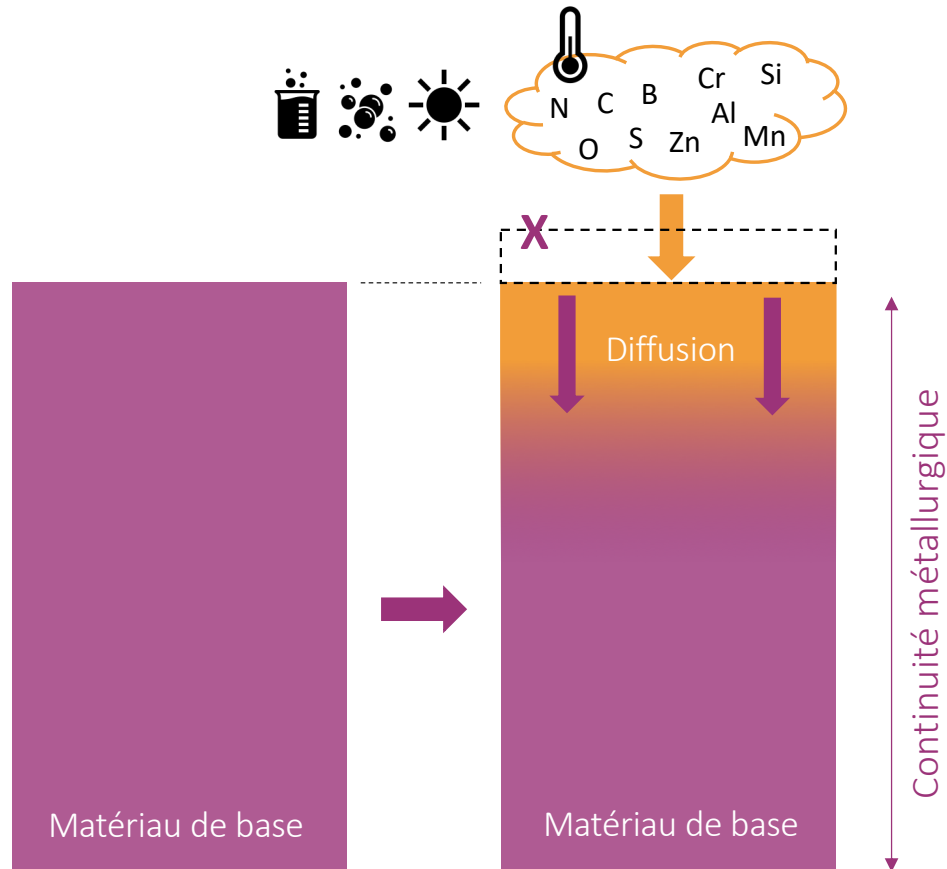
ionique





- Mécanismes mise en jeu:
 - Transport
 - Décomposition
 - Adsorption
 - **DIFFUSION**
 - Interstice (N, C, S)
 - Substitution (Cr, Al, Zn, ...)
 - Mouvement d'interfaces (couche de combinaison)
 - **TRANSFORMATIONS de phases**
 - Précipitation
 - Allotropique (« haute » température)

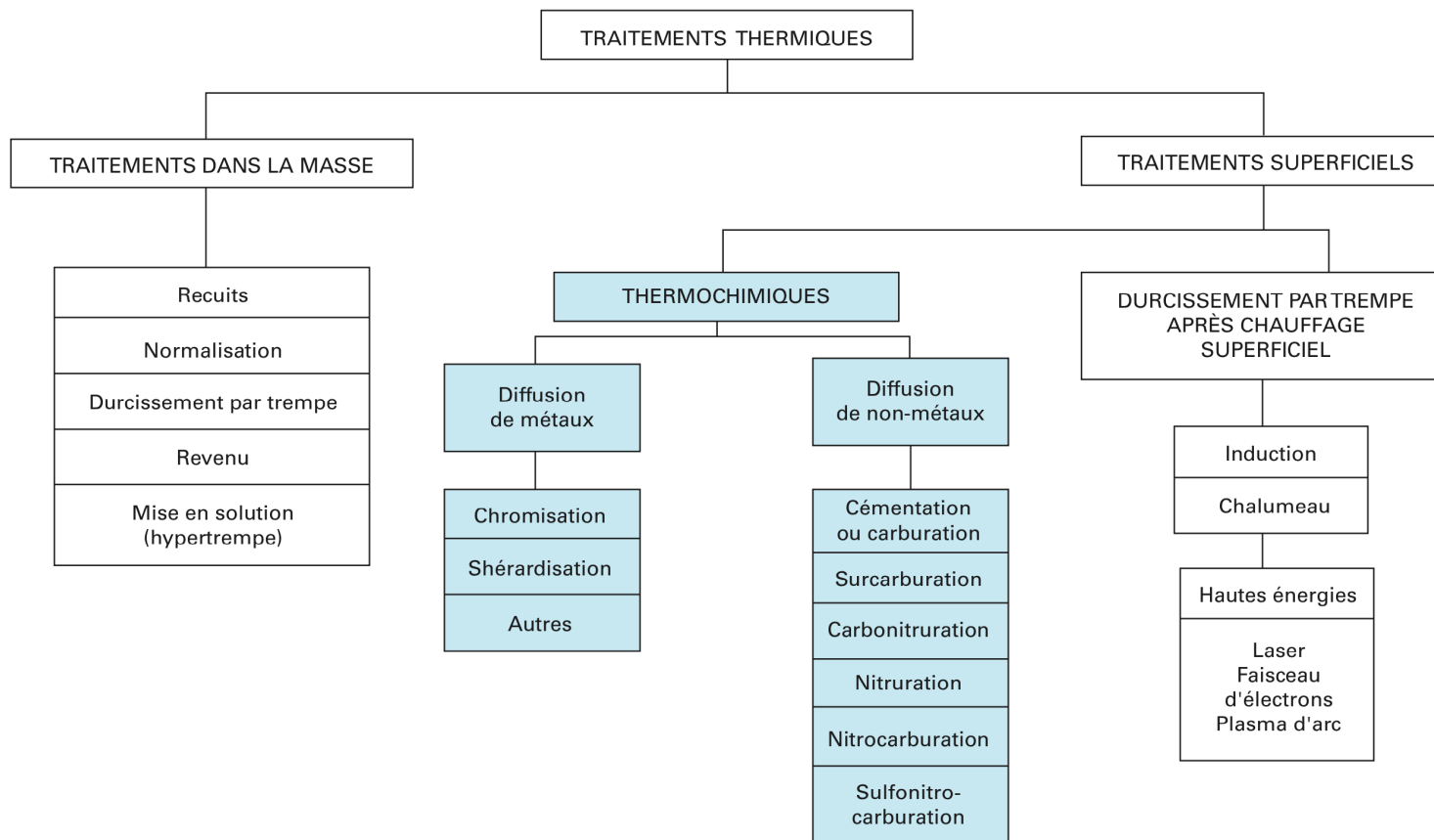
Traitements de surface thermo-chimiques



- Réaction chimique
 - Température
 - Milieu donneur
 - Élément(s)
 - Diffusion
- } Système ouvert


MODIFICATION CHIMIQUE DE LA SURFACE

- Ce n'est pas un dépôt !
- Pas de modification de la géométrie
 - ⚠ Sauf gonflement du aux contraintes résiduelles
- « Continuité » microstructurale
 - Fissuration
 - Chocs
- Augmentation des propriétés chimiques
 - Corrosion
- Augmentation des propriétés mécaniques
 - Durcissement
 - Contraintes résiduelles



Leroux, M1221, Editions T.I.

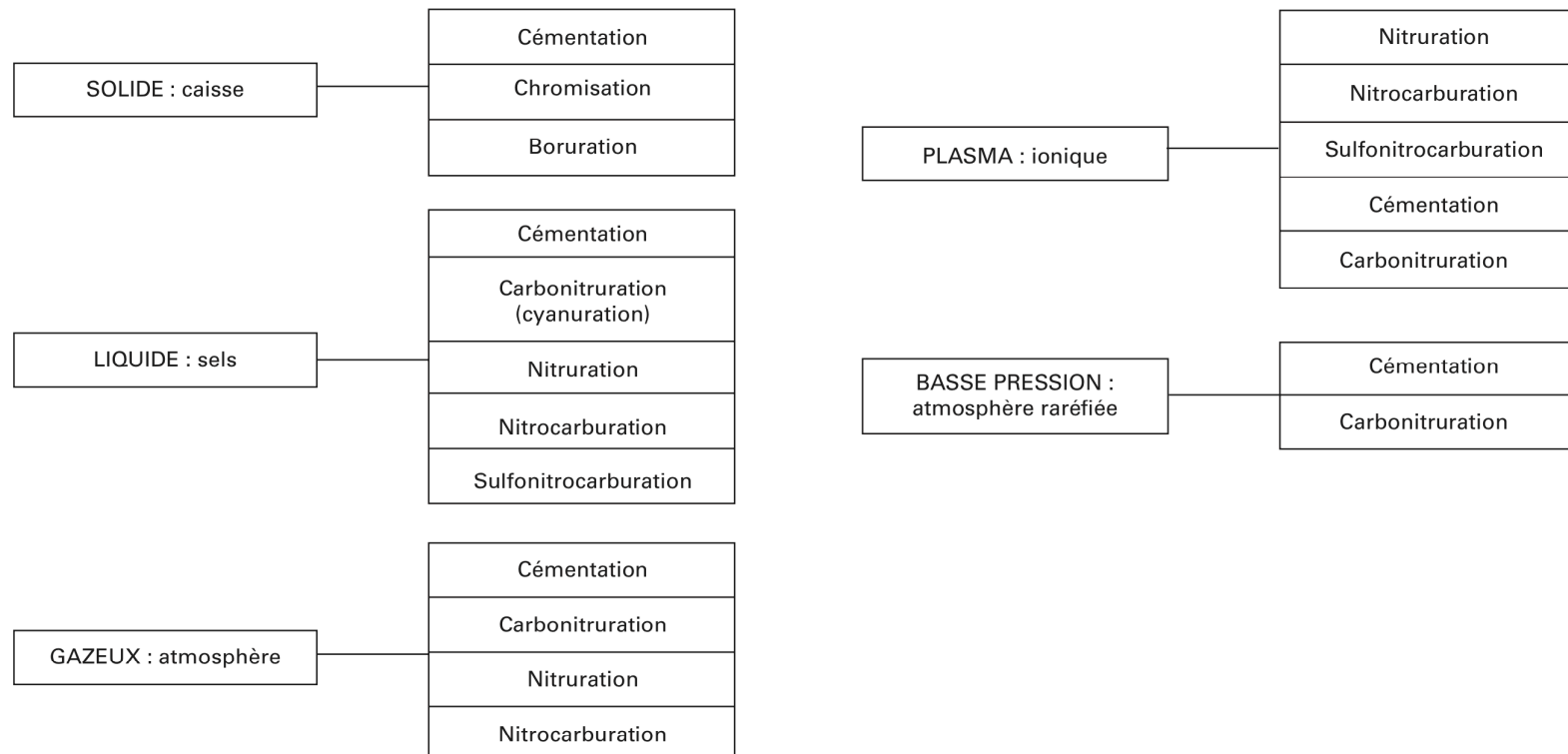
Tableau 1 – Éléments diffusants et traitements thermochimiques

Élément(s) diffusant(s)	Traitement	Principaux mécanismes résultants
Carbone	Cémentation (carburation) + durcissement par trempe	Durcissement martensitique par trempe de la zone enrichie en carbone
Azote	Nitruration ferritique	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique (couche de combinaison).
Carbone + azote	Carbonituration + durcissement par trempe	Durcissement martensitique par trempe de la zone enrichie en carbone et azote
Azote + carbone	Nitrocarburation ferritique	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique (couche de combinaison).
Azote + carbone	Nitrocarburation austénitique	Durcissement martensitique (martensite à l'azote) par : – trempe ; – solution solide et combinaison chimique.
Soufre + azote + carbone	Sulfonitrocarburation	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique.
Azote + carbone + oxygène	Oxynitrocarburation	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique.
Bore	Boruration	Combinaison chimique (ferro-borure)
Chrome	Chromisation	Alliage et combinaison chimique (carbure de chrome, cas des aciers au carbone)
Aluminium	Aluminisation	Alliage
Chrome + aluminium	Chrome-aluminisation	Alliage
Zinc	Shérardisation	Alliage
Silicium	Siliciuration	Alliage
Manganèse	Manganisation	Alliage

Diffusion d'éléments légers

Diffusion d'éléments métalliques

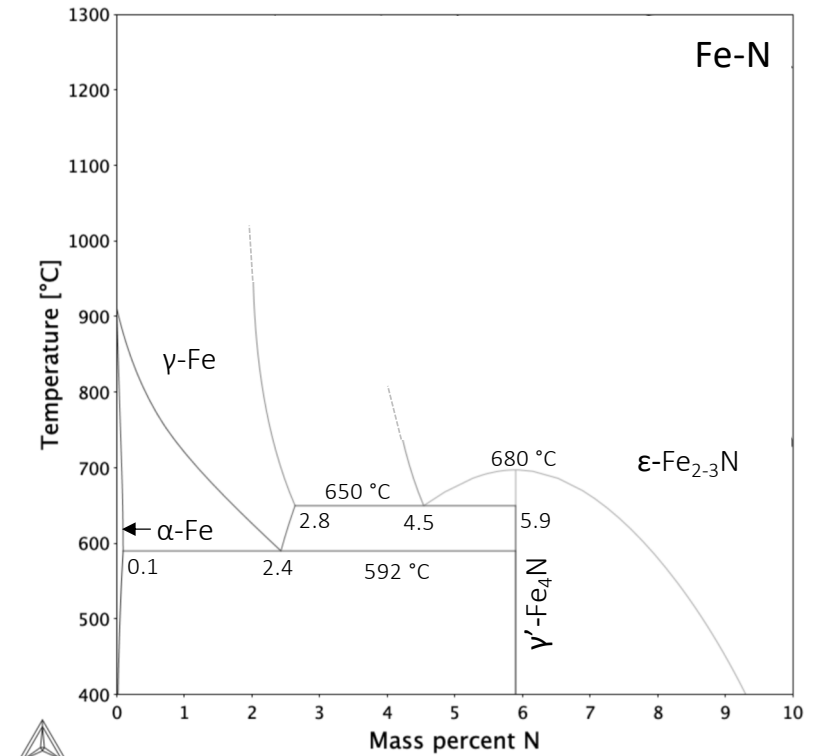
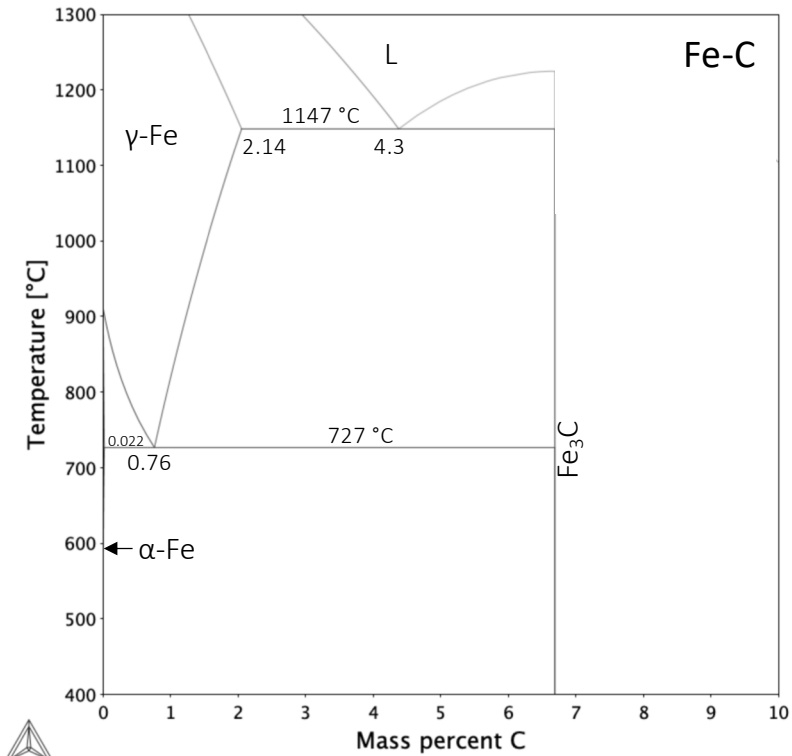
Leroux, M1221, Editions T.I.



Leroux, M1221, Editions T.I.

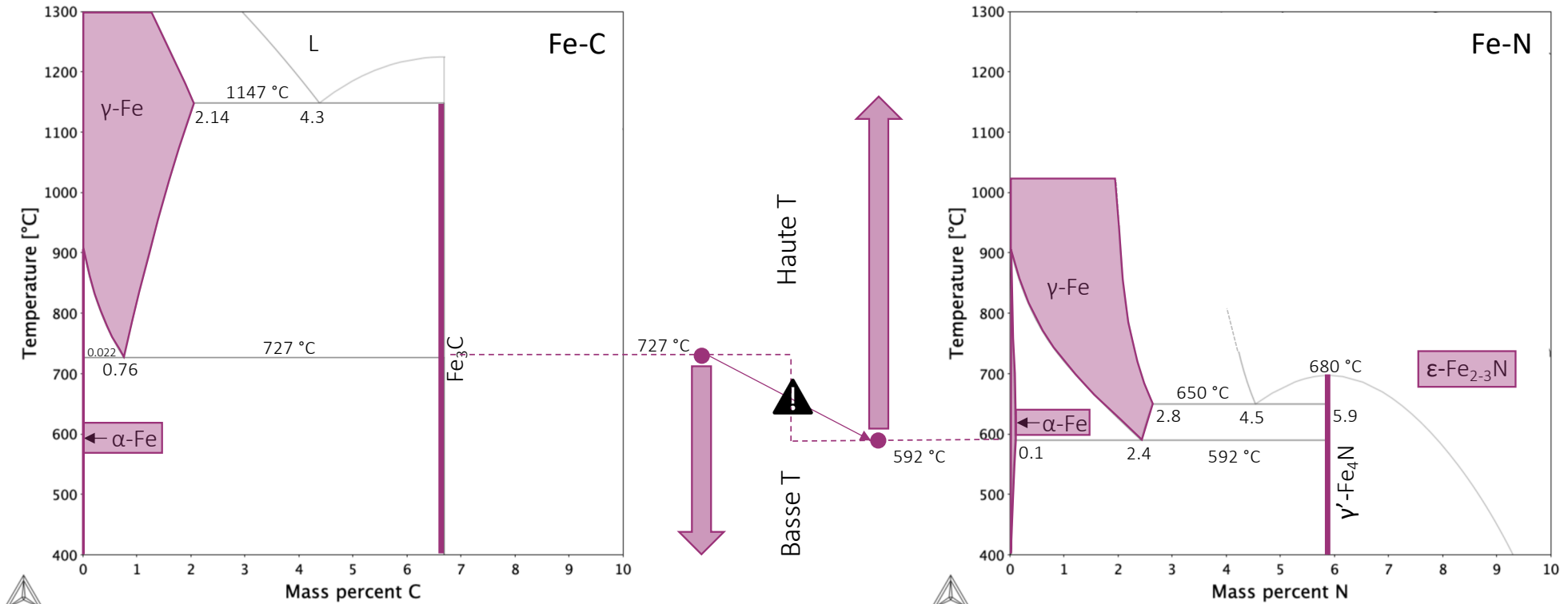
4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Diagrammes d'équilibre



4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

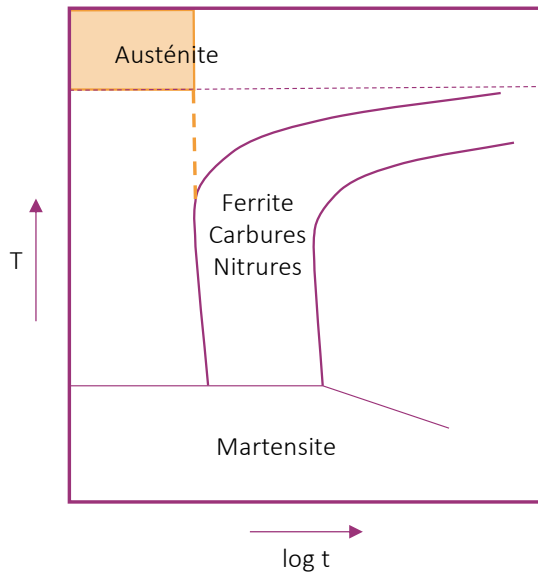
Diagrammes d'équilibre



- Mécanismes de diffusion:
 - Diffusion en solution solide
 - Croissance d'une couche de combinaison
 - Réaction entre élément(s) diffusant – élément majoritaire (matrice)

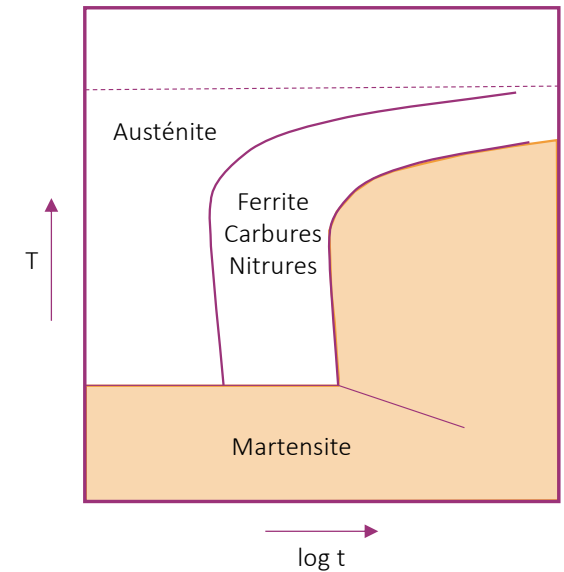
4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Diagrammes de transformations - Aciers



- Haute T (Acier > Ac3):
 - Mise en solution
 - **Refroidissement rapide**
 - Transformation allotropique
 - **Structure métastable**

Ex.: cémentation, chromisation

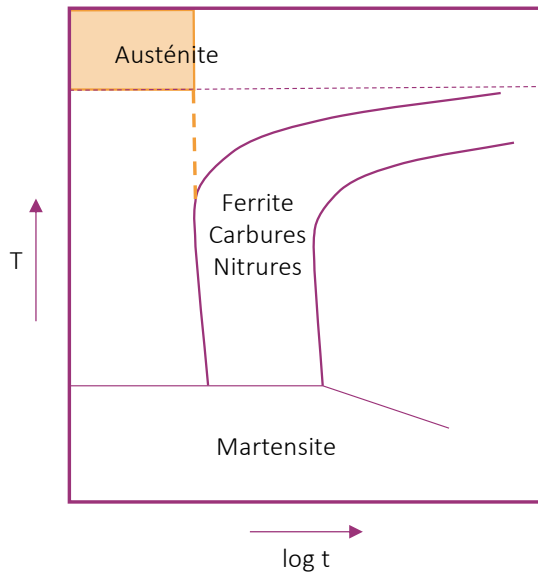


- Basse T (Acier < Ac1):
 - Mise en solution sur pré-traité
 - Précipitation de 2nd phases
 - **Refroidissement lent**
 - **Structure en quasi-équilibre thermo. (surface + cœur)**

Ex.: nitruration

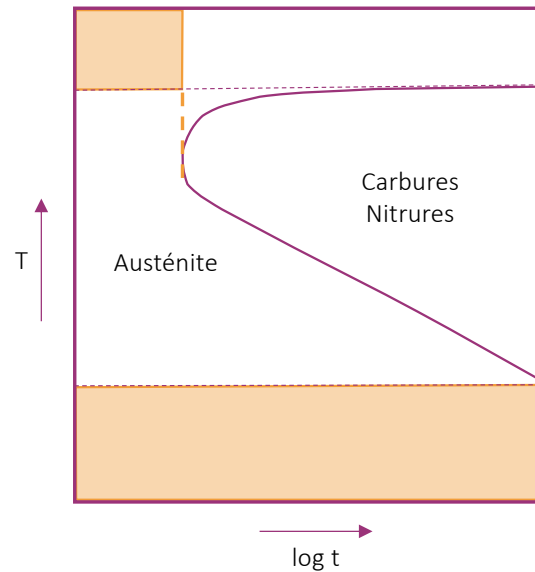
4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Diagrammes de transformations - Aciers



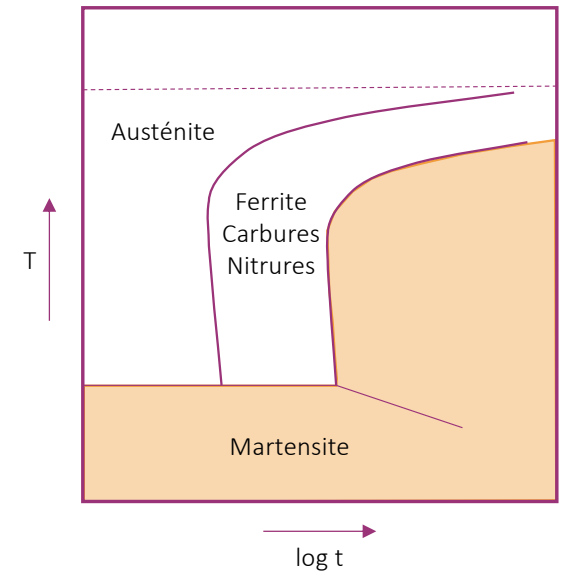
- Haute T (Acier > Ac3):
 - Mise en solution
 - **Refroidissement rapide**
 - Transformation allotropique
 - **Structure métastable**

Ex.: cémentation, chromisation



- « Intermédiaire » :
 - Mise en solution sans transformations
 Ex.: acier inoxydable austénitique (T+/-) cémenté/nitruré
 - + Précipitation de 2nd phases
 Ex.: chromisation
 - Couches de combinaison
 Ex.: boruration, nitruration

Aussois2020 - Jégou Ssébastien



- Basse T (Acier < Ac1):
 - Mise en solution sur pré-traité
 - Précipitation de 2nd phases
 - **Refroidissement lent**
 - **Structure en quasi-équilibre thermo. (surface + cœur)**

Ex.: nitruration

4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

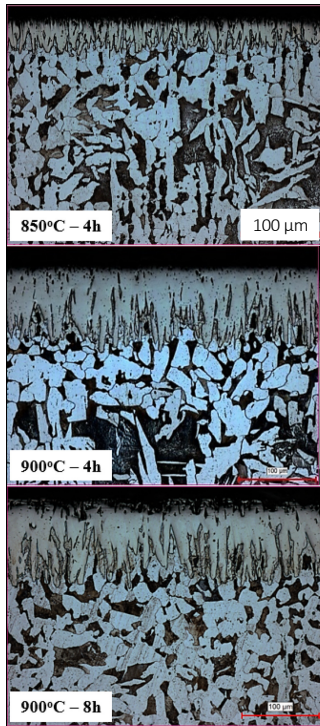
Origines



Gradient de microstructure

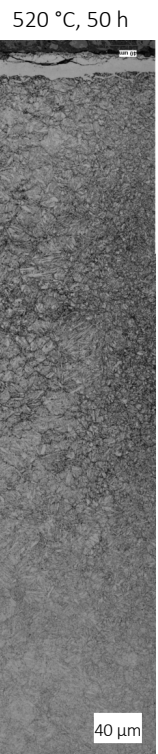
- ÉTENDUE ≈ Mécanismes de diffusion
- Design métallurgique

Boruration



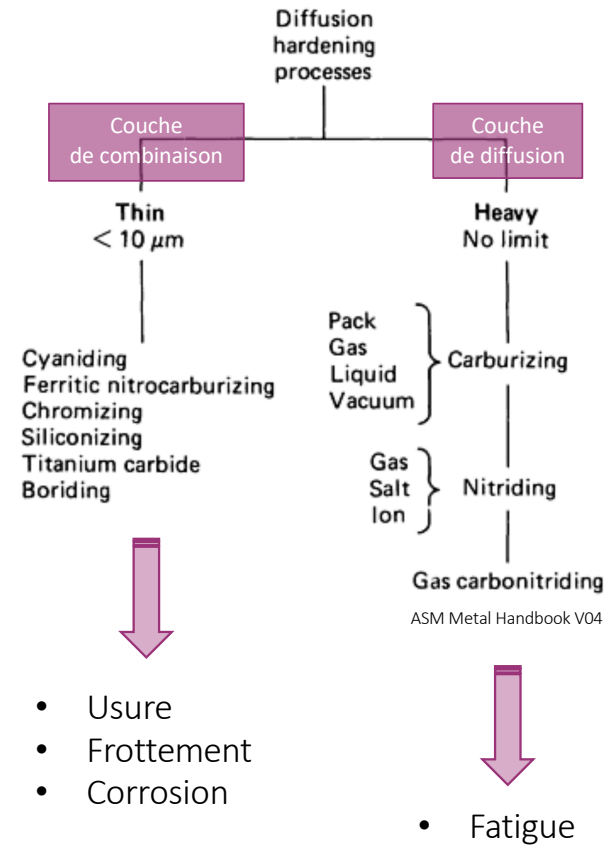
Türkmen, 2019

Nitruration



Guillot, 2017

Aussois2020 - Jégou Ssébastien

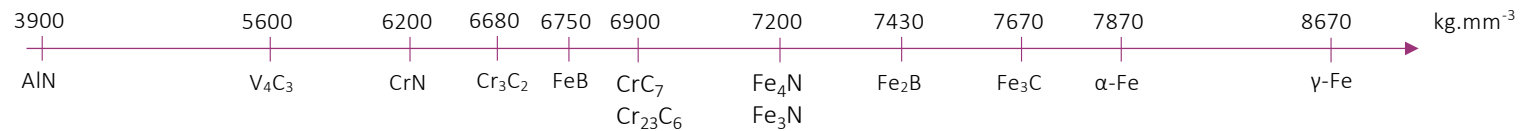
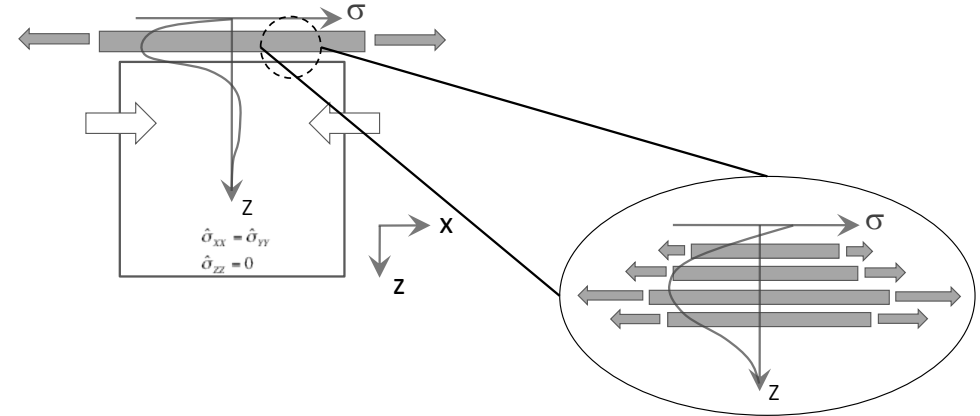


4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

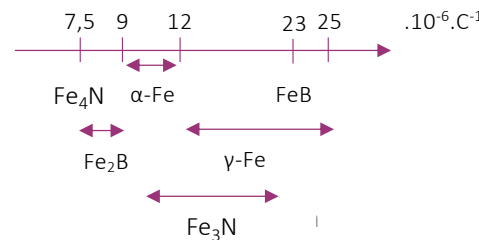
Origines

- 🎯 Gradient de microstructure
 - ÉTENDUE ≈ Mécanismes de diffusion
 - Design métallurgique

- 🎯 Hétérogénéités de déformations libres de contraintes:
 - **Volumiques :**
 - Transformations de phases:
 - Allotropique
 - Précipitation de 2nd phases
 - Couche de combinaison
 - Évolution « in-situ » de la composition chimique des phases



- **Thermiques :**
 - Coefficients de dilatation thermique

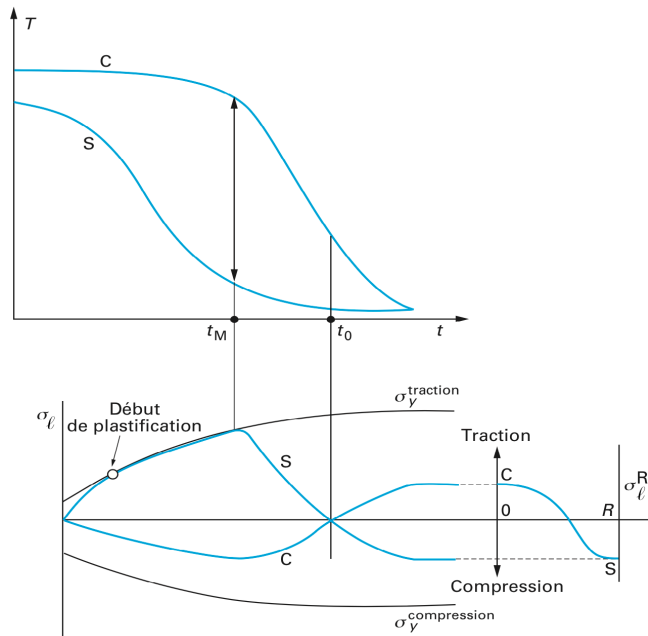


4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Développement et évolution des contraintes résiduelles: une histoire métallurgique

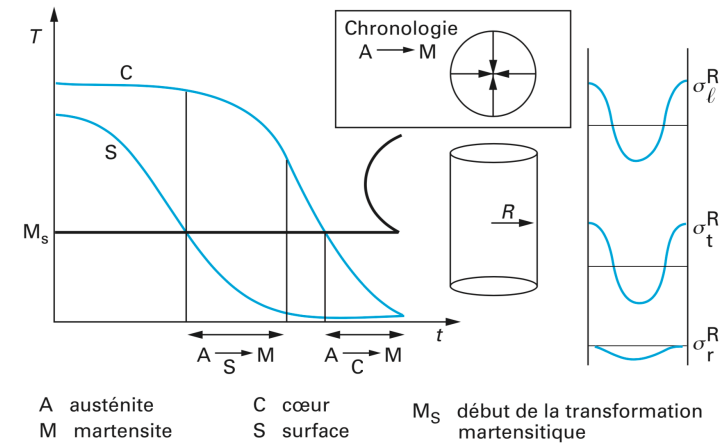
Trempe d'un acier

AVEC déformations thermiques
SANS transformation de phase



→ Contraintes résiduelles de compression

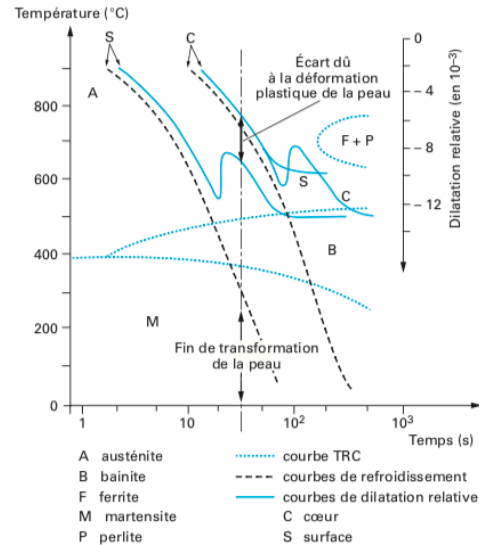
SANS déformations thermiques
AVEC transformation de phase



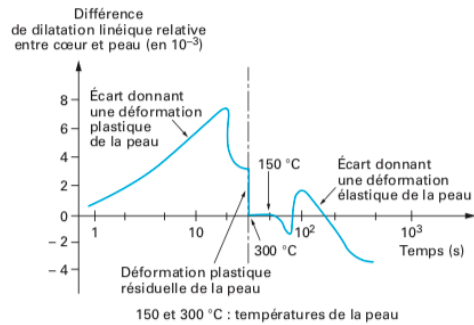
Austenite (0,5 %m.C) → Martensite : $\Delta V/V \sim +0,83$

→ Contraintes résiduelles de traction

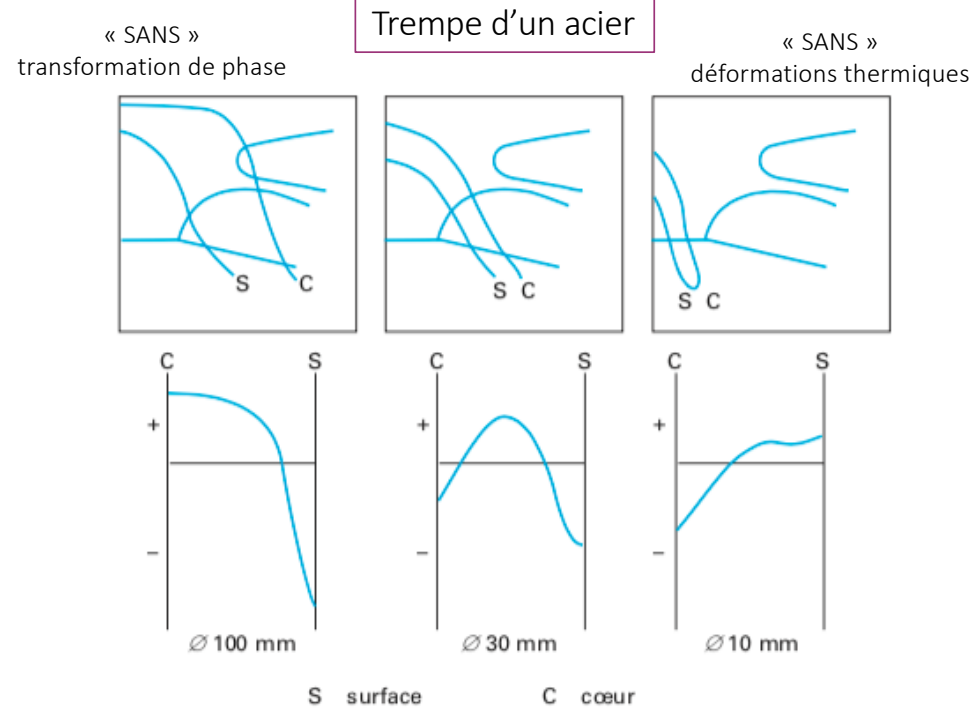
Développement et évolution des contraintes résiduelles: une histoire métallurgique



(a) évolution de la température et de la dilatation relative en fonction du temps



(b) évolution des déformations de la peau en fonction du temps
acier 15CrMoV6 trempé à l'eau

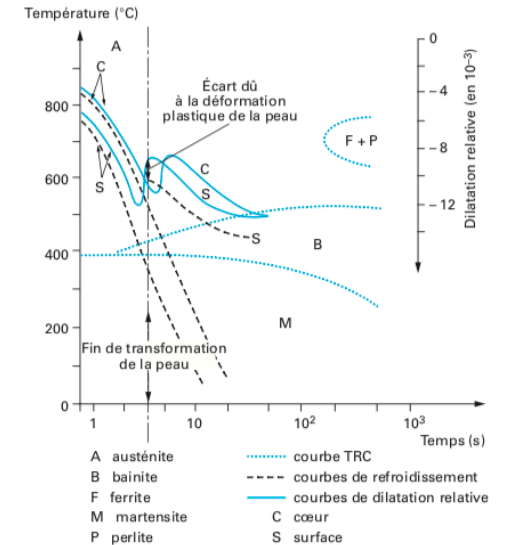


Équilibrage des contraintes complexe et fonction:

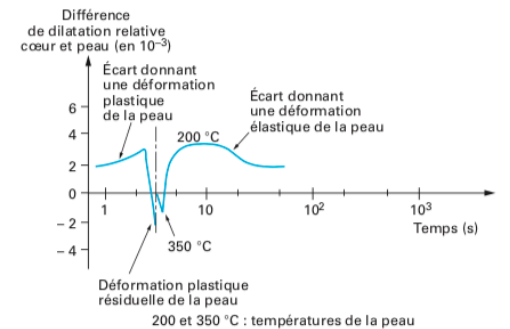
- %C;
- Trempabilité;
- Sévérité de trempage;
- Taille de la pièce



Une histoire métallurgique



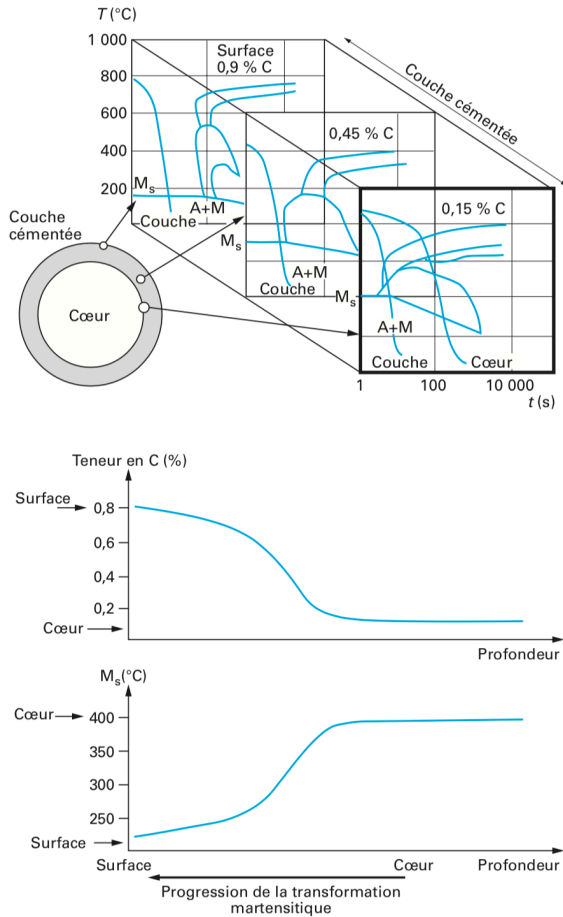
(a) évolution de la température et de la dilatation relative en fonction du temps



(b) évolution des déformations de la peau en fonction du temps
acier 15CrMoV6 trempé à l'eau

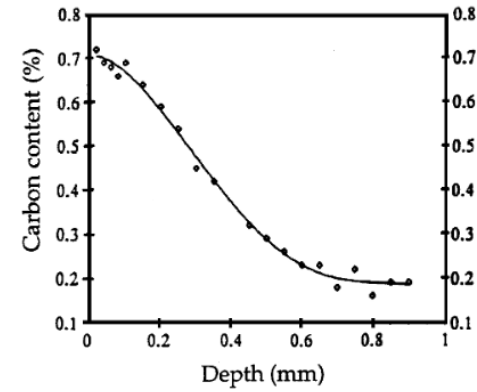
4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Exemple : Cémentation

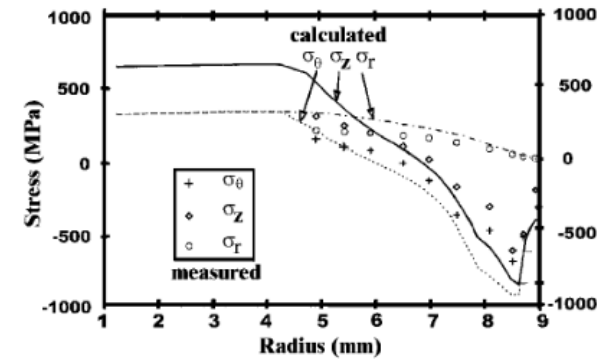
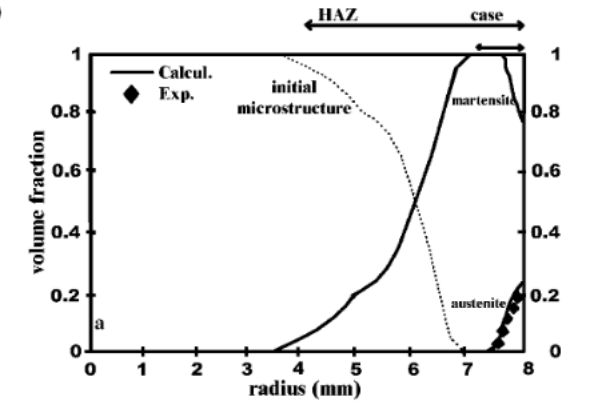
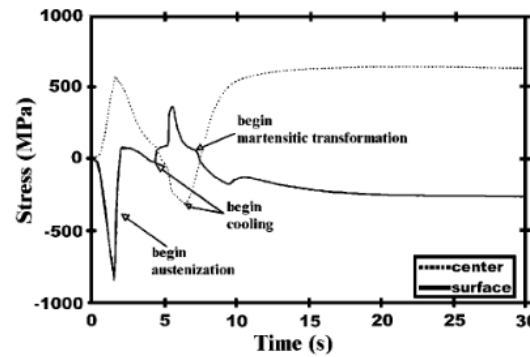
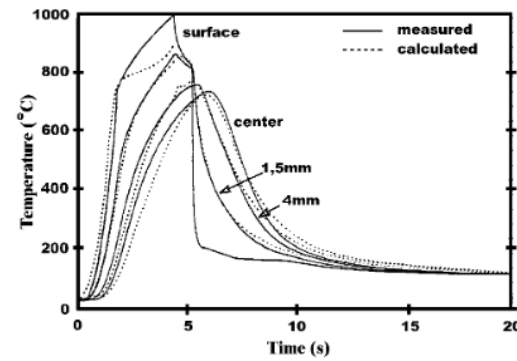


Barralis et al, M1180, Editions T.I.

21/01/2020



Denis, 2002



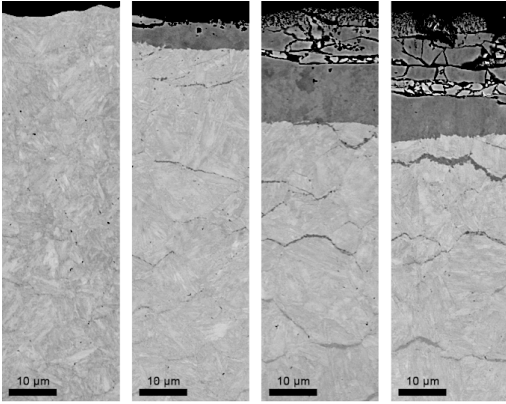
Aussois2020 - Jégou Ssébastien

19

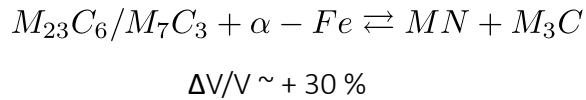
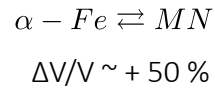
4 GENÈSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Exemple : Nitration

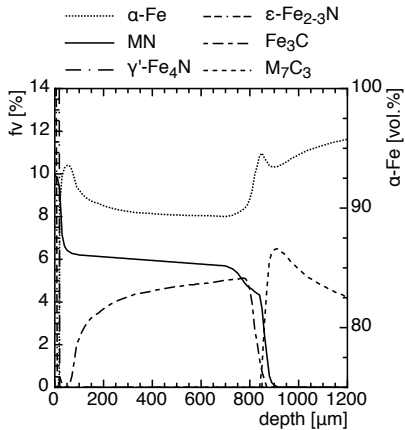
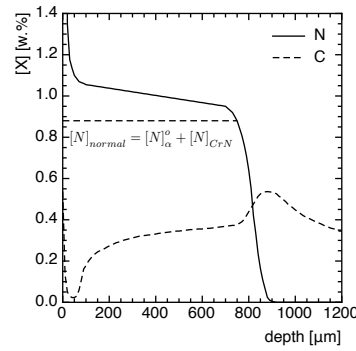
Microscopie électronique à balayage (MEB)



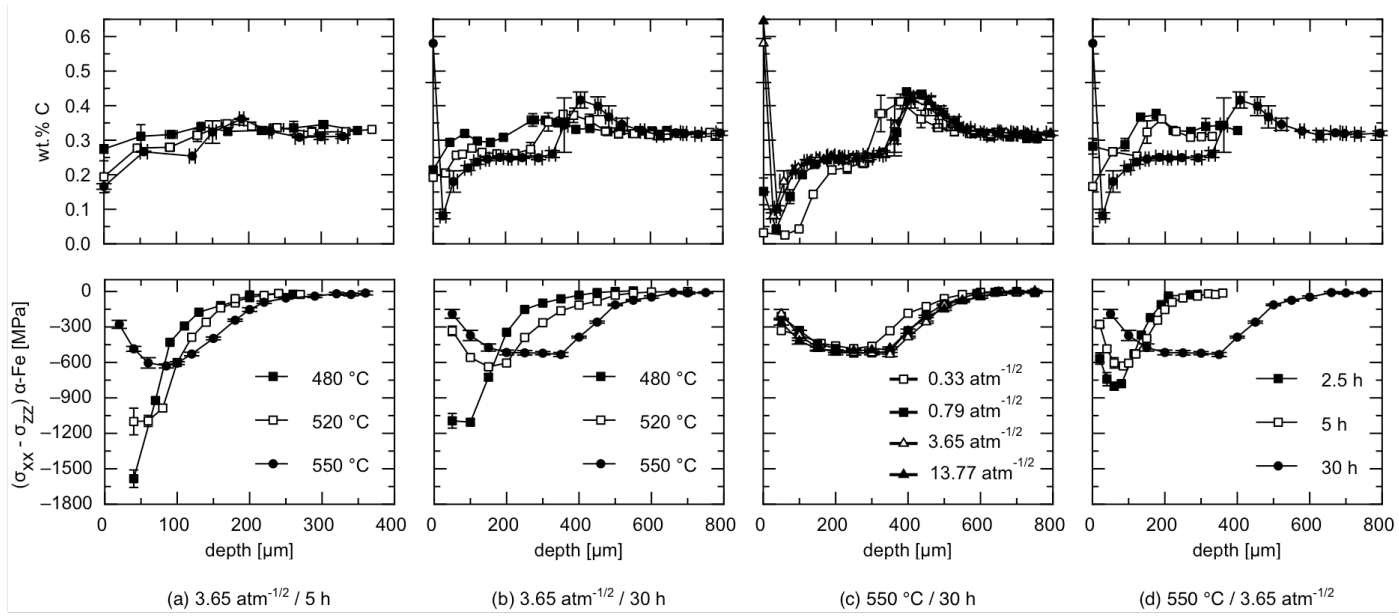
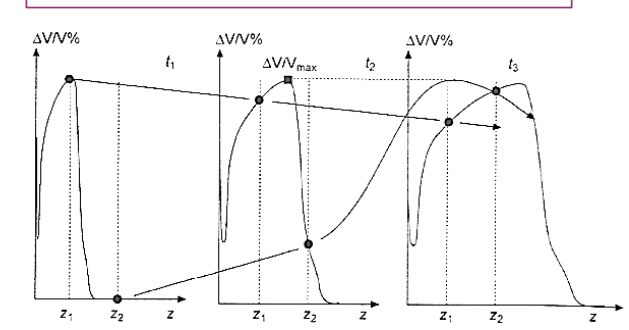
(a) $0,33 \text{ atm}^{-1/2}$ (b) $0,79 \text{ atm}^{-1/2}$ (c) $3,65 \text{ atm}^{-1/2}$ (d) $13,77 \text{ atm}^{-1/2}$
 33CrMoV12-9 (trempé-revenu)
 Nitration: 550 °C, 30h



Cinétique de diffusion



Cinétique de transformations de phases

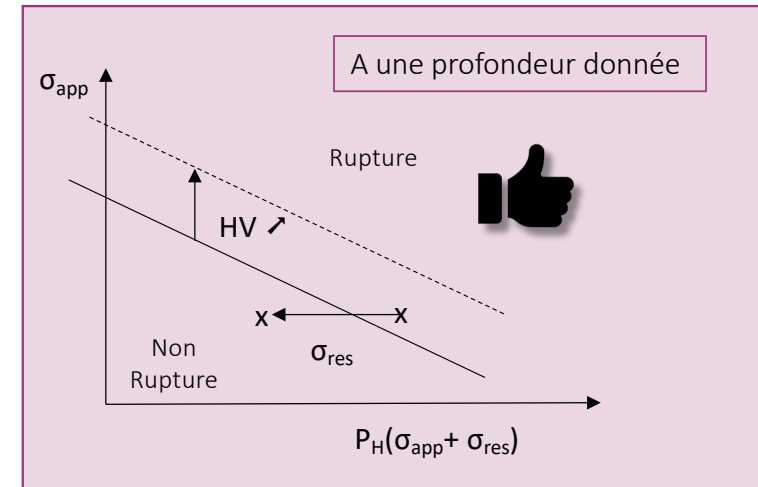
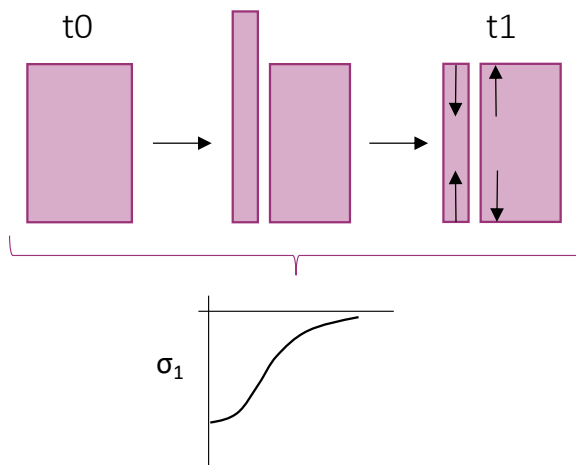


Jégou, 2009
 Fallot, 2015
 Barrallier, 2015
 Jégou, 2018

STABILITÉ DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Changement des déformations libres de contraintes ?

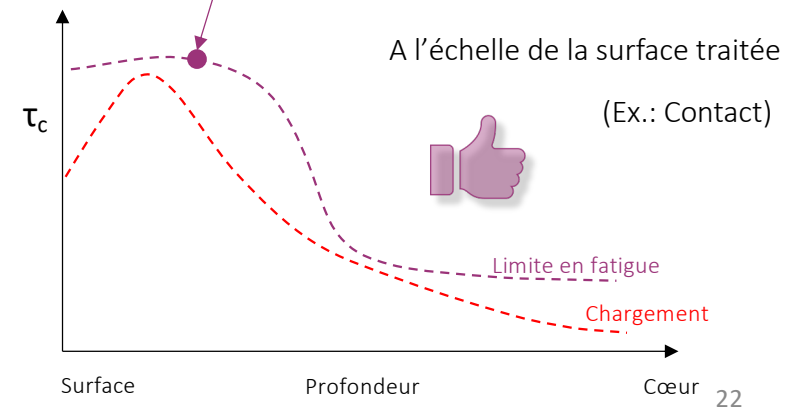
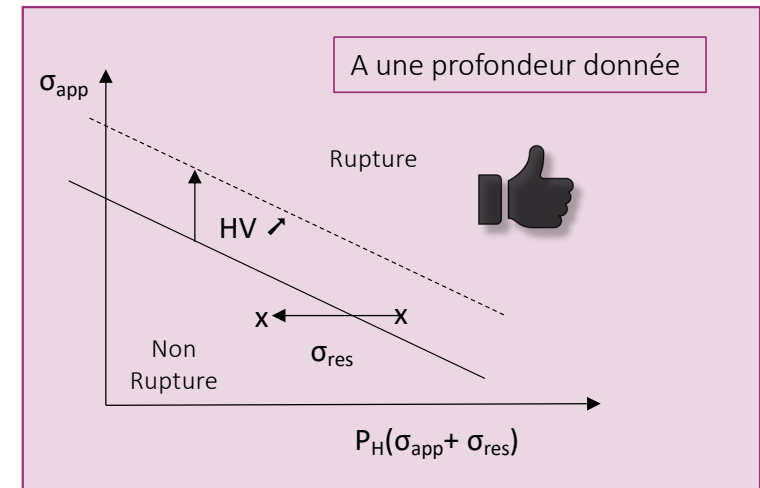
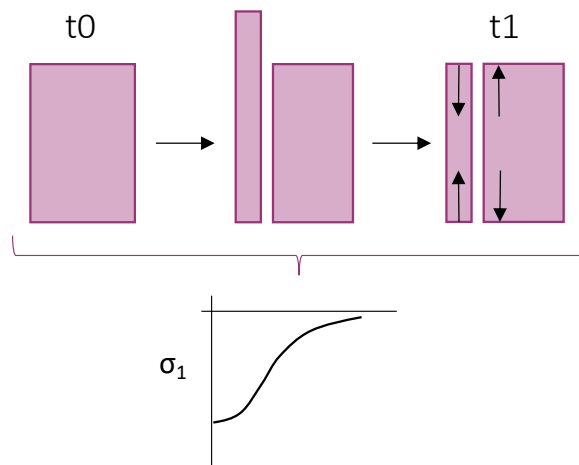
- Gradient de déformations libres de contraintes
 - Développement de contraintes résiduelles



STABILITÉ DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Changement des déformations libres de contraintes ?

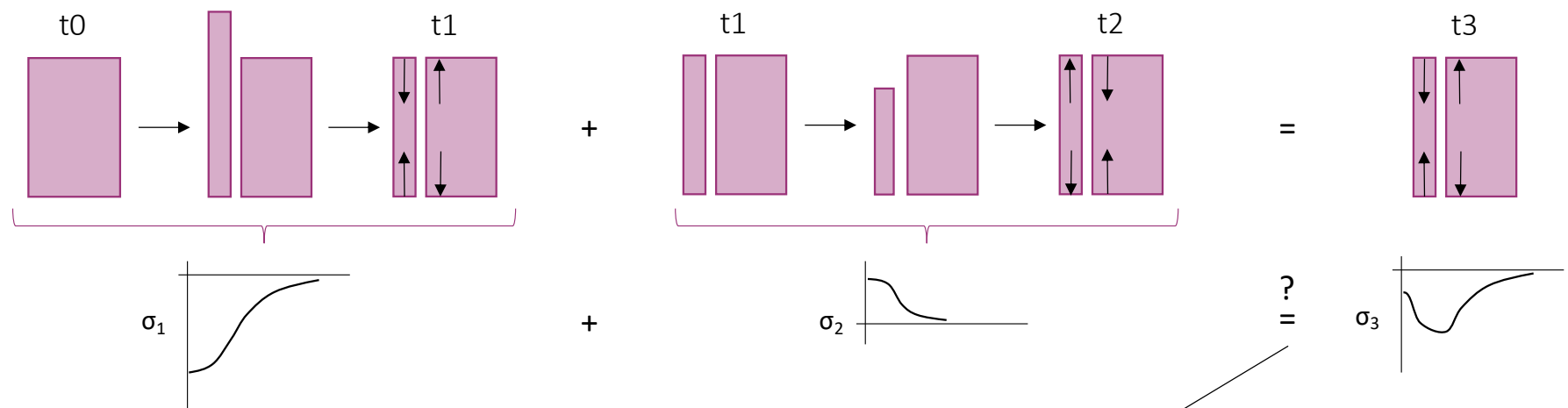
- Gradient de déformations libres de contraintes
 - Développement de contraintes résiduelles




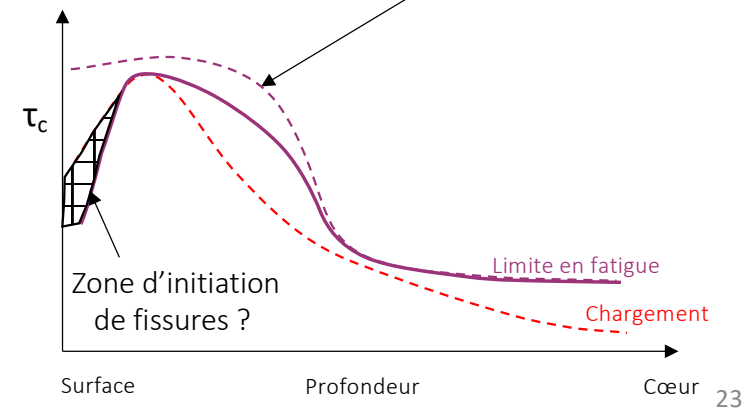
STABILITÉ DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Changement des déformations libres de contraintes ?

- Gradient de déformations libres de contraintes
 - Développement de contraintes résiduelles



- Relaxation/Evolution des contraintes résiduelles ?
 -  Changement des déformations libres de contraintes ?
 - Relaxation thermique
 - Relaxation mécanique



STABILITÉ DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Relaxation thermique: Cémentation des aciers de construction

- Evolution de la température
- Structure métastable ou susceptible d'évoluer ?
 - Martensite + Austénite résiduelle

Transformations de phases:

Martensite \rightarrow Ferrite + Carbures

Austénite \rightarrow Ferrite + Carbures

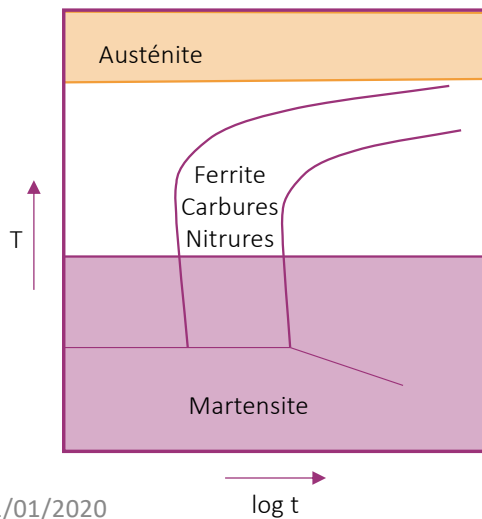
Austénite \rightarrow Martensite

$$\varepsilon_V < 0$$

$$\varepsilon_V > 0$$

$$\varepsilon_V > 0$$

- Gradient de déformations thermiques



21/01/2020

log t

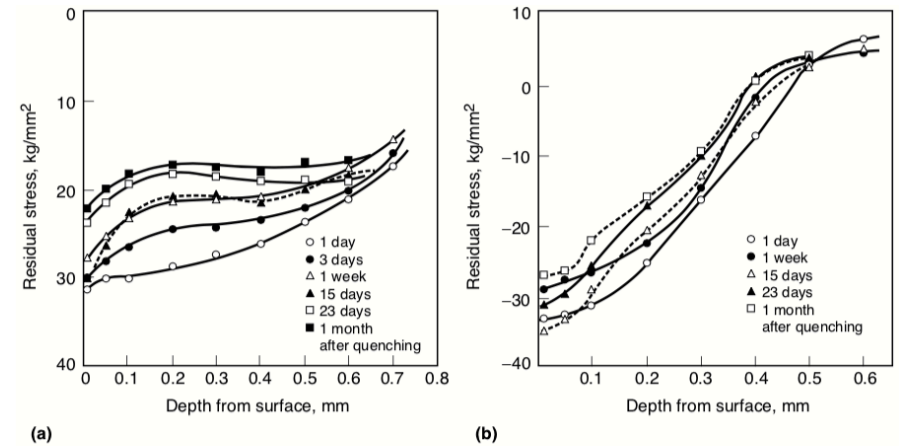


Fig. 33 Decrease of residual stress distribution due to aging. (a) AISI 1015 (S15CK) carbon steel. (b) AISI 8620 (JIS-SNC21) nickel-chromium steel. Source: Ref 31

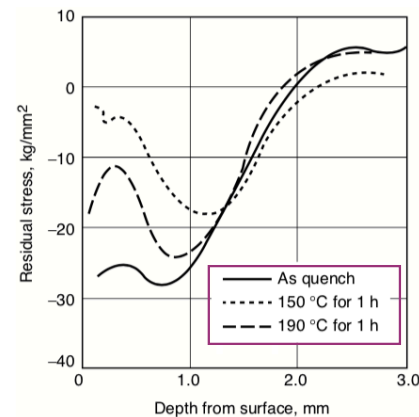


Fig. 34 Influence of tempering on longitudinal residual stress of gas-carburized AISI 8617 steel. Gas carburized and directly oil quenched AISI 8617 19 mm cylinder rod. Source: Ref 3 ASM, 2002

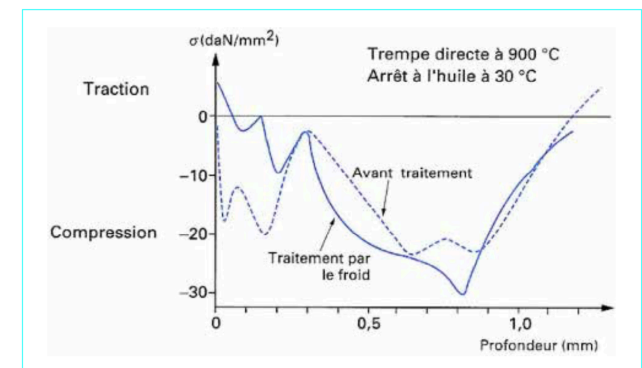
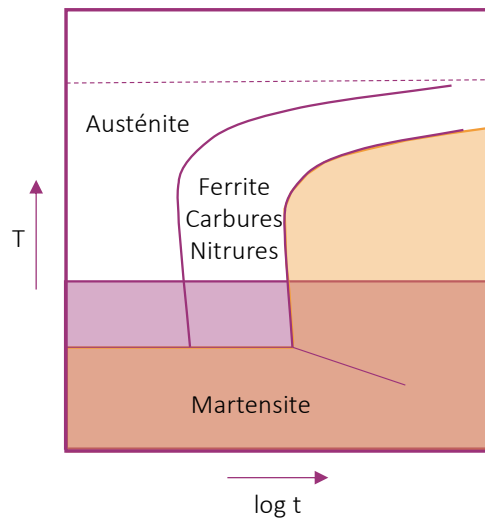


Figure 41 - Influence du traitement par le froid avant revenu sur le profil des contraintes résiduelles de couches cémentées d'épaisseur 0,8 mm et de teneur superficielle en carbone de 0,95 %

Muury, M1226, Editions T.I.

Relaxation thermique: Nitruration des aciers de construction

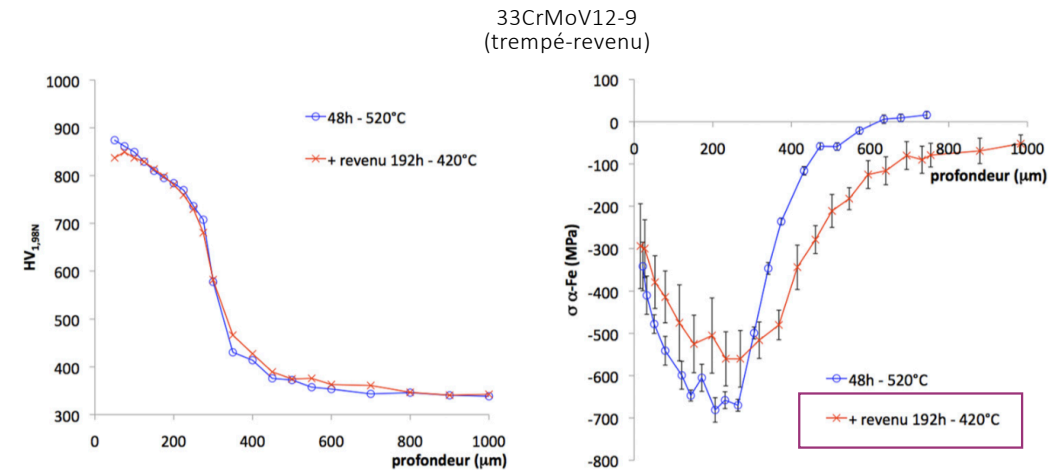
- Evolution de la température
- Structure métastable ou susceptible d'évoluer ?
 - Structure de type trempé-revenu
 - ☞ Structure en quasi-équilibre thermodynamique
 - ☞ Grande stabilité thermique
- Evolution de la précipitation
- ☞ Poursuite de la diffusion
- ☞ Modification des compositions chimiques



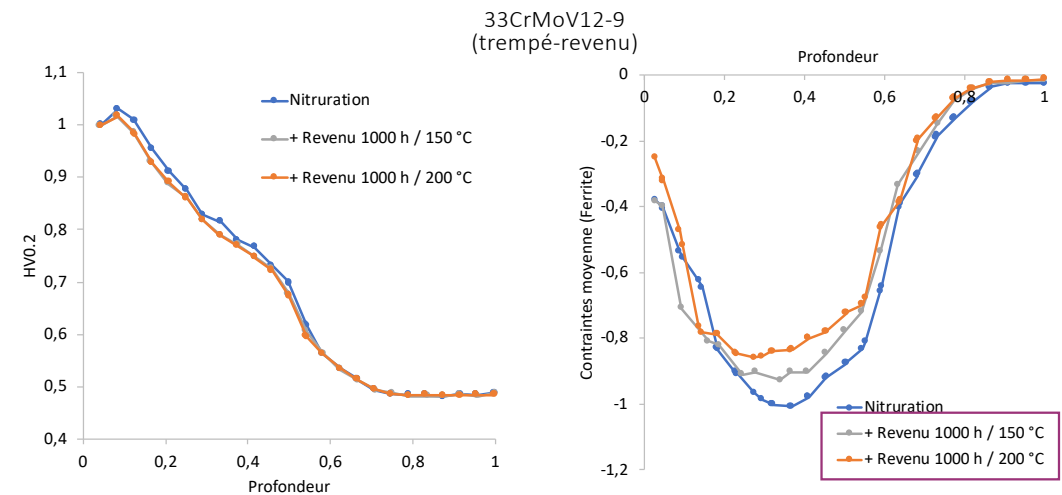
21/01/2020

log t

Aussois2020 - Jégou Ssébastien



Jégou, 2009



Weil, 2017

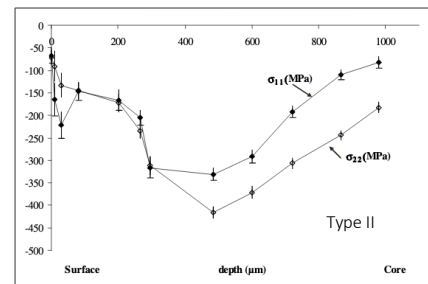
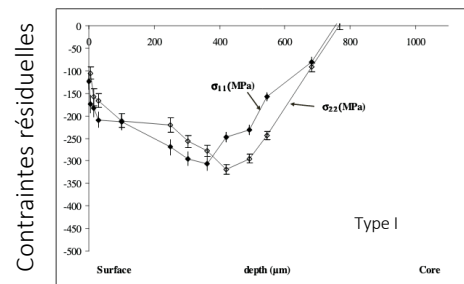
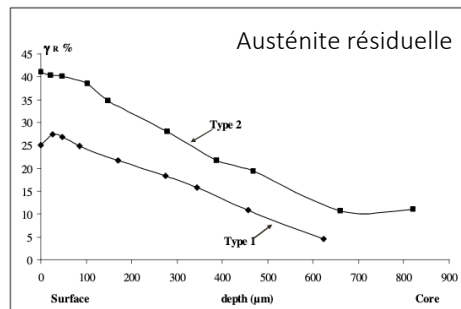
25

Relaxation mécanique: Cémentation des aciers de construction

14NiCr11

Chemical composition									
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
% masse	0.14	0.24	0.46	0.015	0.032	0.79	3.18	< 0.02	0.22

Type of treatment	Carburizing temperature on (°K)	Duration of carburization (s)	Temperature of preparing to the quenching (°K)	Duration (s)	Type of quenching
Type 1	1223	8460	1153	300	oil
Type 2	Cycle 1	1253	8460	1860	oil
	Cycle 2	1253	3120	1253	oil



STABILITÉ DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

Relaxation mécanique: Cémentation des aciers de construction

14NiCr11

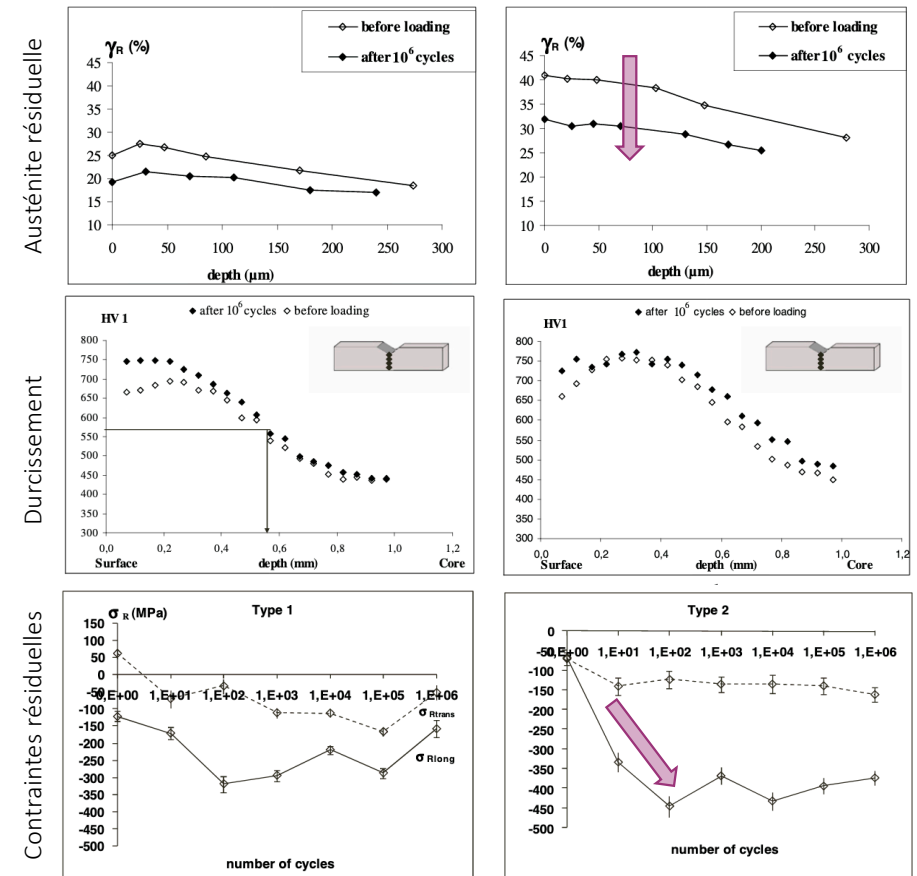
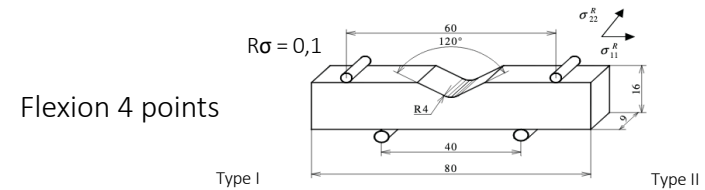
Chemical composition									
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
% masse	0.14	0.24	0.46	0.015	0.032	0.79	3.18	<0.02	0.22

Type of treatment	Carburizing temperature on (°K)	Duration of carburization (s)	Temperature of preparing to the quenching (°K)	Duration (s)	Type of quenching
Type 1	1223	8460	1153	300	oil
Type 2	Cycle 1	1253	8460	1860	oil
	Cycle 2	1253	3120	1800	oil

	Carburized layers characterization	Type 1	Type 2
Before loading	γ_{Rmax} (%)	25 (z=0)	41 (z=0)
	σ_{Rsurf} (MPa)	-269	-205
	HV _{surface} (HV0.1)	700	606
	e (mm)	0,5	0,55
After 10 ⁶ cycles of loading closer to endurance limit	$\gamma_{Rsurface}$ (%)	19	32
	$\sigma_{Rsurface}$ (MPa) stabilized (in martensite)	-321	-465
	$\sigma_{Rsurface}$ (MPa) stabilized (in retained austenite)	-250	-250
	HV _{surface} (HV0.1)	735	744
	$\Delta\sigma_D$ (MPa)	1085	1190
	Improvement (%)	62	78

Jeddi, 2010

21/01/2020

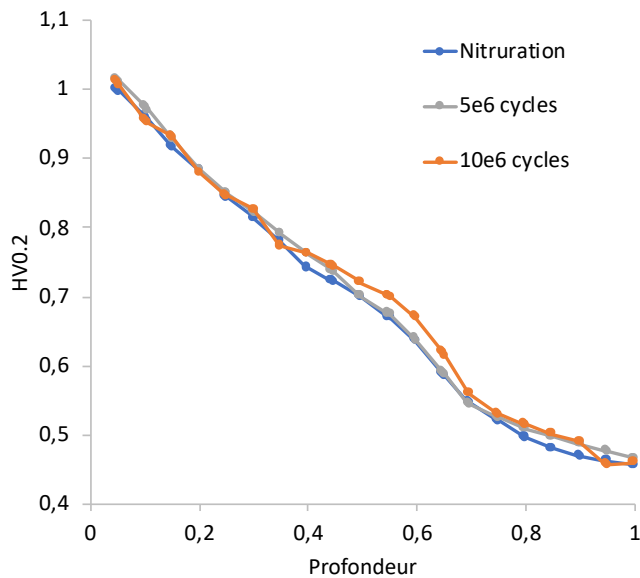
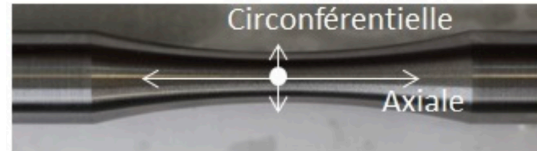


Aussois2020 - Jégou Sébastien

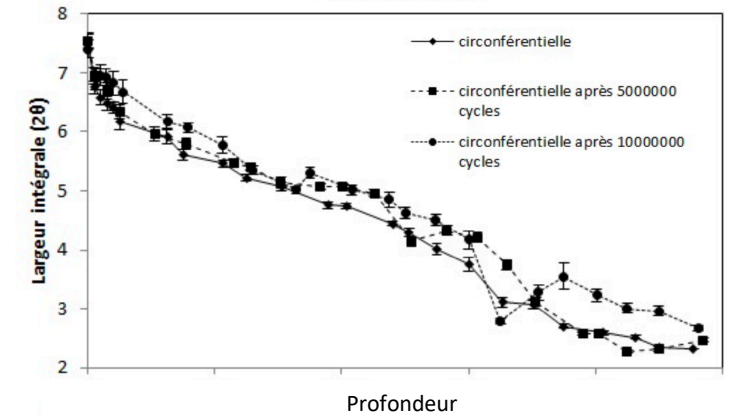
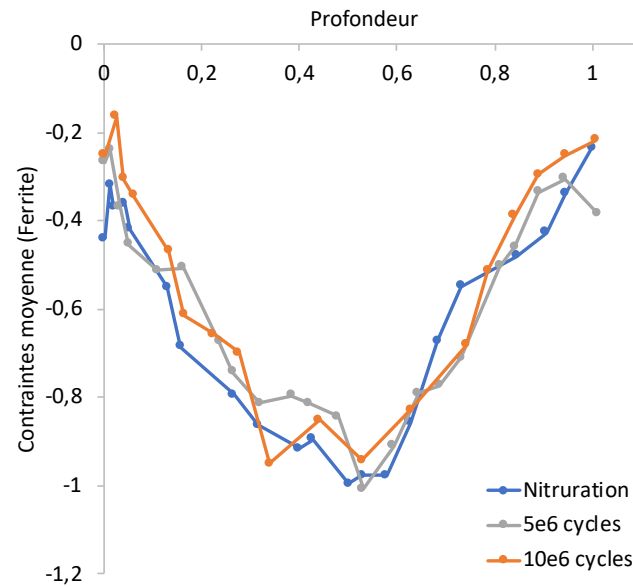
27

Relaxation mécanique: Nitruration des aciers de construction

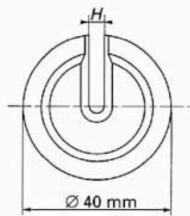
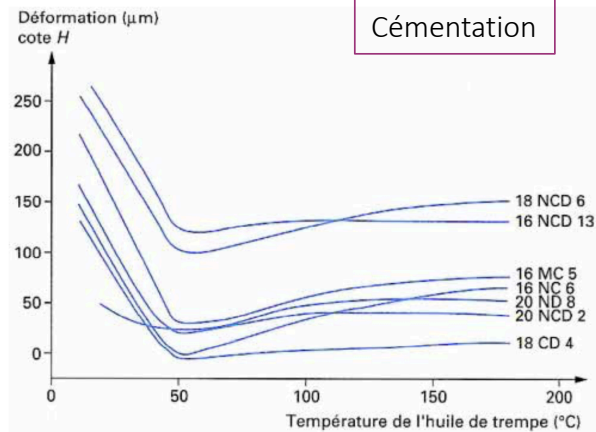
- 33CrMoV12-9
- Trempé-revenu-Nitruré
- Flexion rotative



Weil, 2017

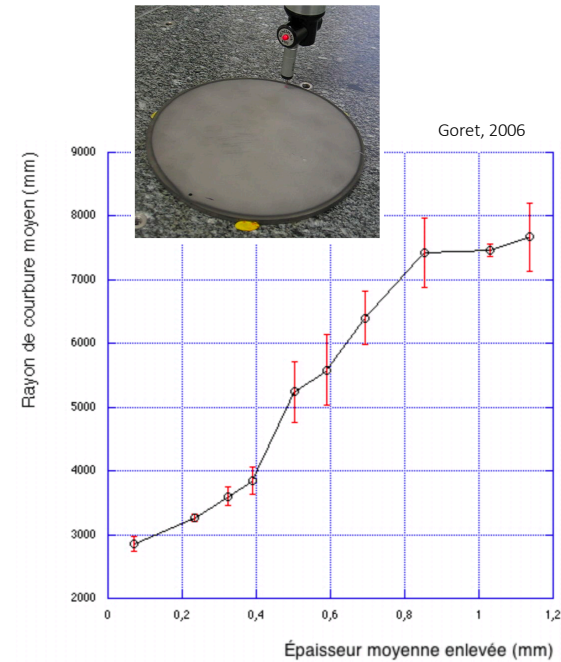


- Aucune évolution à l'échelle macro/pseudo-macro
- Identification des concentrateurs de contraintes au sein de la microstructure
→ (Le, 2017), (F.Godet, 2018)



La déformation mesurée correspond à l'ouverture de la fente de largeur H de l'éprouvette d'essai. A l'instant initial $H = 5 \pm 0,01$ mm

Lacoude, 1972

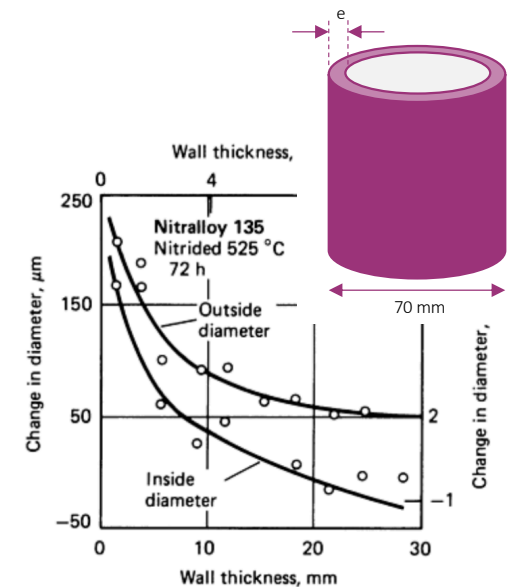


→ Modélisation multiphysique:

- Diffusion
- Transformations de phases (bases de données)
- Modèles mécaniques
- 3D

→ Optimisation des temps de calculs !

Nituration

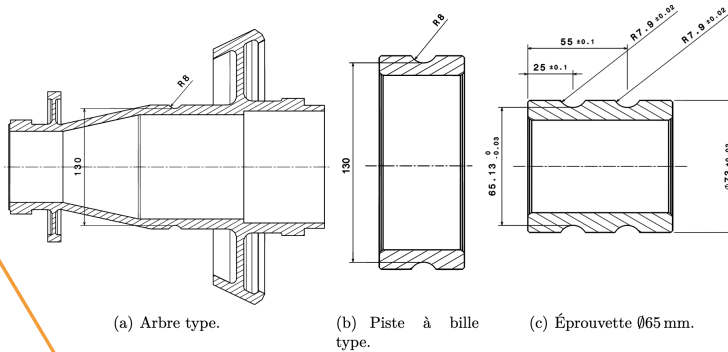
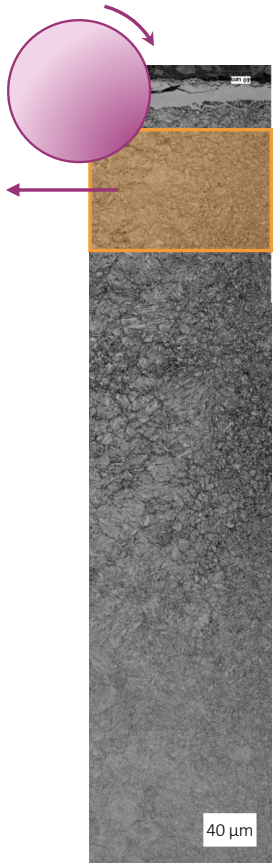


ASM, 2004

Enlèvement de matière : nitruration des aciers de construction

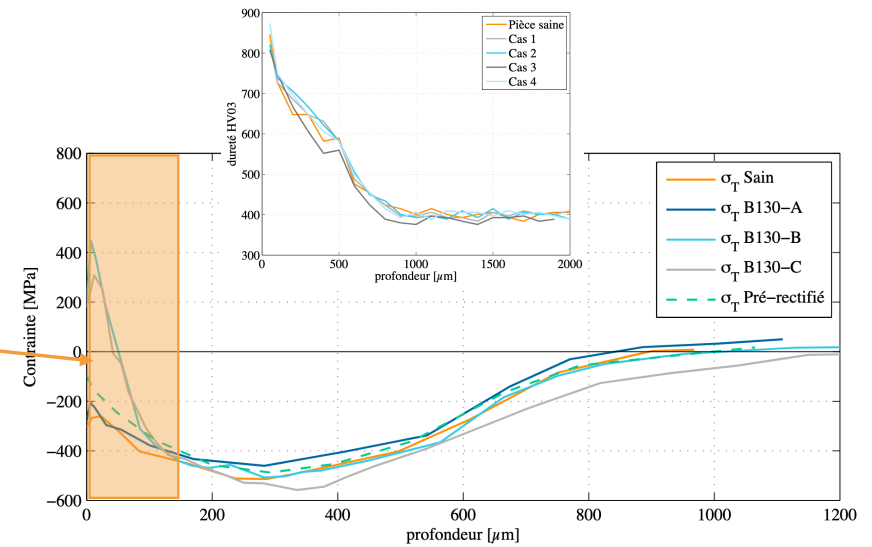
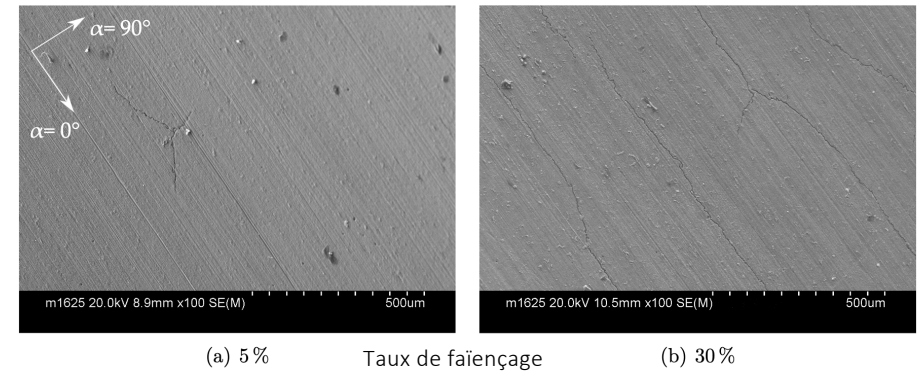
Rectification

- 33CrMoV12-9 Trempé-revenu



Usinage = Déformations

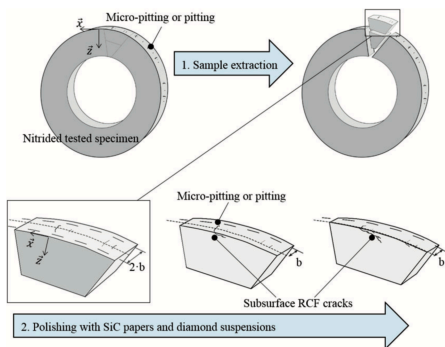
- Plastique
- Thermique



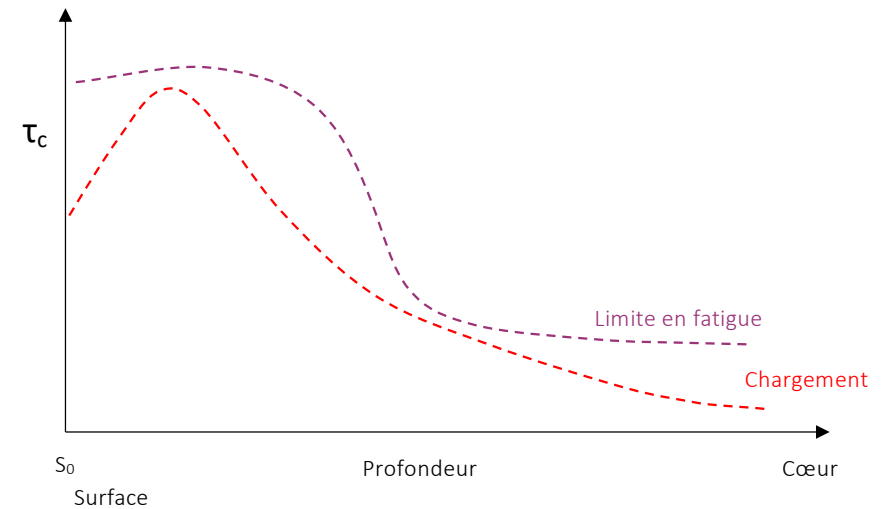
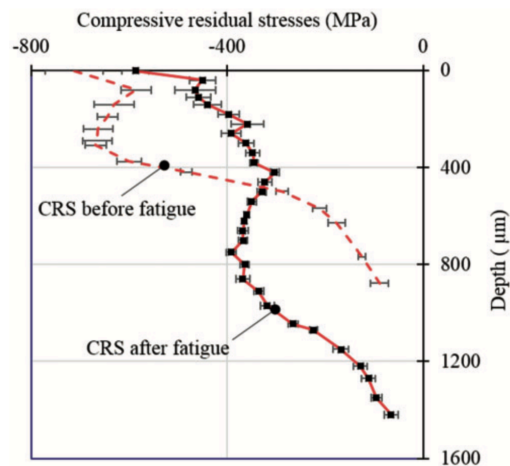
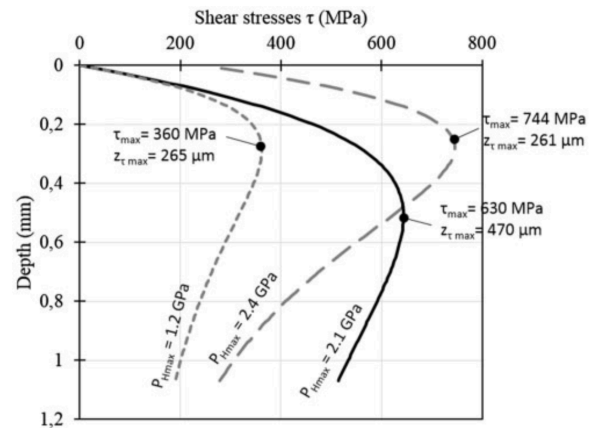
Van Robaeys, 2015

Nituration des aciers de construction

Fatigue de contact

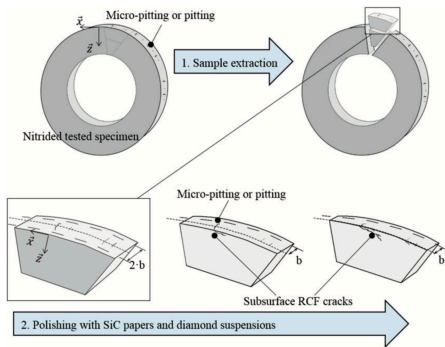


Le, 2017

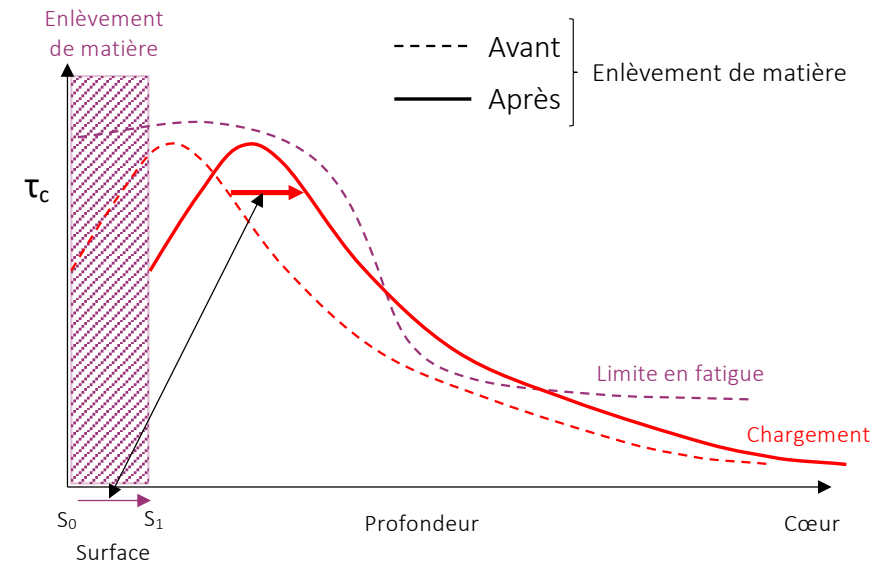
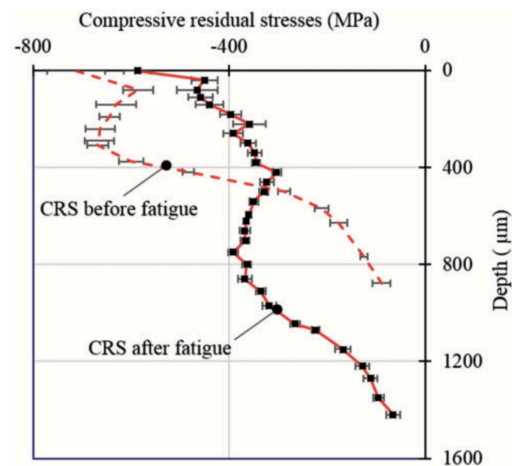
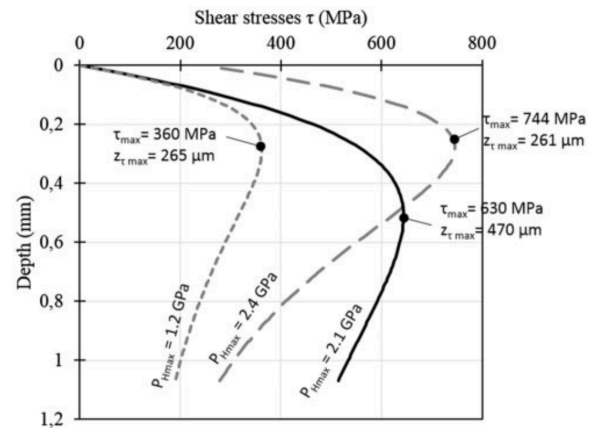


Nitruration des aciers de construction

Fatigue de contact

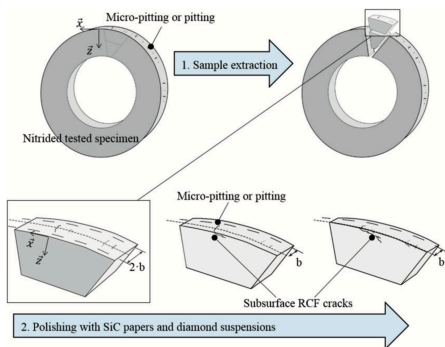


Le, 2017

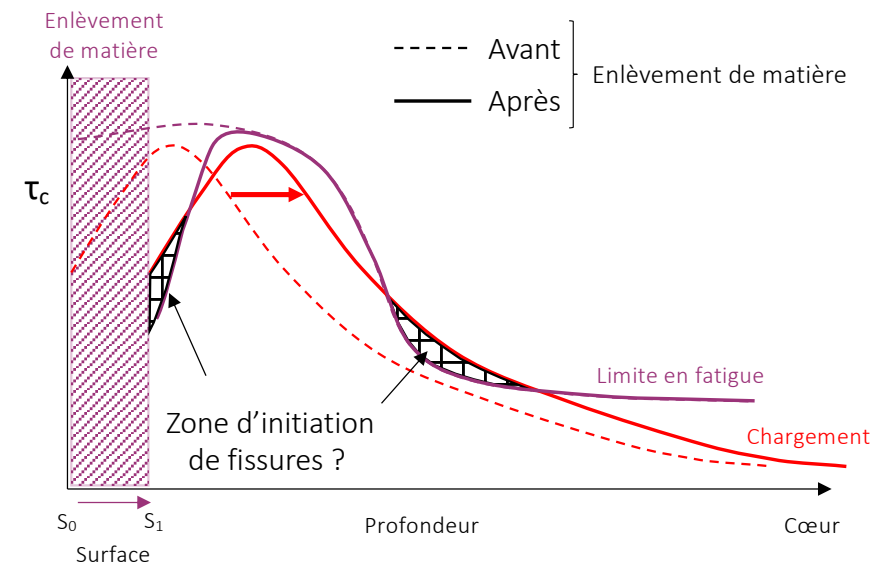
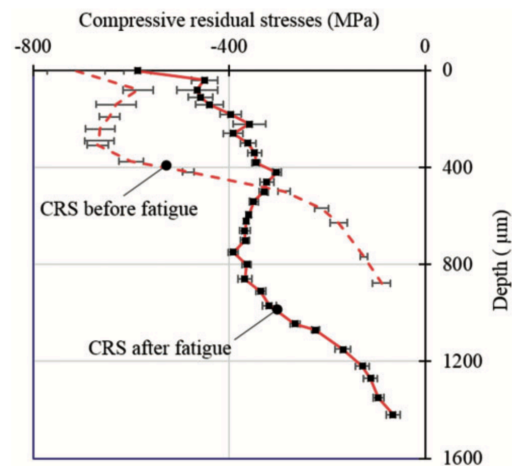
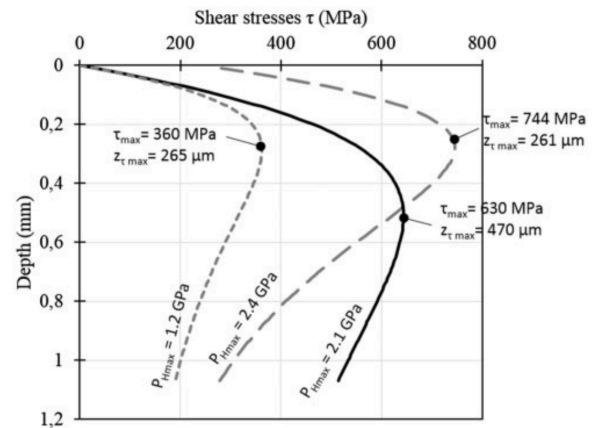


Nitruration des aciers de construction

Fatigue de contact

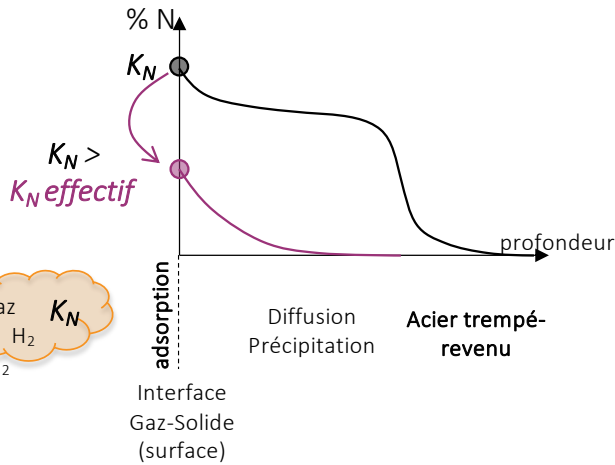
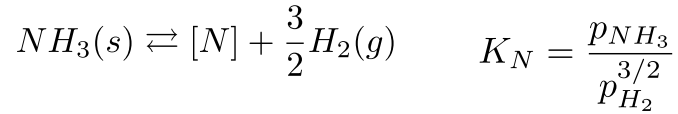


Le, 2017

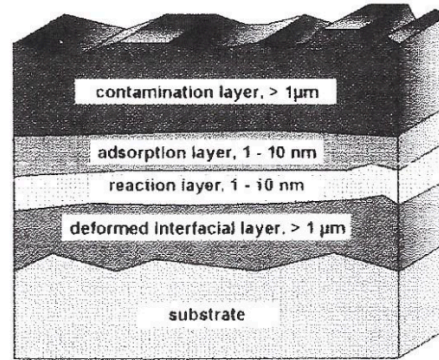


⚠ → Tolérance d'usage

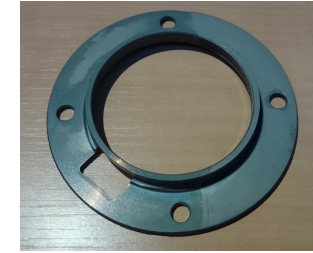
Homogénéité des surfaces traitées: Nitruration des aciers de construction



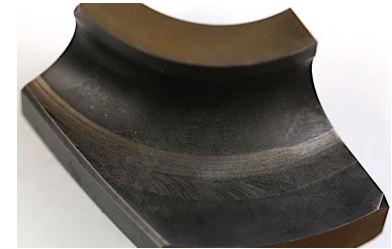
Gaz NH_3 , H_2 , N_2 K_N



Irretier, 1996

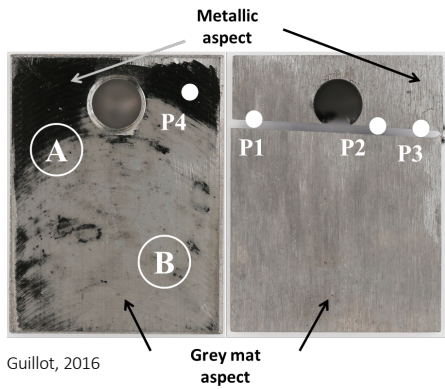


Bodycote

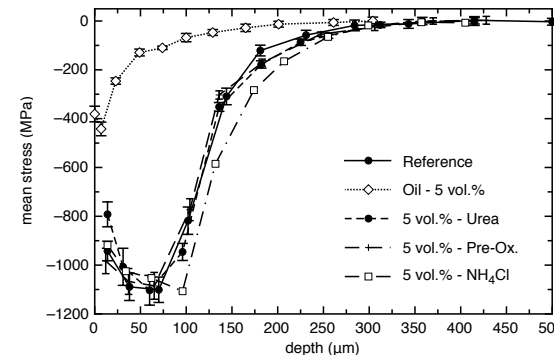
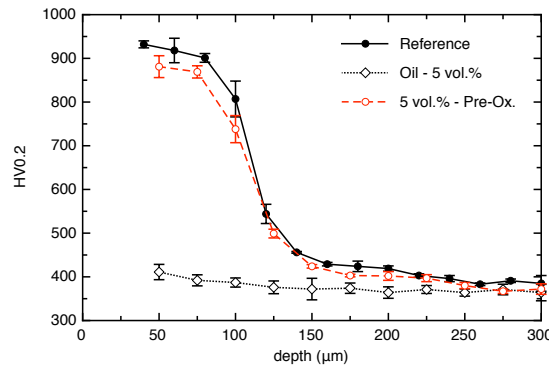


Airbus Helicopters

- Points "doux"
- "Manque" de nitruration
- Surface hétérogène (dans le plan !)
→ Concentrateurs de contraintes
→ Endommagement accéléré



Guillot, 2016



- Nettoyage:
- Bains chimiques
 - Sablage
 - Dépôts (oxydation, phosphatation)

Généralité - Couplage auto-induit

Nitruration/Cémentation des aciers inox austénitiques

$$1^{\text{ère}} \text{ loi de Fick: } J = -M_N c_N \frac{\partial \mu_N}{\partial z} = -\frac{D_N c_N}{RT} \frac{\partial \mu_N}{\partial z}$$

$$\mu_N(T, a_N, \sigma_H) = \mu_{N,0} + RT \ln(a_N) - V_N \sigma_H$$

$$2^{\text{ième}} \text{ loi de Fick: } \frac{\partial c_N}{\partial t} = -D_N \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial c_N}{\partial z} + \frac{c_N V_N}{RT} \frac{\partial \sigma_H}{\partial z} \right)$$

(D_N indépendant de la concentration et des contraintes)

Force motrice

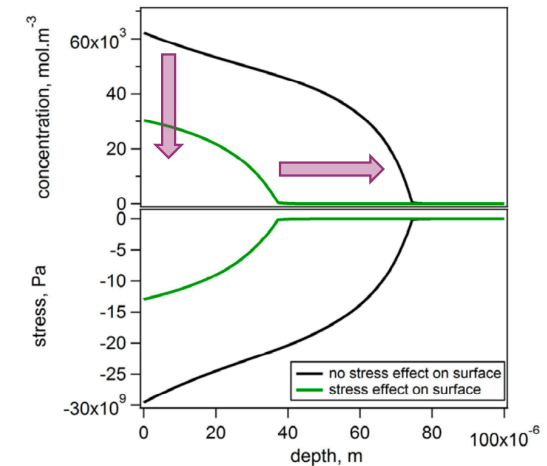
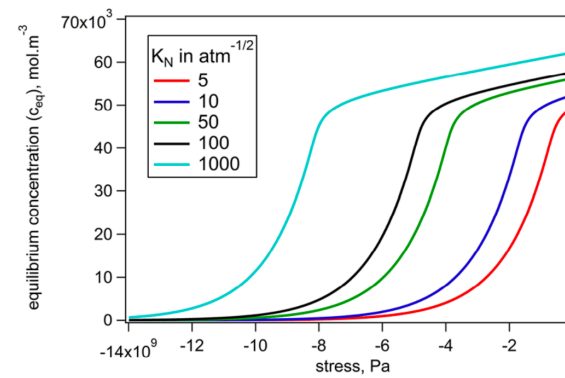
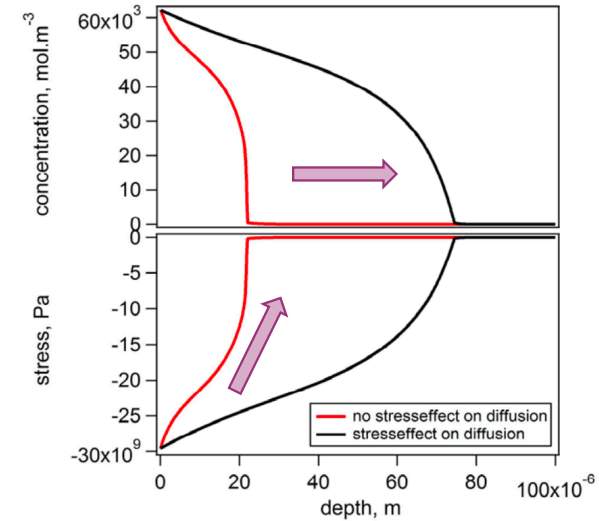
$$\text{div} \sigma_{ij} = 0$$

$$\epsilon_{ij}^{\text{tot}} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^l = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} + c_N \eta_{ij} \cdot \delta_{ij} + \epsilon_{ij}^p$$

En surface: $J_N^s = k (c_N^{eq} - c_N^s)$

$$\frac{\partial c_N^s}{\partial t} = -\frac{\partial J_N^s}{\partial t} = -\left(\frac{\partial J}{\partial z} - \frac{\partial J_N^{\text{diss.}}}{\partial z} \right)$$

Gaz



Généralité - Couplage auto-induit

Nitruration des aciers de construction

$$1^{\text{ère}} \text{ loi de Fick: } J = -M_N c_N \frac{\partial \mu_N}{\partial z} = -\frac{D_N c_N}{RT} \frac{\partial \mu_N}{\partial z}$$

$$\mu_N(T, a_N, \sigma_H) = \mu_{N,0} + RT \ln(a_N) - V_N \sigma_H$$

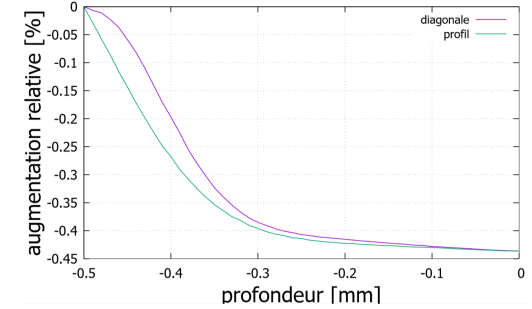
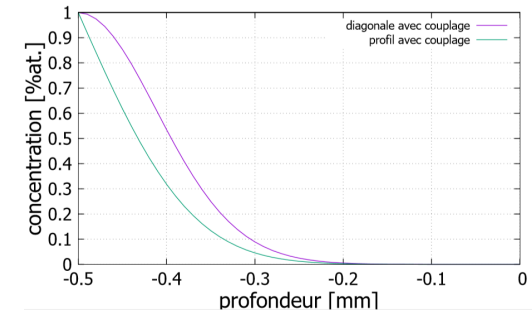
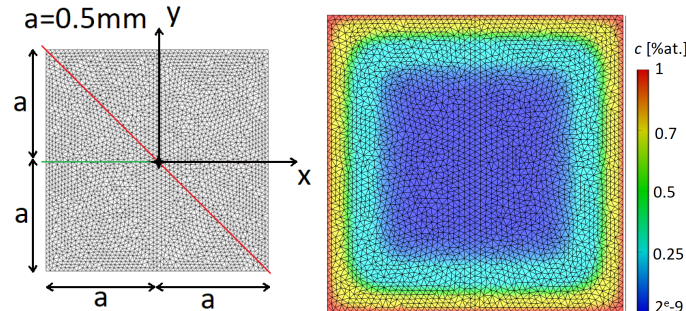
$$2^{\text{ème}} \text{ loi de Fick: } \frac{\partial c_N}{\partial t} = -D_N \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial c_N}{\partial z} + \frac{c_N}{RT} V_N \frac{\partial \sigma_H}{\partial z} \right)$$

(D_N indépendant de la concentration et des contraintes)

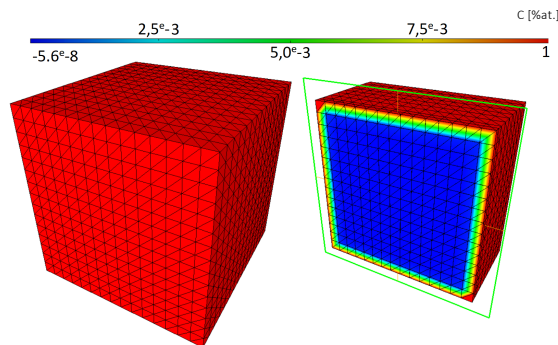
$$\text{div} \sigma_{ij} = 0$$

$$\epsilon_{ij}^{\text{tot}} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^l = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} + c_N \eta_{ij} \cdot \delta_{ij} + \epsilon_{ij}^p$$

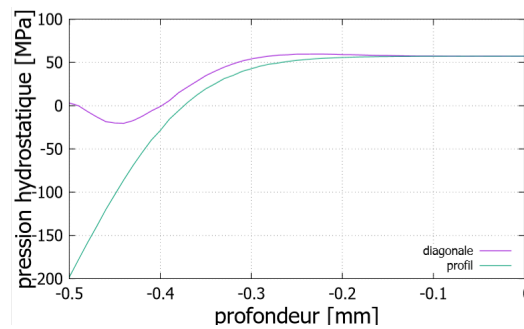
Modélisation 3D: FreeFEM++



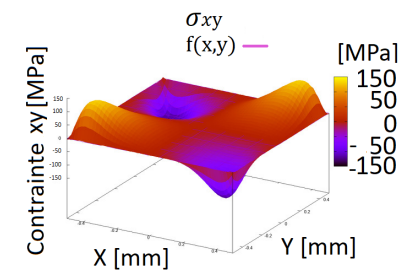
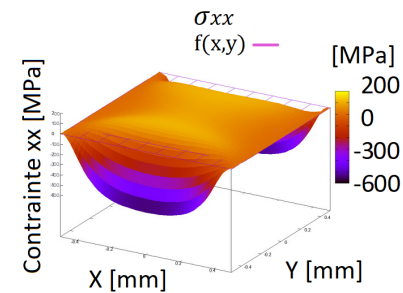
Poster: GERMAIN Lisa, 2020



21/01/2020

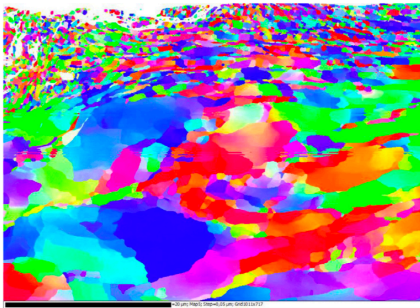


Aussois2020 - Jégou Ssébastian



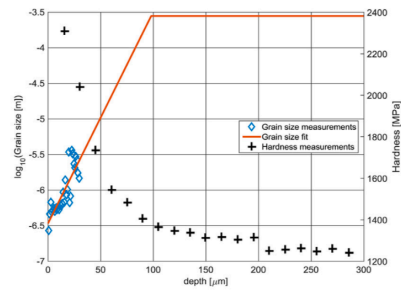
36

Nanopeening + Nitruration des aciers

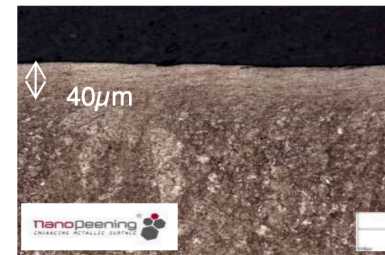
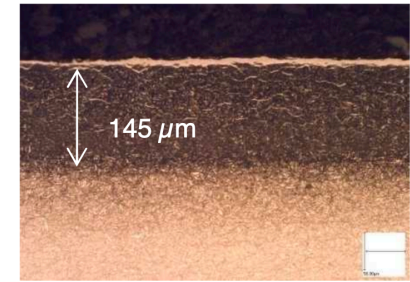


Lacaille, 2014

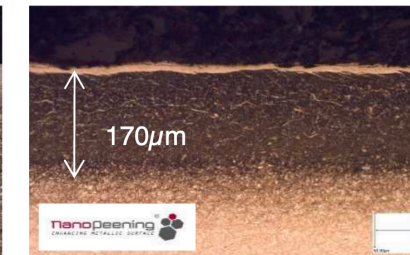
(a) EBSD view



(b) Grain size and hardness measurements



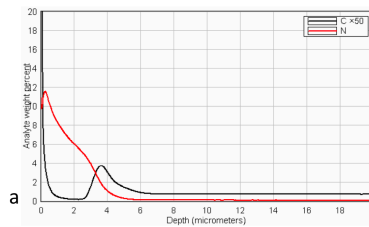
x200



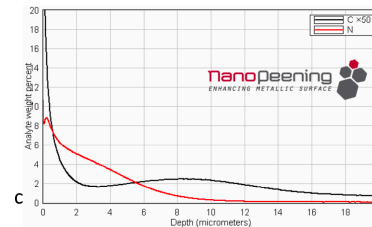
X37CrMoV5 – Nitruration gazeuse à 520° C

de Lavernhe, 2014

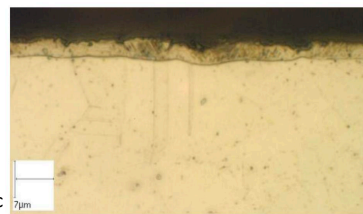
304L, nitruration plasma



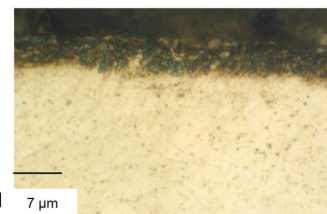
a



c



c

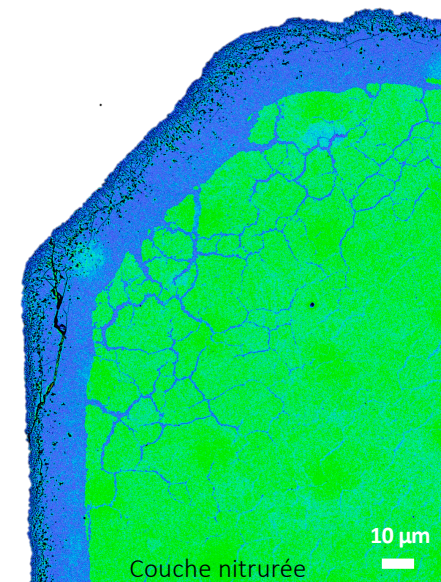


d

Prezeau, 2011

- Effet de la nano structuration des grains
 - Court-circuit de diffusion
- Gradient de contraintes résiduelles ?

- Les **TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES** génèrent des **CONTRAINTES RÉSIDUELLES** suite à des **gradients** de:
 - **Déformations volumiques** : transformations de phases
 - **Déformations thermiques** : coefficients de dilatation thermique
 - Couplage
 - **DESIGN MÉTALLURGIQUE**
 - Comprendre l'**ÉVOLUTION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES** et des propriétés mécaniques:
 - Origine / Changement des déformations libres de contraintes ?
 - Connaître l'**HISTOIRE MÉTALLURGIQUE EN TOUT POINT DE LA SURFACE**
 - Caractérisations:
 - cinétique de diffusion (atomique et thermique)
 - cinétique de transformations de phases
 - suivre les contraintes résiduelles < par phases < en surface < en sous-couche < in-situ
 - Modélisations:
 - aide à l'identification des mécanismes mis en jeu
 - découplage des déformations libres de contraintes
- ⚠ Comprendre l'histoire métallurgique d'un traitement thermochimique:
- Suivre la réponse du procédé en termes de contraintes résiduelles





Arts Sciences et
Technologies
et Métiers



ARTSETMETIERS.FR



MSMP
Mechanics, Surfaces
and Materials Processing

Dr.JÉGOU Sébastien
Associate Professor
sebastien.jegou@ensam.eu
+33 (0) 4 42 93 81 14

 msmp.eu

+33 (0) 4 42 93 81 14

+33 (0) 4 42 93 81 15

8, bd Louis XIV
59046 Lille

Rue Saint Dominique BP 508
51006 Châlons-en-Champagne

2, cours des Arts et Métiers
13617 Aix-en-Provence

Merci de votre
attention !

