

Récents progrès en traitements et revêtements de surface destinés aux dispositifs de fonderie de l'aluminium, y compris les multicouches

Pierre D'Ans, Mohamed Bakrim (),
Marc Degrez*

Matériaux 2010

Nantes, le 18 octobre 2010

(*) ALM Industry s.a.

Plan de l'exposé

Introduction

Sollicitations des dispositifs de fonderie

- Interaction chimique
- Interaction thermomécanique
- (Autres sollicitations)

Traitements de surface

- Monotraitements
- Multitraitements

Conclusions

Introduction

Fonderie de l'aluminium

- Moulage par gravité ou basse pression
- Moulage par injection
 - Arrêt de production pénalisant
 - Cadence

Acier à outils pour travail à chaud (H13)

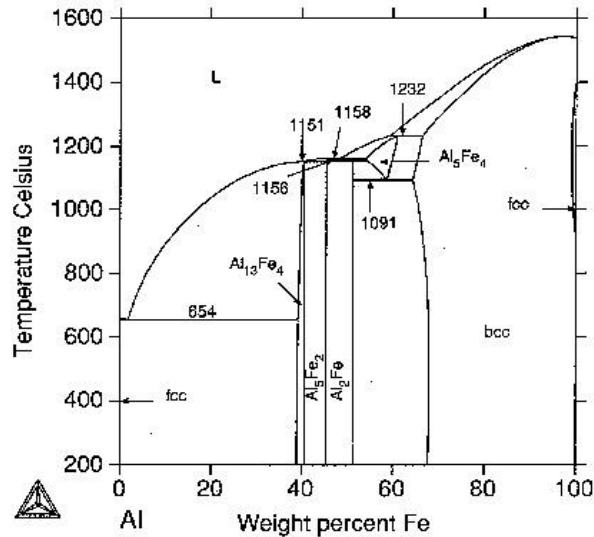
- Utilisé à l'état de martensite revenue après traitement thermique *ad hoc*

Poteyage

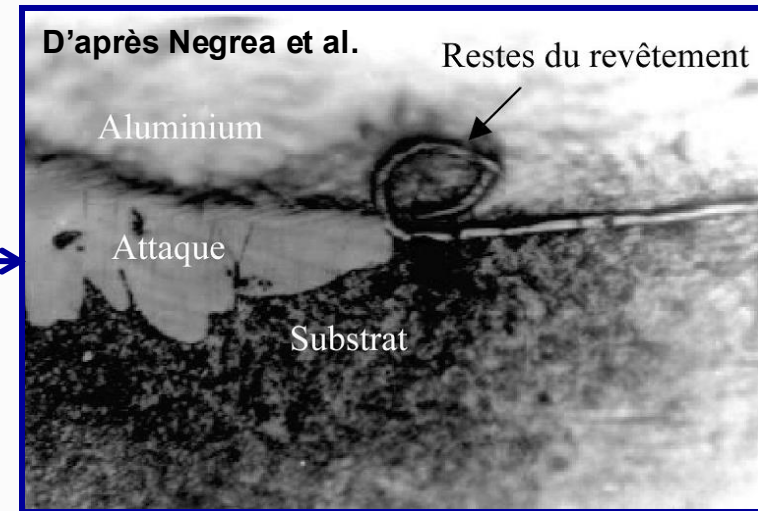
- Nécessité de passer à des traitements permanents

Interaction chimique

Binary Alloys Phase Diagrams, Massalski



« Soldering »

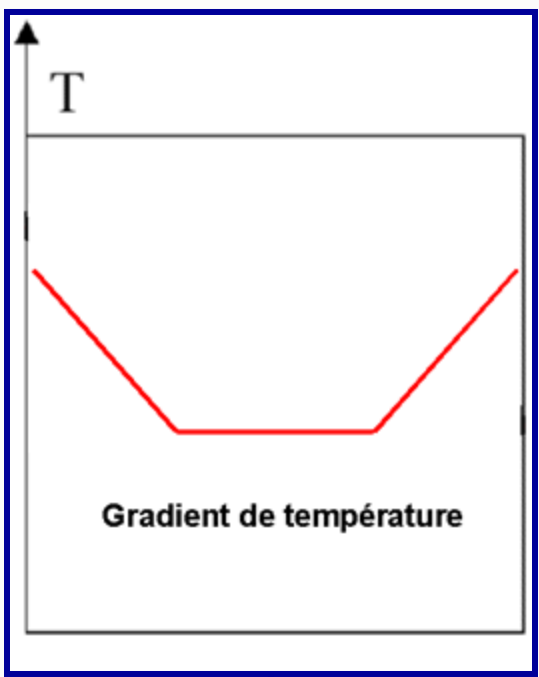


Complicque le démoulage

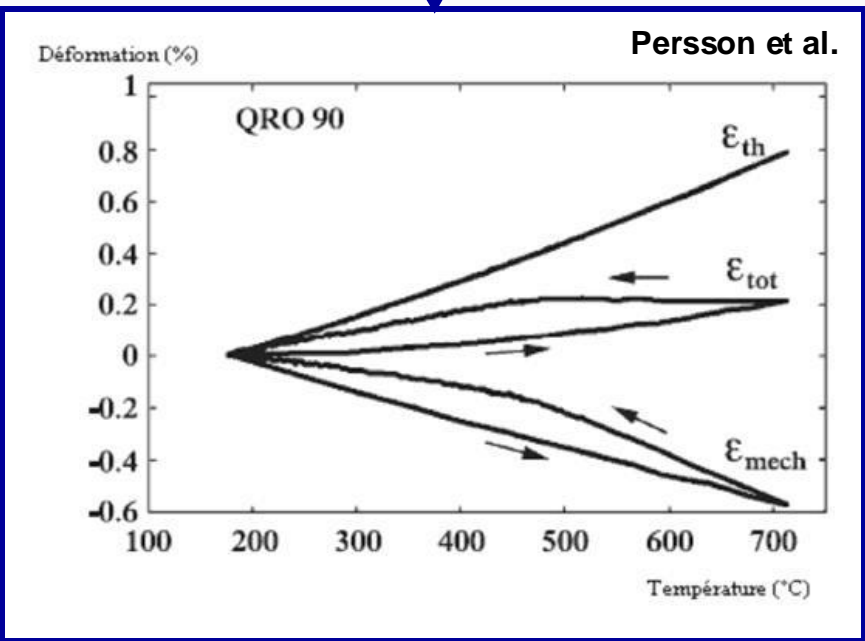
Connaissance « au cas par cas » des facteurs aggravants et des remèdes :

- Effet de la nuance de l'acier et de la composition de l'alliage d'aluminium
- Effet de la géométrie et de la vitesse de l'écoulement (renouvellement réactifs)
- Effet de la température de l'interface acier - aluminium
- Pour certaines pièces, remplacer l'acier par une céramique

Interaction thermomécanique

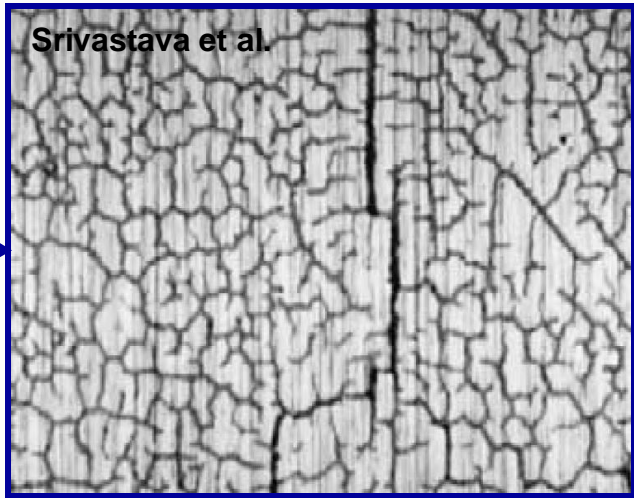


- Cycles thermiques
- Traction – compression (cas d'un monomatériau)
- Fatigue de surface
- « Faiençage » = craquelures

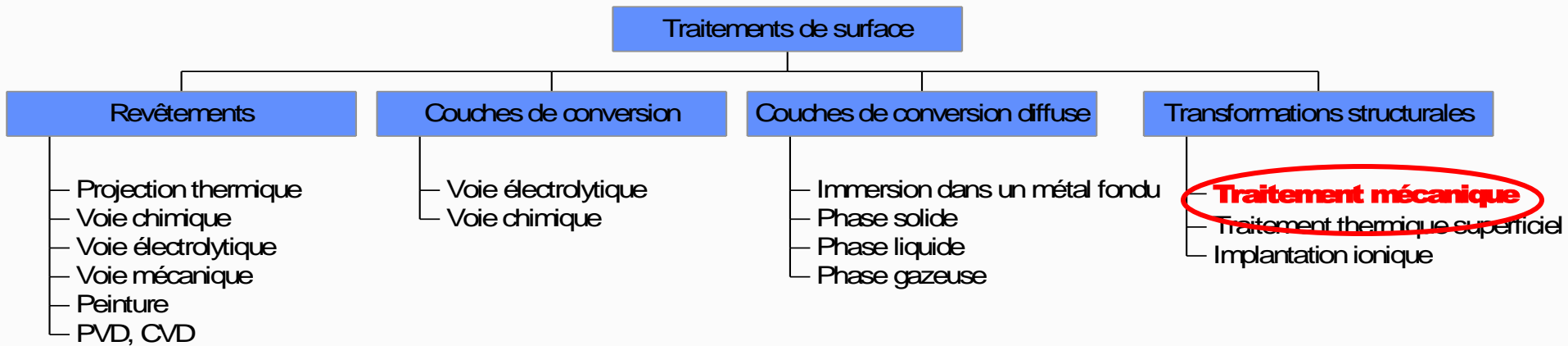


$$\Delta \epsilon = M \cdot N_f^z + \frac{G}{E} N_f^\gamma$$

(Coffin-Manson)



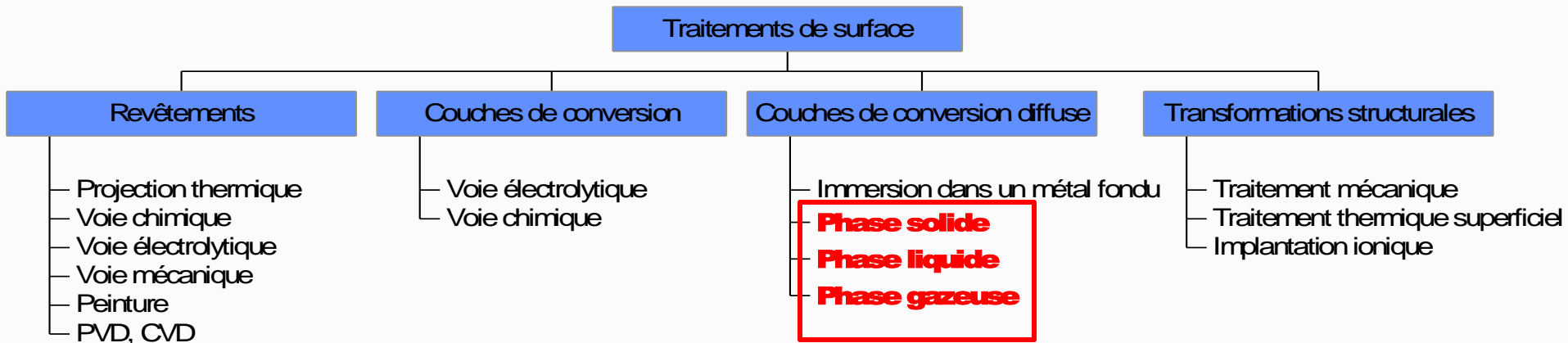
Monotraitements de surface



Grenailage de précontrainte :

- Mise en compression de la surface
- Tenue à la fatigue
- Limité par la température élevée des cycles

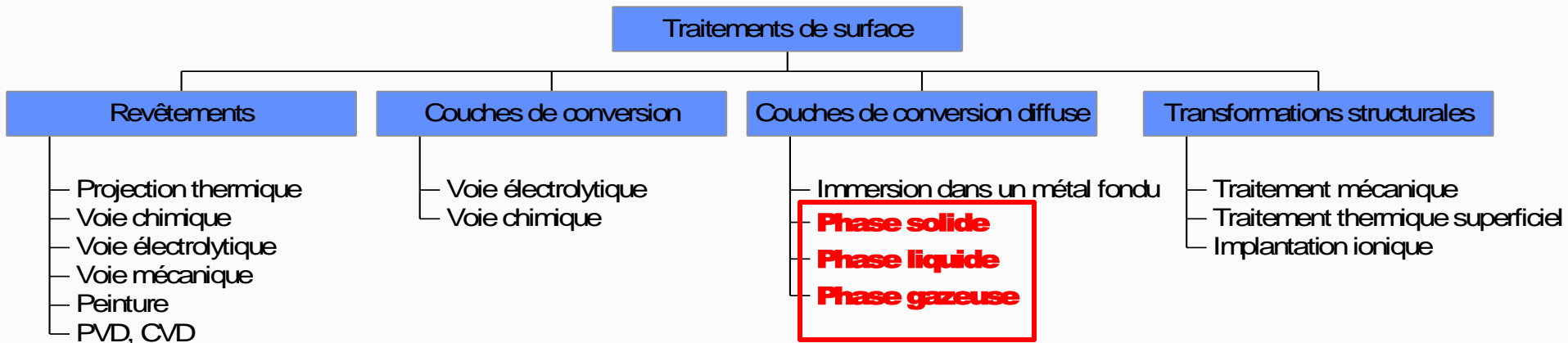
Monotraitements de surface



Nitruration :

- Mise en solution de N en surface de l'acier
- Couche dite « blanche », fragile
- Amélioration limitée de la résistance à l'aluminium fondu (Molinari et al.)
- Fatigue thermique = f(couche blanche) (Pellizzari et al.)

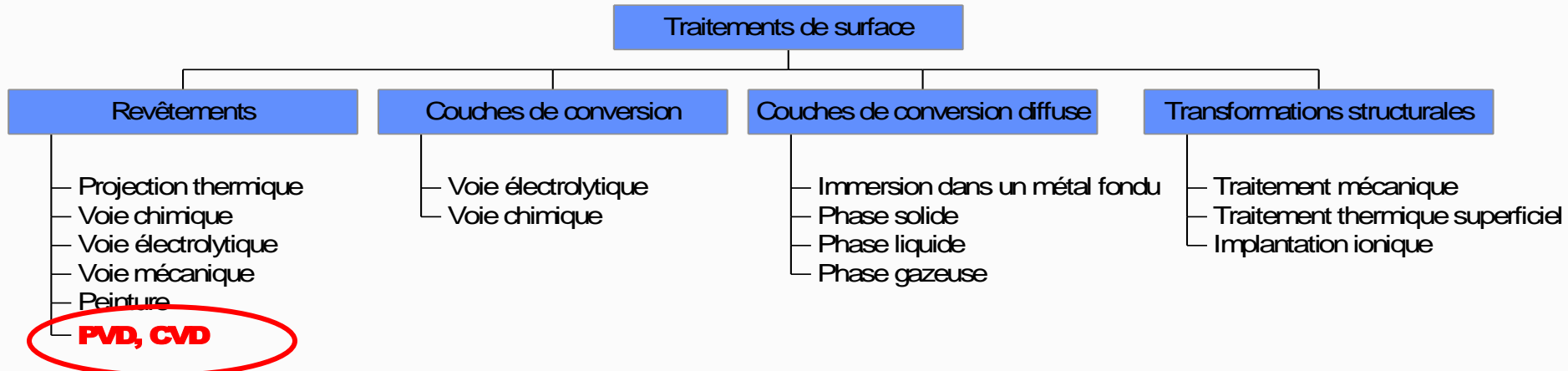
Monotraitements de surface



Boruration :

- Mise en solution de B dans l'acier → précipitation FeB (fragile) et/ou Fe₂B
- Couche > 100 μm, tenue remarquable à la corrosion par l'aluminium fondu en conditions statiques (> 120 h)(Tsipas et al.)
- Médiocre si variations thermiques (Hairy)

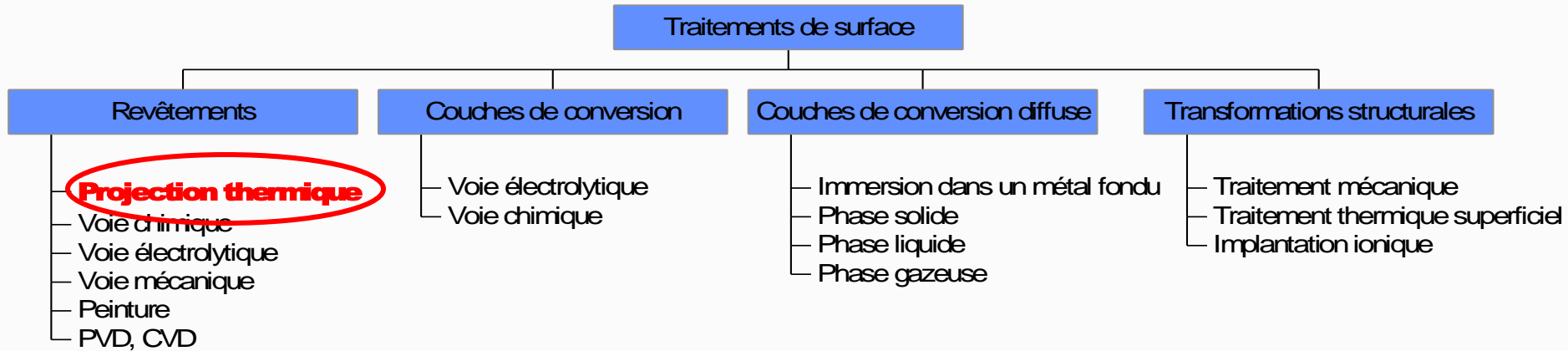
Monotraitement de surface



Revêtement par déposition physique en phase vapeur :

- Très nombreuses études de laboratoire depuis 15 ans, nombreux matériaux testés :
 - Nitrures : TiN, CrN, ...
 - Carbures : B₄C, CrC.
- Tenue à la corrosion par l'aluminium :
 - Dépend de la composition : meilleure pour les nitrures.
 - Dépendante de la continuité du dépôt. Corrosion « localisée » possible.
 - Dépendante de la contrainte dans la couche en fonction de la température.
 - Importance de la mouillabilité.
- Tenue au frottement :
 - Proposés : (Ti, Al)N, CrN, (Cr,Al)N (Lugscheider, Pellizzari)
- Tenue à la fatigue thermique : pas de consensus, effet limité

Monotraitements de surface



Revêtements épais par projection thermique :

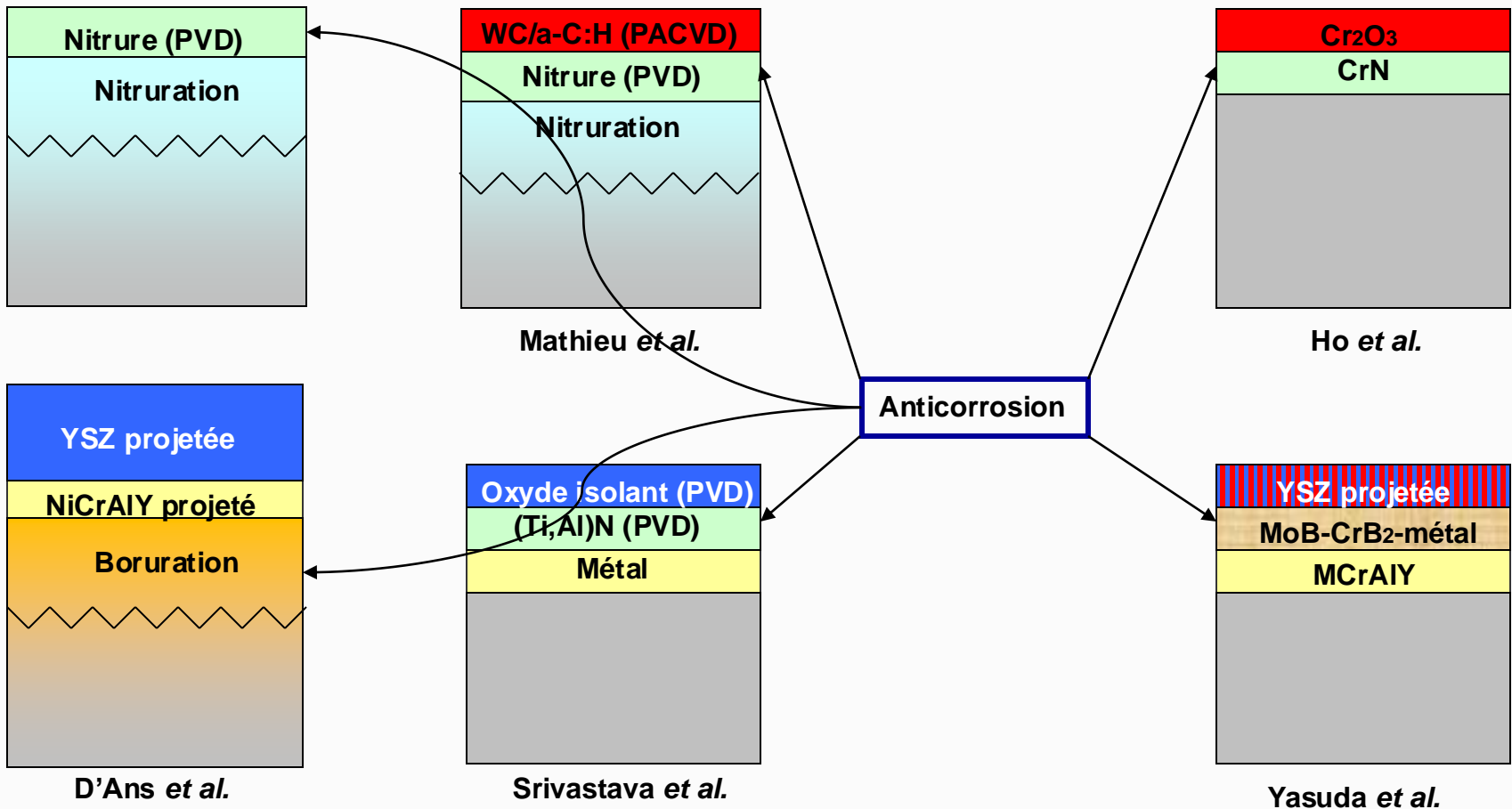
□ Exemple 1 : MoB-CoCr (Mizuno et al.) : plusieurs centaines d'heures de tenue à l'aluminium fondu

➤ Performance = $f(\text{dilatation thermique du substrat})$

□ Exemple 2 : CrB₂ + Cr₂NiB₄ (étui pour thermocouples, breveté)

Multitraitements de surface

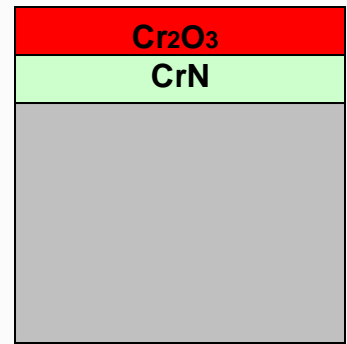
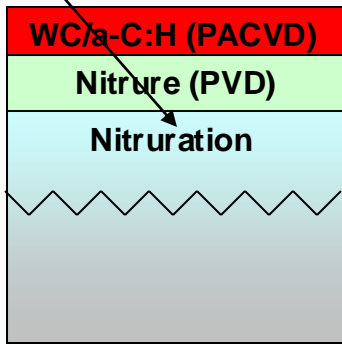
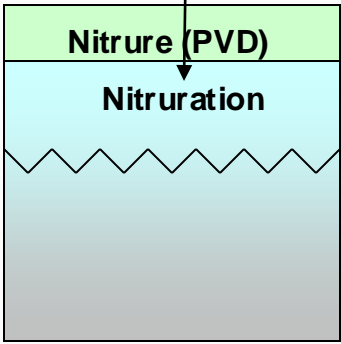
Aucun des monotraitements n'est pleinement satisfaisant



Multitraitements de surface

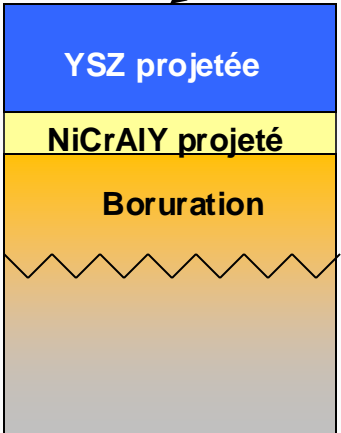
Aucun des monotraitements n'est pleinement satisfaisant

Réduction de la fatigue thermique
Améliorer la tenue à la fatigue

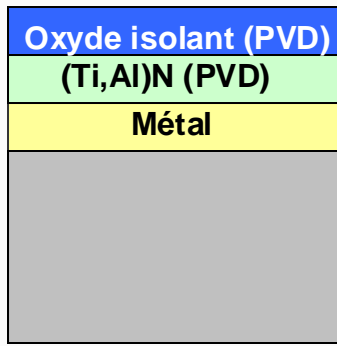


Ho et al.

Mathieu et al.

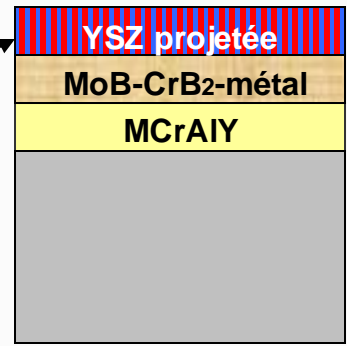


D'Ans et al.



Srivastava et al.

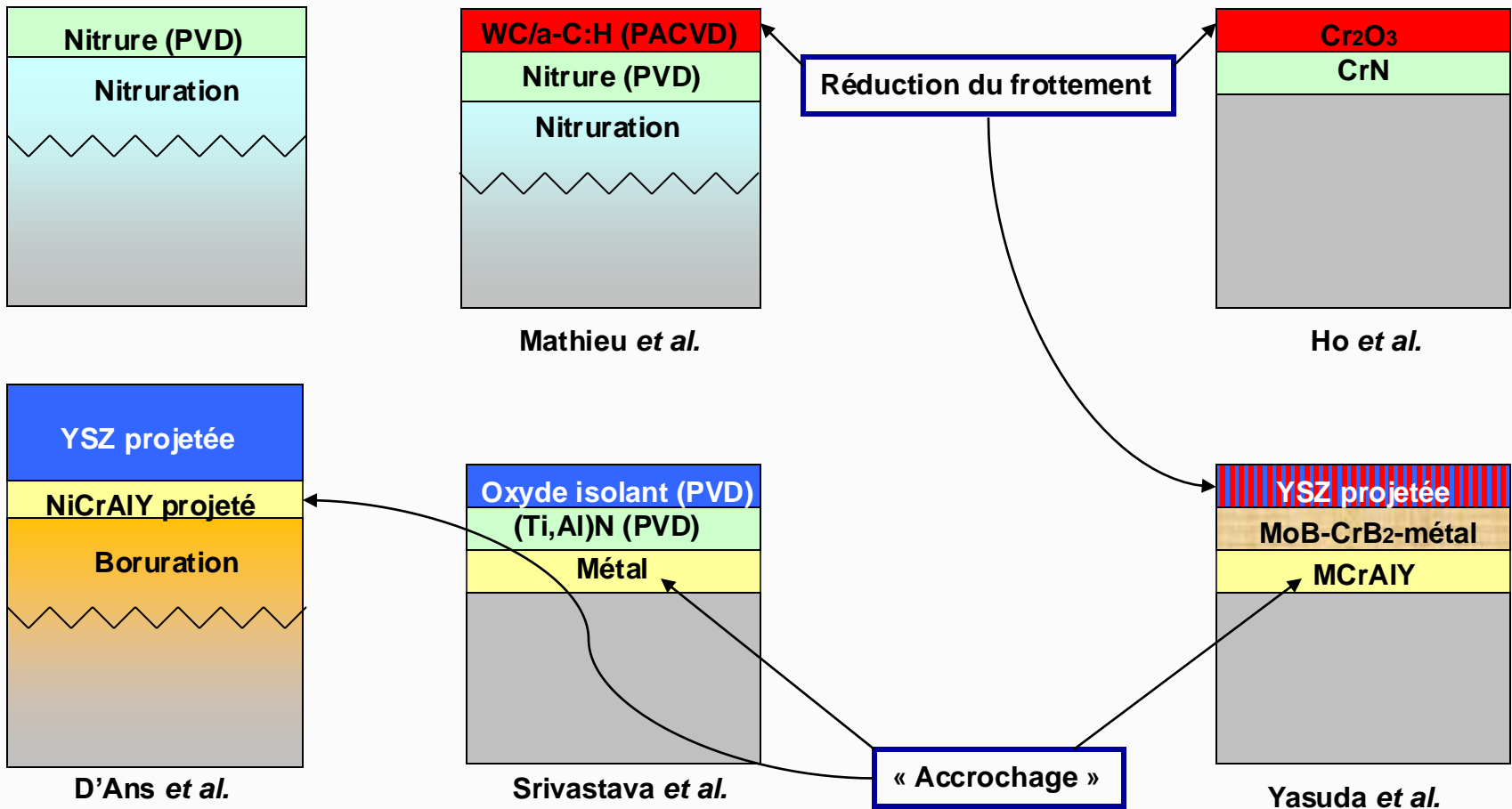
Fatigue thermique
Réduire les flux thermiques



Yasuda et al.

Multitraitements de surface

Aucun des monotraitements n'est pleinement satisfaisant



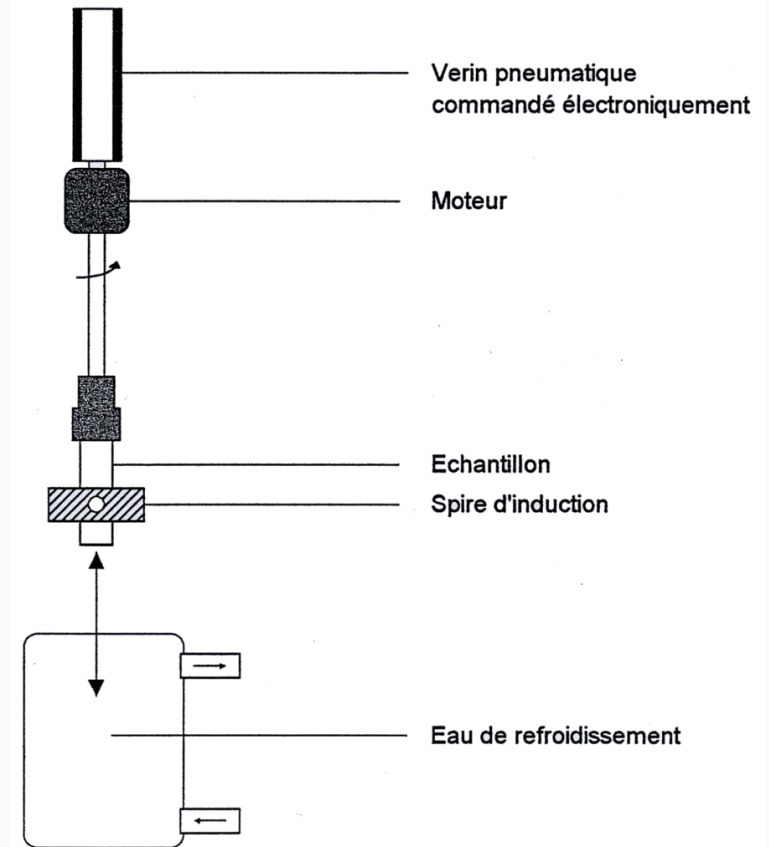
Multitraitements de surface

Tenue à la fatigue thermique

- Comparaison difficile entre les études, conditions différentes
- Très nombreux paramètres : propriétés mécaniques et thermiques des couches et du substrat
- Exemple de test :

Difficulté d'interprétation du test si traitement de surface (D'Ans et al.)

- Chauffage pas toujours en surface si pas de couplage avec la couche

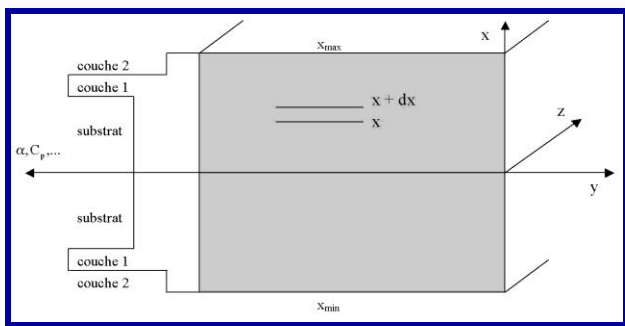


Multitraitements de surface

Modélisation FT

Conditions aux bords
Conditions initiales

Terme « source »
= S(x,t)



α
E ν ϵ_u σ_u σ_0
k C_p ρ

$$\rho(x)C_p(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) + S(x,t)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_{\min} + \epsilon_{\max}}{2} \quad \Delta\epsilon_{\text{ductile}} = 3,5 \frac{\sigma_u - \bar{\sigma}}{E} N_f^{-0,12} + \epsilon_u^{0,6} N_f^{-0,6}$$

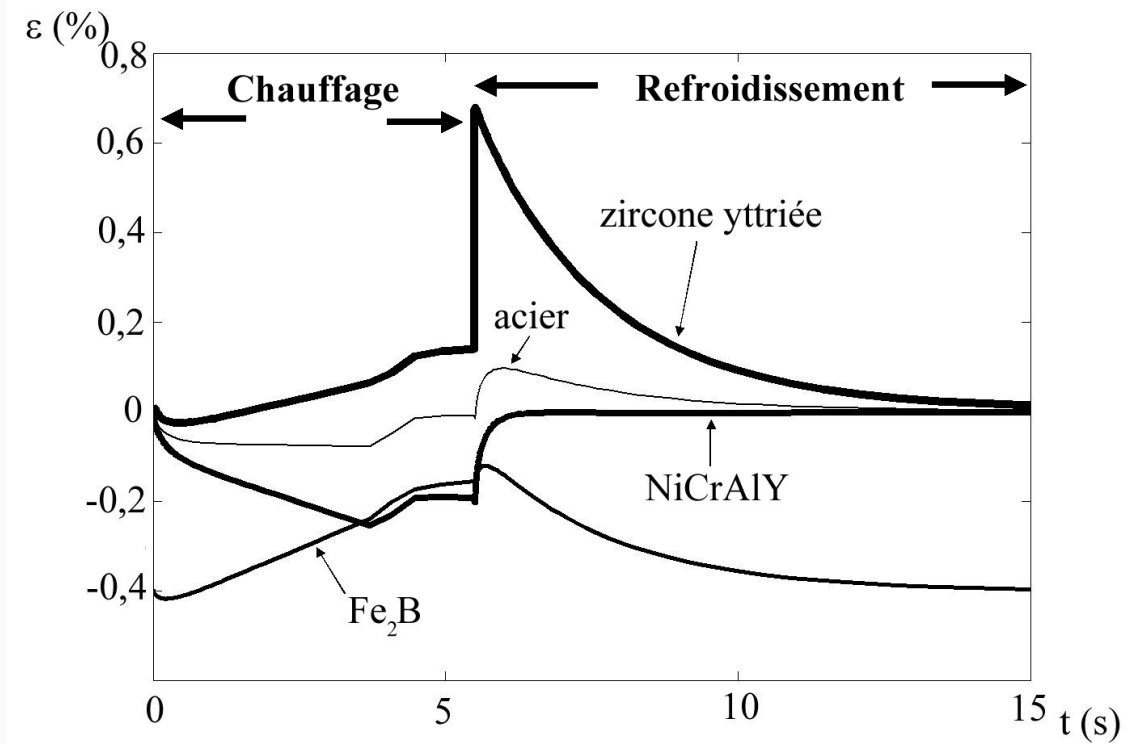
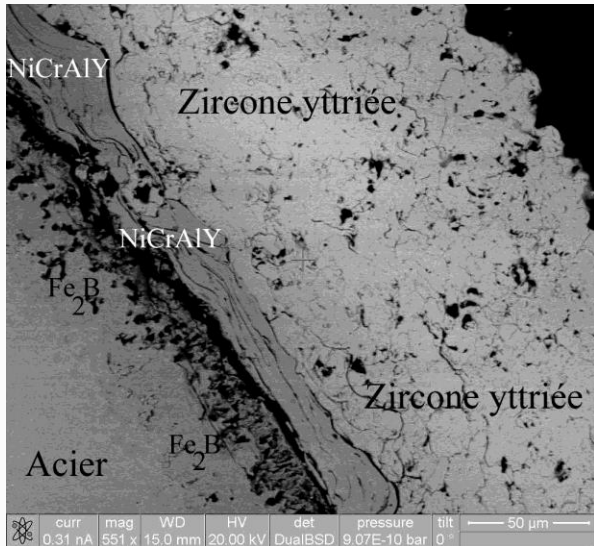
$$\Delta\epsilon = |\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}| \quad \Delta\epsilon_{\text{fragile}} = \frac{9}{4} \frac{\sigma_u - \bar{\sigma}}{E} N_f^{-0,083}$$

T(x, t)
 $\epsilon(x, t)$ $\epsilon(x, T)$
 N_f

Multitraitements de surface

Modélisation FT :

- Suggestion : contrainte initiale de compression dans la zircone



Conclusions

Corrosion par l'aluminium fondu :

- Boruration
- Revêtements épais par projection thermique (borure de molybdène)
- Couche de nitrures par PVD, mais régularité et épaisseur

Fatigue thermique :

- Multitraitement
- Augmenter la tenue à la fatigue du substrat (nitruration)
- Réduire l'amplitude des cycles thermiques (barrière thermique)
- Modélisation possible :
 - Problème thermique
 - Problème mécanique
 - Endommagement
 - « Data mining » nécessaire