

Méthode de détermination des contraintes par déflexion

J. Favergeon

Séminaire « Instrumentation & Méthodes d'analyses
pour étudier le couplage
Mécanique/Diffusion/Oxydation »

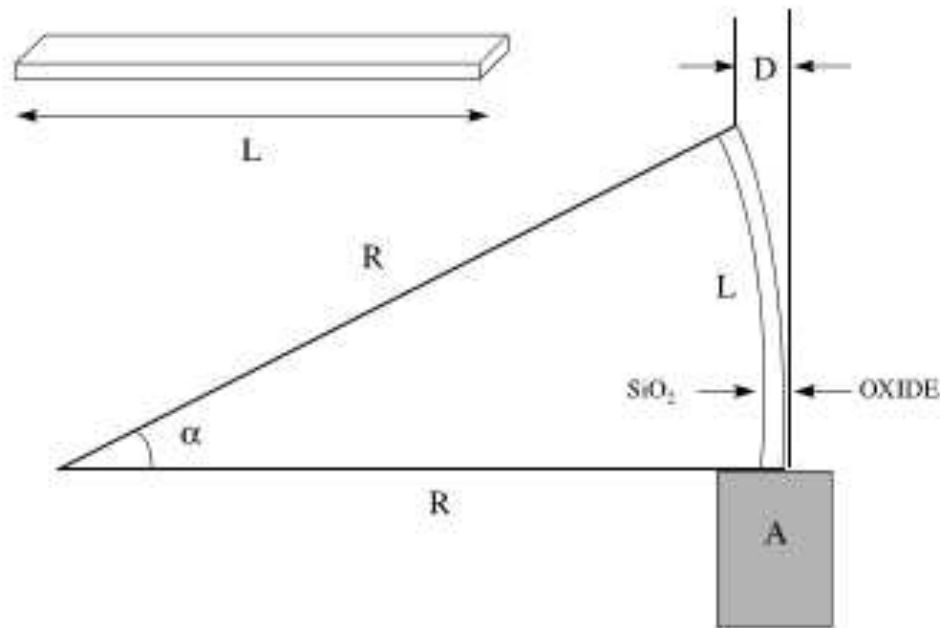
05.06.2019



Principe du test de déflexion en oxydation monofaciale

Réalisation de l'oxydation haute température s'une face d'une lame métallique fine (l'autre face est protégée de l'oxydation)

La dissymétrie de contraintes mécanique à travers l'épaisseur de la lame conduit à sa courbure



Vallino et al, Computational Materials Science 19 (2000) 329-338



Les expériences permettent le suivi de la déflexion de la lame (D) au cours de l'oxydation

Principe du test de déflexion en oxydation monofaciale

Les éléments clés sur le plan expérimental :

Préparer une lame fine (épaisseur de l'ordre de quelques centaines de microns) dont l'épaisseur doit être homogène

Assurer une protection d'une des faces de la lame vis-à-vis de l'oxydation haute température :

- soit avec un revêtement (SiO_2 , Pt),
- soit avec un revêtement et une pré-oxydation (ex : dépôt chrome dur et pré-oxydation pour former Cr_2O_3),
- soit en pré-oxydant la lame dans des conditions de développement d'une couche protectrice différentes de la couche qui sera développée pendant l'essai de déflexion

Principe du test de déflexion en oxydation monofaciale

Quelques variantes de l'utilisation de l'essai de déflexion :

J. Mougin et al, Materials and Corrosion 53 (2002) 486-490

- Pré-oxydation des deux faces de la lame
- Polissage d'une des deux faces
- Positionnement dans le four de déflexion et chauffage sous Ar-H₂


➔ Pas de suivi au cours de la croissance de l'oxyde

Principe du test de déflexion en oxydation monofaciale

Quelques variantes de l'utilisation de l'essai de déflexion :

M. Li et al, Oxidation of Metals 51 (1999) 333-351

- Pré-oxydation des deux faces de la lame
- Polissage partiel d'une des deux faces
- Positionnement dans le four de déflexion et reprise de l'oxydation

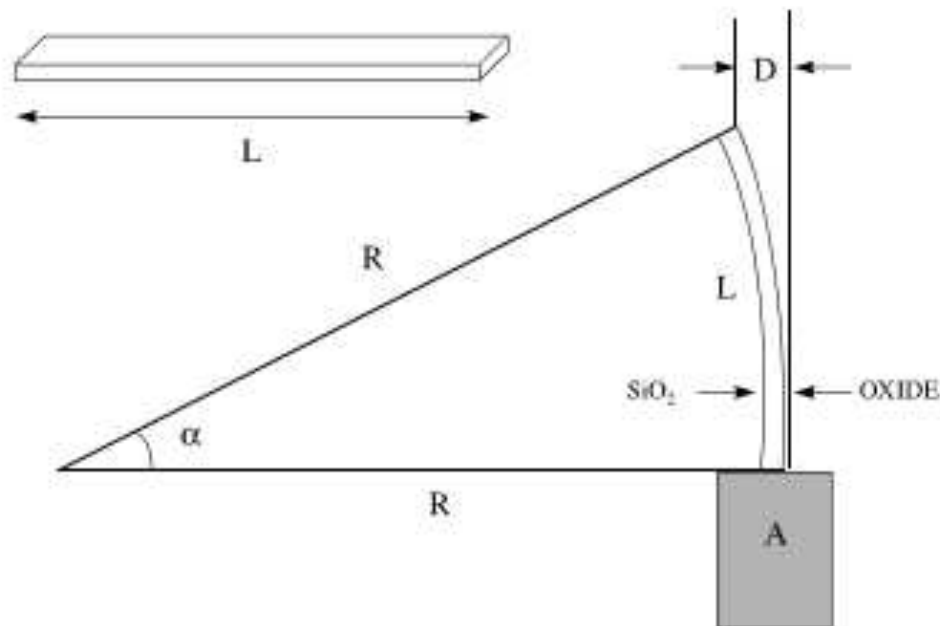
 La différence de vitesse d'oxydation instantanée sur chaque face permet de créer une dissymétrie et une courbure

Traitement des données obtenues par l'essai de déflexion

On suppose que la courbure κ est la même en tout point de la surface de la lame

On suppose également que la courbure reste très faible devant la longueur de la lame L

$$\kappa = \frac{1}{R}$$



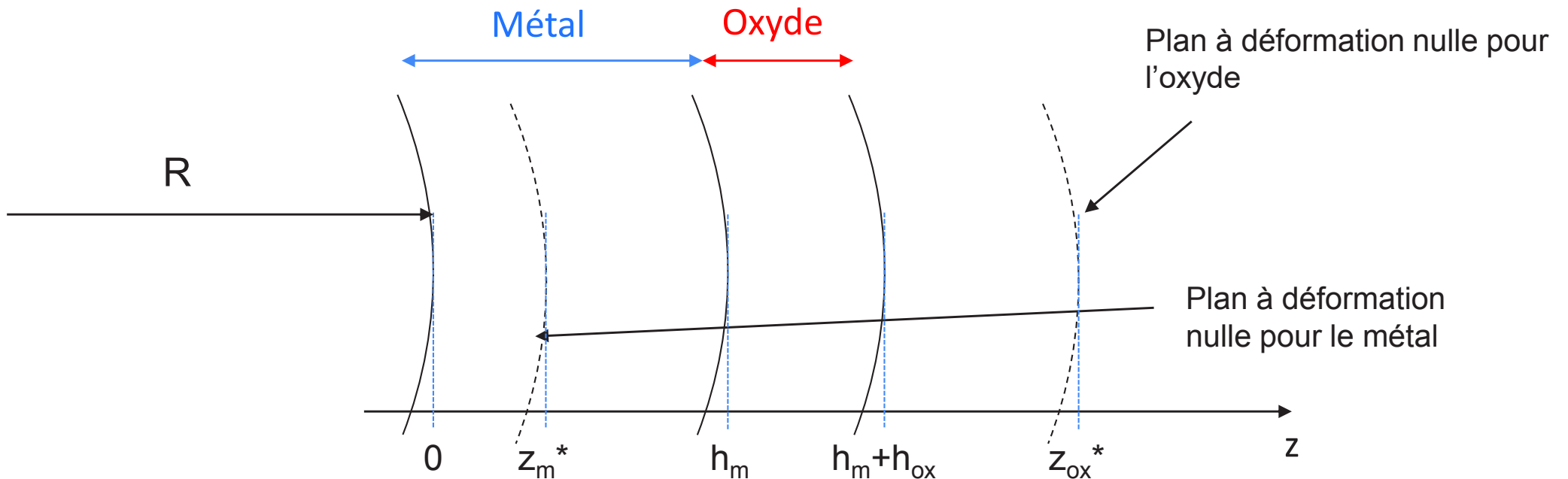
$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{2D}{L^2}$$

Vallino et al, Computational Materials Science 19 (2000) 329-338

Traitement des données obtenues par l'essai de déflexion

En 1995, H.E. Evans a établi des hypothèses pour la modélisation de l'essai de déflexion

La flexion reste faible: la contrainte est considérée homogène dans chaque plan ce qui conduit à considérer un modèle 1D

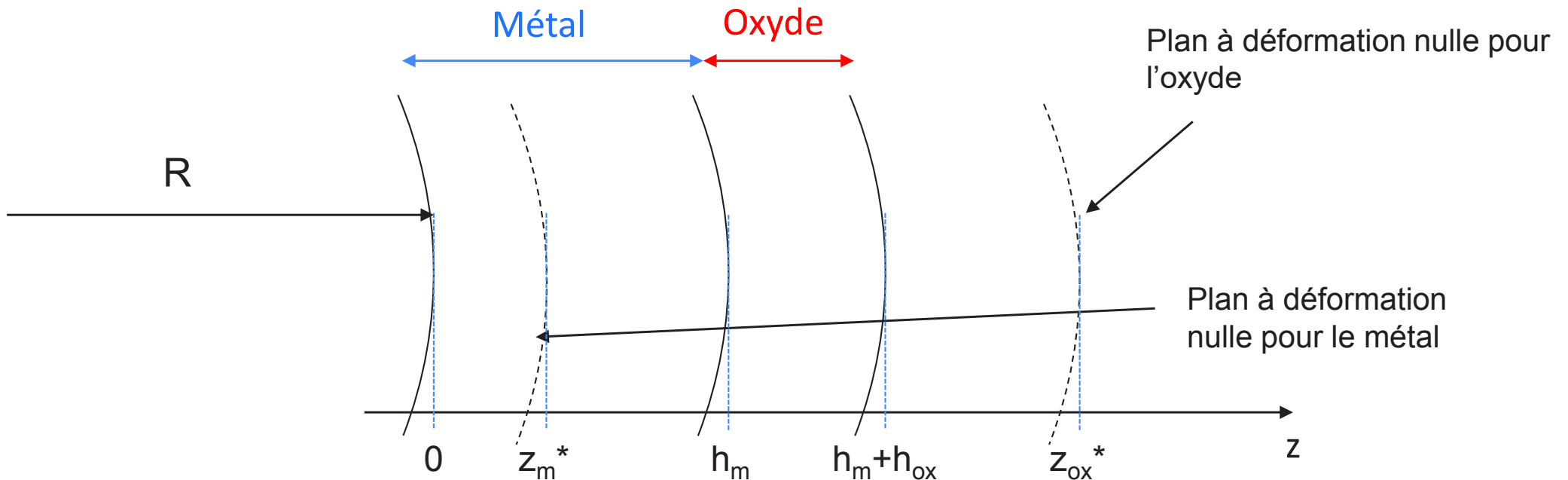


H.E. Evans, *Materials Science and Engineering A203* (1995) 117-127

Traitement des données obtenues par l'essai de déflexion

Les hypothèses d'Evans conduisent à formuler la déformation dans chaque plan z d'une phase comme étant proportionnelle à la distance entre le plan z considéré et la position du plan à déformation nulle pour cette phase

$$\varepsilon^m = \frac{z - z_m^*}{R + z_m^*} \quad \varepsilon^{ox} = \frac{z - z_{ox}^*}{R + z_{ox}^*}$$



H.E. Evans, *Materials Science and Engineering A203* (1995) 117-127

Traitement des données obtenues par l'essai de déflexion

A partir de cette formulation des déformations dans les plans z de chaque phase, les différentes étapes sont :

- Choix d'une loi de comportement pour chaque phase (fluage uniquement dans le papier de 1995 de H.E. Evans)
- Expression de la contrainte dans chaque phase en fonction de z et de la position du plan à déformation nulle
- Application de l'équilibre des contraintes et de l'équilibre des moments sur la lame pour trouver la position des plans à déformation nulle
- Calcul des contraintes dans chaque phase

H.E. Evans, Materials Science and Engineering A203 (1995) 117-127

Traitement des données obtenues par l'essai de déflexion

Quelques remarques sur la modélisation de l'essai de déflexion :

- La loi de comportement peut intégrer d'autres déformations que le fluage (ex : S. Maharjan et al¹ considèrent la déformation de croissance et le fluage dans l'oxyde)
- La déformation élastique est souvent négligée dans les travaux menés sur la base de la méthodologie de H.E. Evans
- Le calcul explicite de la position des plans de fibre neutre n'est pas nécessaire; en fait, le résultat important est l'évolution linéaire de la déformation en fonction de z
- La plupart des travaux cherchent à calculer les contraintes dans la lame, mais ce n'est pas nécessairement une donnée d'intérêt

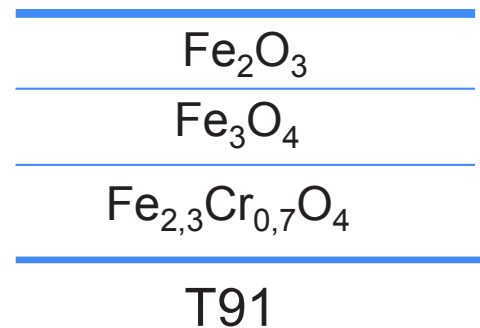
¹S. Maharjan et al, *Oxidation of Metals* 77 (2012) 93–106

Un exemple : Oxydation de l'acier T91 à 550°C en milieu humide

Le T91 est un acier ferrito-martensitique à 9 w% de chrome

Les essais de déflexion ont été menés à 550°C sous une atmosphère Ar / 10% vol. H₂O pour environ 250 heures

➔ Croissance d'une couche triplex non-protectrice dans ces conditions



Couche de protection Cr₂O₃ obtenue par pré-oxydation sous He 6.0 à 600°C pendant 60 heures

Epaisseur des lames pour l'essai de déflexion : 150 μm

Un exemple : Oxydation de l'acier T91 à 550°C en milieu humide

Une étude cinétique et microstructurale de l'oxydation du T91 à 550°C sous Ar-10 % vol. H₂O avait permis d'établir :

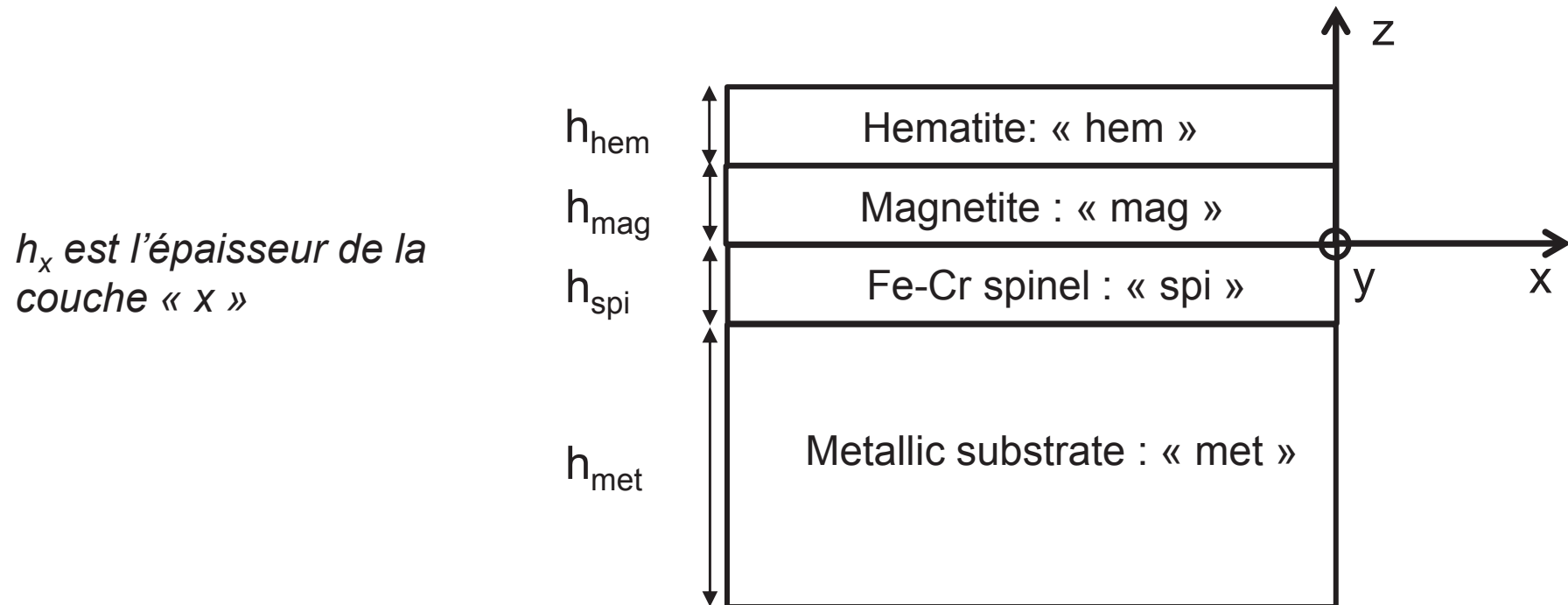
- Les lois de croissance de chaque strate d'oxyde
- Un modèle de croissance de la couche triplex
- Les zones dans lesquelles le fluage de la couche d'oxyde se manifestent le plus

L'objectif était d'établir un modèle de comportement mécanique valable au cours de l'oxydation du T91 :

- Simulation de la déflexion à partir d'un modèle pré-établi
- Recherche des valeurs de deux paramètres du modèle pour obtenir une courbe simulée proche des courbes expérimentales

Description mécanique du système métal-oxyde

Le système métal-oxyde est considéré comme une lame à 4 couches :



L'idée générale est d'écrire la déformation totale de chaque strate comme la somme de plusieurs contributions :

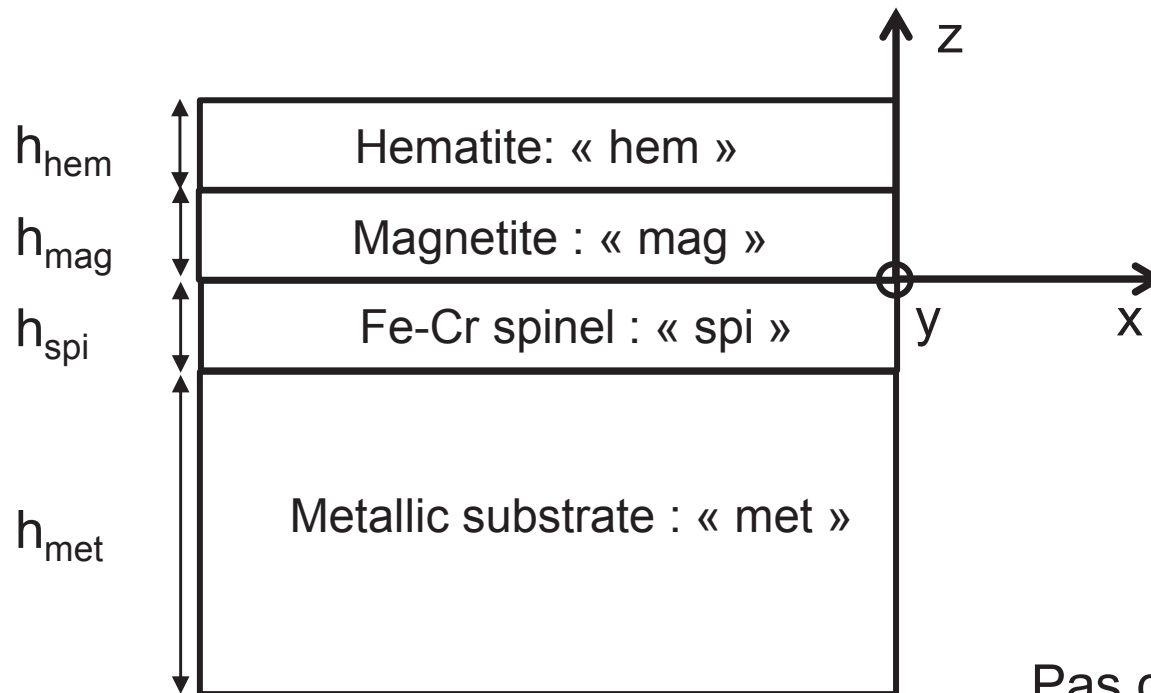
$\varepsilon^{\text{growth}}$ Déformation due à la croissance de l'oxyde

$\varepsilon^{\text{elas}}$ Réponse élastique de la couche

$\varepsilon^{\text{visco}}$ Relaxation de contraintes par fluage

Description mécanique du système métal-oxyde

Sources de déformation dans chaque couche

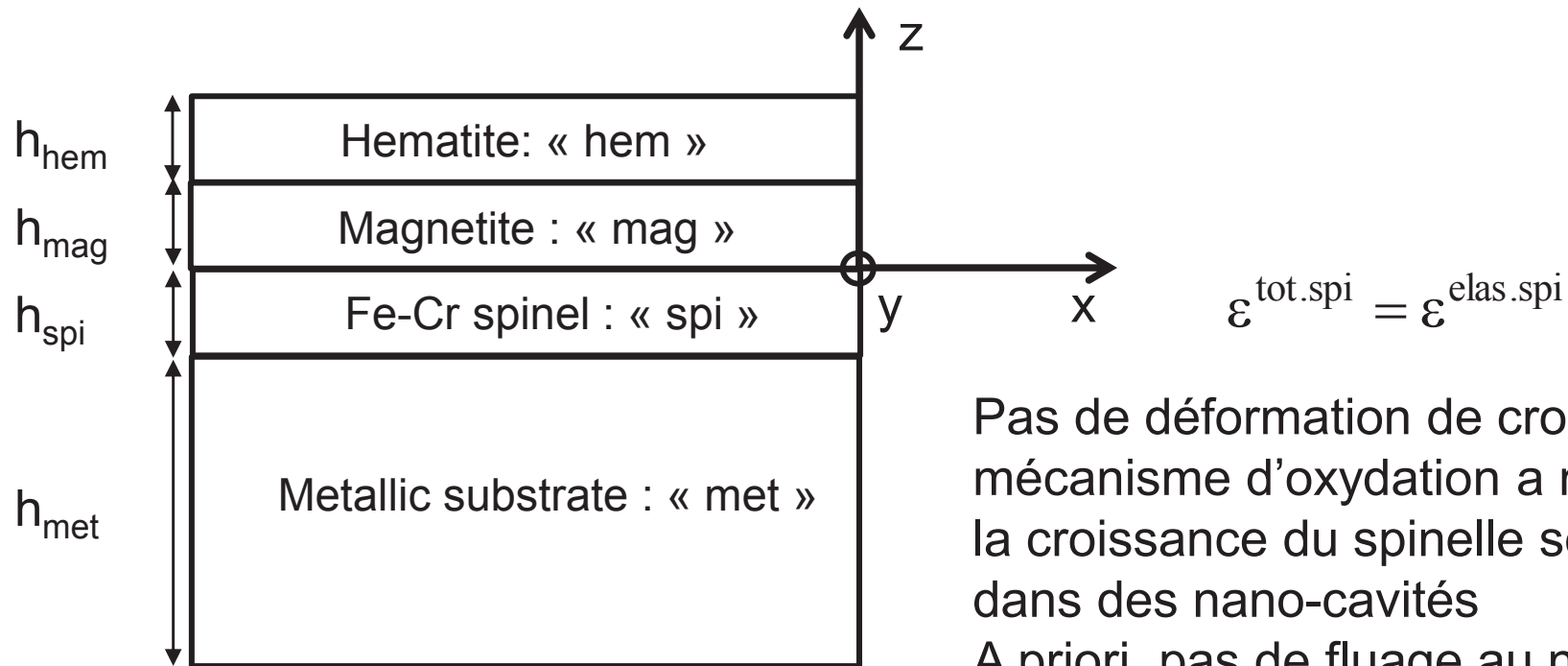


$$\varepsilon^{tot.met} = \varepsilon^{elas.met} + \varepsilon^{visco.met}$$

Pas de déformation de croissance dans le métal (l'oxydation interne est négligée)

Description mécanique du système métal-oxyde

Sources de déformation dans chaque couche

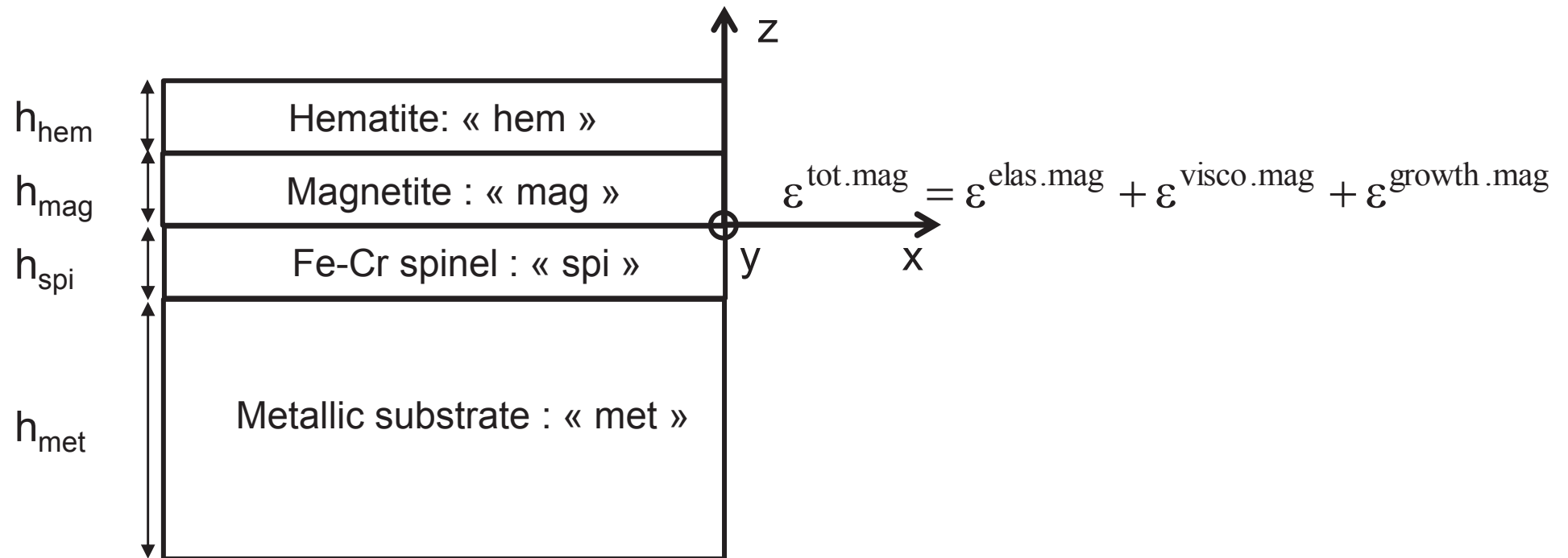


Pas de déformation de croissance : le mécanisme d'oxydation a montré que la croissance du spinelle se faisait dans des nano-cavités

A priori, pas de fluage au niveau de la couche de spinelle

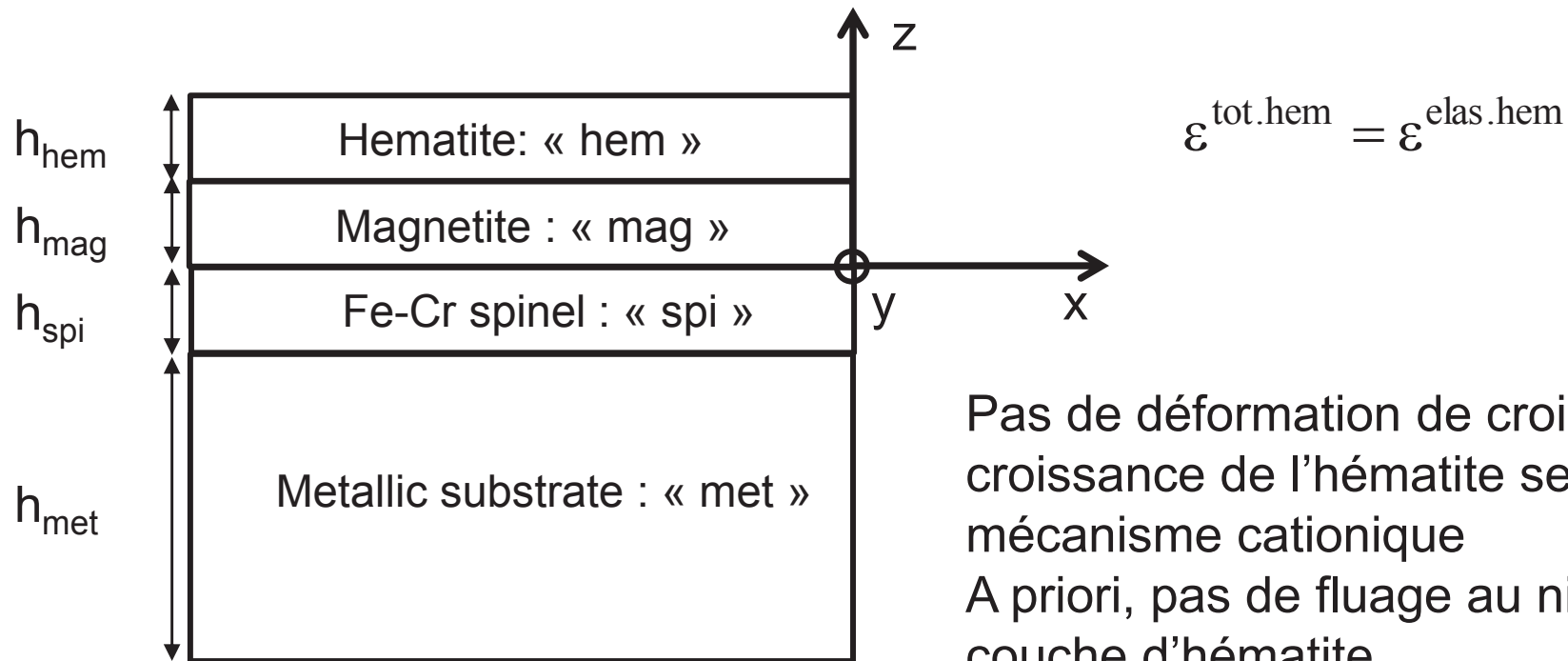
Description mécanique du système métal-oxyde

Sources de déformation dans chaque couche



Description mécanique du système métal-oxyde

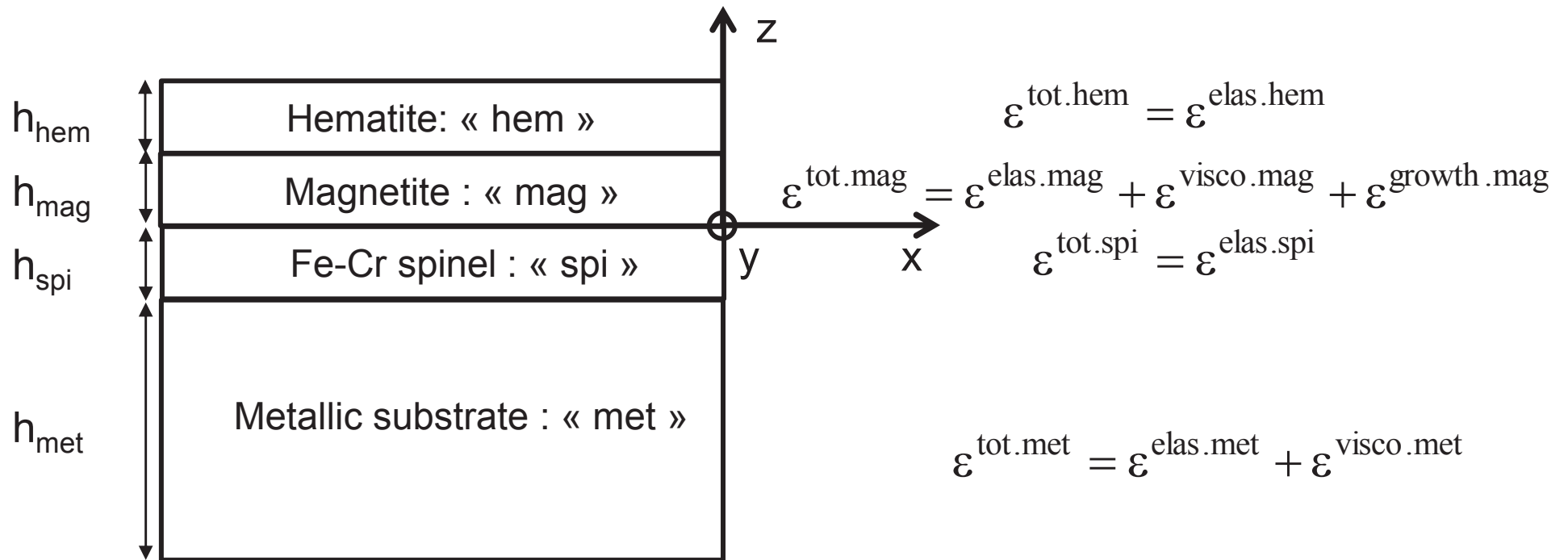
Sources de déformation dans chaque couche



Pas de déformation de croissance : la croissance de l'hématite se fait par mécanisme cationique
A priori, pas de fluage au niveau de la couche d'hématite

Description mécanique du système métal-oxyde

Sources de déformation dans chaque couche



Description mécanique du système métal-oxyde

Déformation élastique: $\varepsilon^{\text{elas}} = \frac{1-\nu}{E} \sigma$ (Loi de Hooke)

Déformation viscoplastique: $\frac{\partial \varepsilon^{\text{visco.met}}}{\partial t} = A_{\text{met}} t^m \sigma_{\text{met}}$ *E. Haney et al, 2009 and L. Kloc et al, 1997*

$\frac{\partial \varepsilon^{\text{visco.mag}}}{\partial t} = A_{0.\text{mag}} \sigma_{\text{mag}} \exp\left(\frac{-Q_{\text{mag}}}{RT}\right)$ *Linéarisation des données de A.G. Crouch et al, 1990*

→ $A_{0.\text{mag}}$ unknown

Déformation de croissance: $\frac{\partial \varepsilon^{\text{growth.mag}}}{\partial t} = M_{\text{mag}} \frac{dh_{\text{mag}}}{dt}$ *Formulation de D. R. Clarke, 2003*

→ M_{mag} unknown

Simulation de l'essai de déflexion

Le modèle mécanique est utilisé pour simuler la courbure de la lame

➤ Expressions de l'évolution des contraintes avec le temps dans chaque couche :

$$\sigma_{hem}(t_i) = \frac{E_{hem} \varepsilon^{tot.hem}}{1 - \nu_{hem}}$$

$$\sigma_{mag}(t_i) = \frac{\varepsilon^{tot.mag}(t_i) - \Delta t \frac{M_{mag}}{2} \sqrt{\frac{k_{p-mag}}{t_i}} - \varepsilon^{growth.mag}(t_{i-1}) - \varepsilon^{visco.mag}(t_{i-1})}{\frac{1 - \nu_{mag}}{E_{mag}} + \Delta t A_{0,mag} \exp\left(\frac{-Q_{mag}}{RT}\right)}$$

$$\sigma_{spi}(t_i) = \frac{E_{spi} \varepsilon^{tot.spi}}{1 - \nu_{spi}}$$


$$\sigma_{met}(t_i) = \frac{\varepsilon^{tot.met}(t_i) - \varepsilon^{visco.met}(t_{i-1})}{\frac{1 - \nu_{met}}{E_{met}} + \Delta t A_{met} t_i^m}$$

Simulation de l'essai de déflexion

Le modèle mécanique est utilisé pour simuler la courbure de la lame

➤ Expression de la déformation totale à travers l'épaisseur de la lame

$$\varepsilon^{\text{tot}} = \varepsilon_0 - \kappa z \quad z \text{ est la direction de croissance}$$



➤ Résolution de l'équilibre mécanique à chaque pas de temps

$$\int_{h_{\text{mag}}}^{h_{\text{hem}}+h_{\text{mag}}} \sigma_{\text{hem}} dz + \int_0^{h_{\text{mag}}} \sigma_{\text{mag}} dz + \int_{-h_{\text{spi}}}^0 \sigma_{\text{spi}} dz + \int_{-h_{\text{spi}}-h_{\text{m}}}^{-h_{\text{spi}}} \sigma_{\text{m}} dz = 0$$

$$\int_{h_{\text{mag}}}^{h_{\text{hem}}+h_{\text{mag}}} \sigma_{\text{hem}} z dz + \int_0^{h_{\text{mag}}} \sigma_{\text{mag}} z dz + \int_{-h_{\text{spi}}}^0 \sigma_{\text{spi}} z dz + \int_{-h_{\text{spi}}-h_{\text{m}}}^{-h_{\text{spi}}} \sigma_{\text{m}} z dz = 0$$

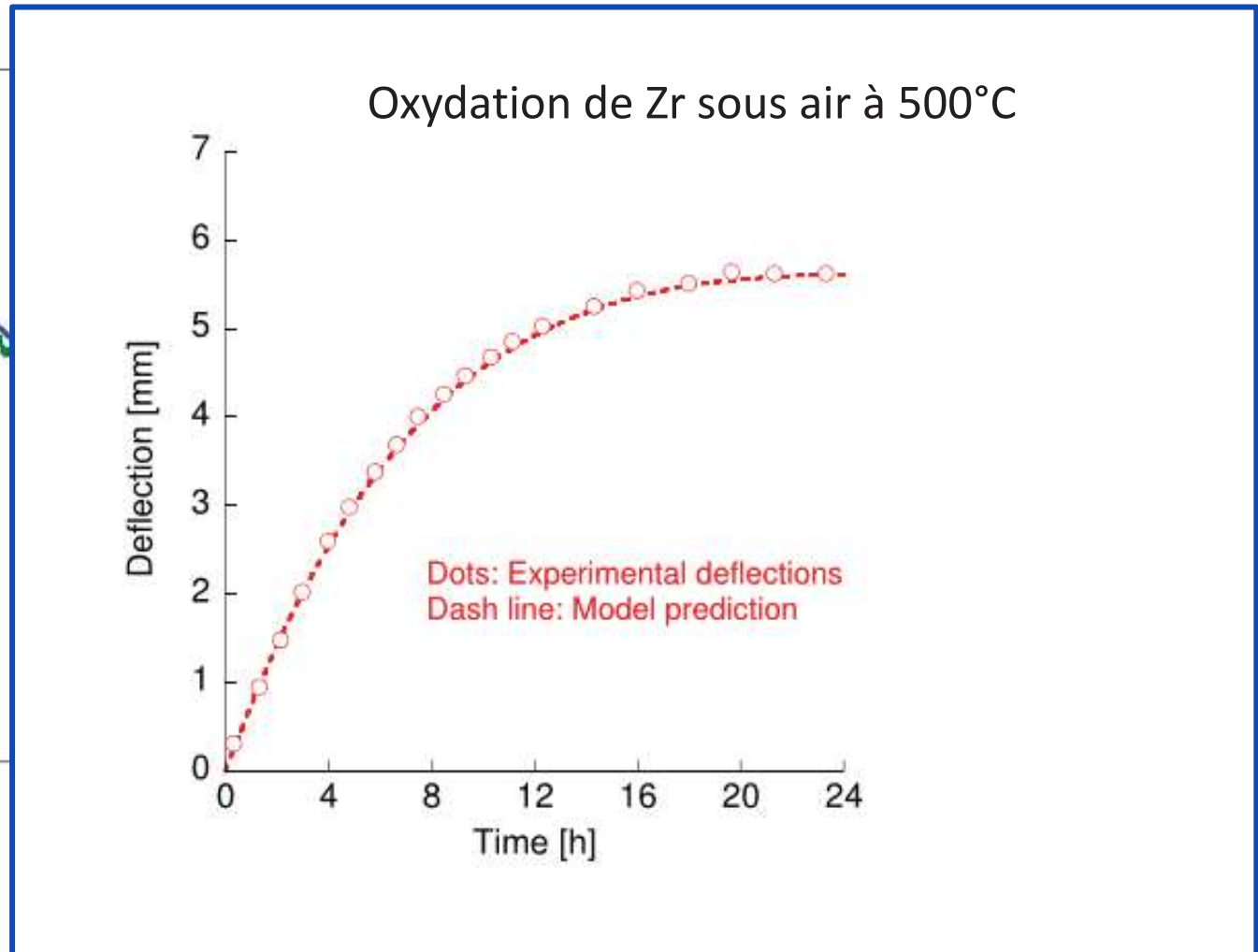
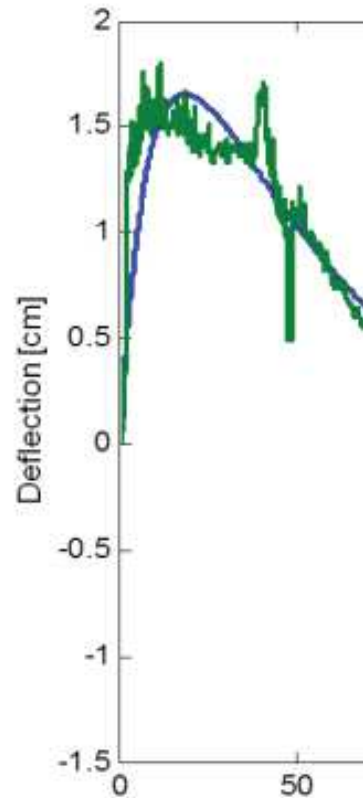
➤ Résolution du système d'équations suivant à chaque pas de temps pour κ et ε_0 :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix}$$

Simulation de l'essai de déflexion

Le modèle mécanique est utilisé pour simuler la courbure de la lame

Les paramètres $A_{0.mag}$ et M_{mag} sont choisis pour approcher au mieux la courbe expérimentale



Conclusion

Sur le plan expérimental

Le test de déflexion lui-même est assez simple de mise en œuvre

Les difficultés résident dans la préparation des échantillons (préparation d'un échantillon mince d'épaisseur homogène, obtention d'un revêtement protecteur)

Sur le plan de la modélisation

Le test de déflexion ne présente un intérêt que s'il est accompagné d'une démarche de modélisation

Le test de déflexion ne donne pas accès aux contraintes mécaniques dans la couche d'oxyde; il aide à évaluer la pertinence du modèle et d'en évaluer certains paramètres

Au-delà du savoir-faire expérimental à accroître, les travaux futurs doivent davantage s'intéresser à la modélisation de l'essai

Remerciements

Remerciements à l'ensemble des personnes qui ont contribué aux développements des travaux sur la déflexion à Compiègne :

Lukasz Kurpaska
David Fettré
Marie-Christine Demizieux
Gérard Moulin
Salima Bouvier
Isabelle Velluet
Laure Martinelli
Clara Desgranges
Gaël Santonay