Vieillissement accéléré du revêtement en SiC sous flux solaire : étude numérique et expérimentale



Réseau Thématique 2081 COnCOrD COuplage méCanique Oxydation Diffusion

Présentation :

Thiane NDIAYE doctorante en 2e année au laboratoire PROMES-Odeillo

Encadrement :

Ludovic CHARPENTIER chargé de recherche, PROMES-CNRS

Reine REOYO-PRATS maitresse de conférences UPVD, PROMES-CNRS

Collaboration :

Frédéric MERCIER chargé de cherche, SIMaP (CNRS/UGA/Grenoble INP)

PROMES

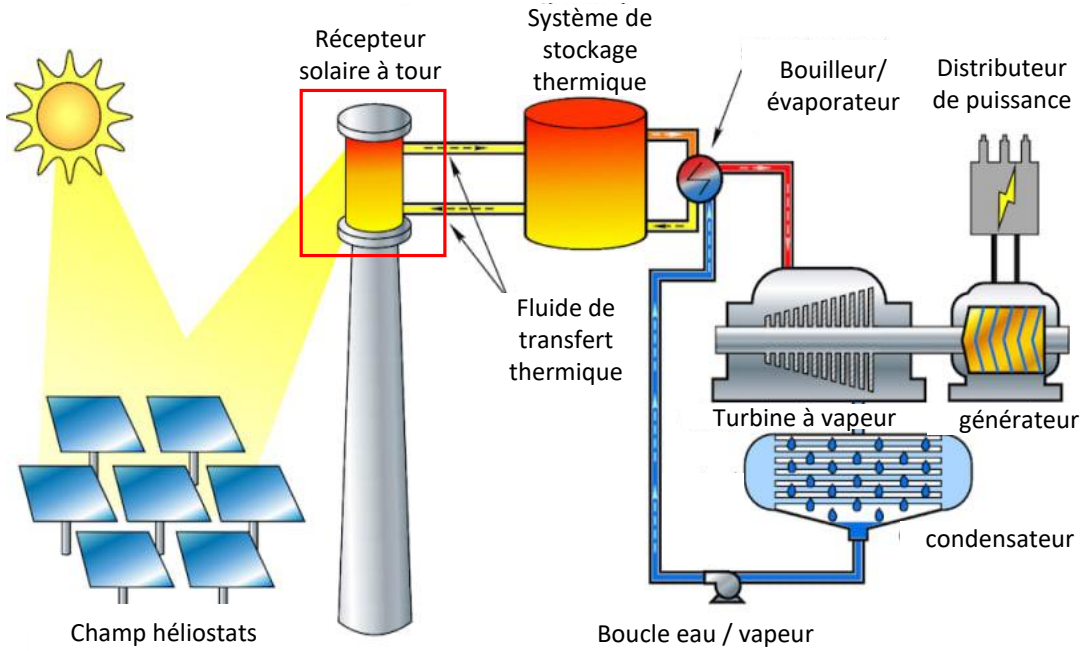
Université Perpignan Via Domitia

Plan de présentation

- ❑ Introduction et Contexte
- ❑ Matériaux
- ❑ Méthodes
- ❑ Résultats et Discussion
- ❑ Conclusion et Perspectives

❑ Contexte : Technologies de la Concentration Solaire (CST)

- ➢ Conversion de l'énergie solaire → énergie thermique→ électricité ou chaleur
- ➢ Efficacité limitée (~16%) température de fonctionnement modérée (~600 °C)
- ➢ Verrou technologique : comportement thermomécanique du récepteur



❑ Objectives:

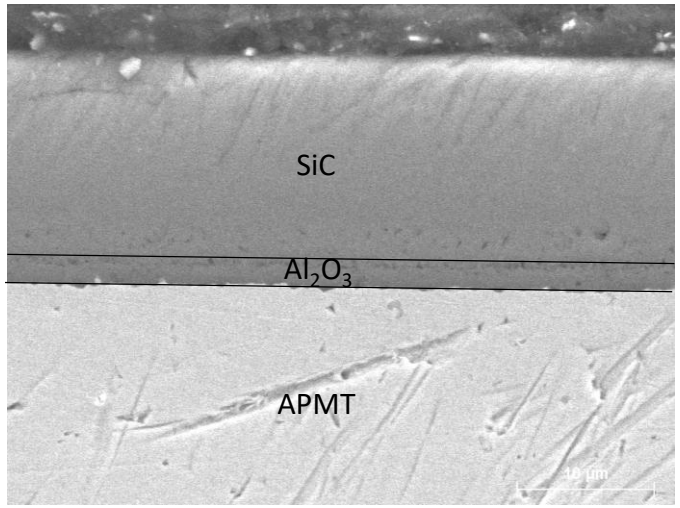
- ➢ **Fonctionnement à haute température > 1000 °C**
  - ✓ Face avant→ flux solaire concentré (1000 kW/m²)
  - ✓ Face arrière→ échange avec un fluide de transfère thermique
- ➢ **Récepteur à haute performance :**
  - ✓ Résistant à l'oxydation et au fluage
  - ✓ Garde les propriétés optiques

❑ Approche proposée :

➢ Récepteur en alliage métallique avec dépôt de couche fine de céramique :

✓ L'alliage assure la résistance thermomécanique (fluage)

✓ La céramique assure l'absorption solaire (absorption)



❑ Méthodologie :

➢ **Simulation numérique :** estimation des contraintes après

✓ Oxydation du substrat ✓ Dépôt de SiC ✓ Cycle thermique

✓ Pour optimiser la structure de la multicouche

➢ **Test sous flux solaire :**

✓ Cyclage thermique ✓ Evaluation de la température et des contraintes

✓ Validation du modèle numérique

❑ **Couche de substrat :** Kanthal APMT (Fe_{bal}-Cr_{21-22}-Al_5-Mo_3)

- ➢ Résistant au fluage jusqu'à **1250** °C
- ➢ Très résistant à l'oxydation (FeCrAl alloy)

❑ **Couche intermédiaire :** Alumine (Al_2O_3)

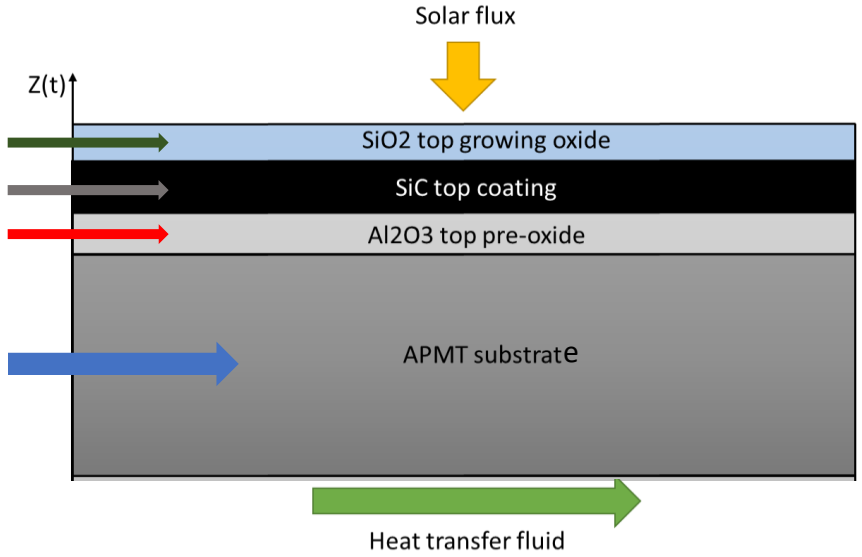
- ➢ Oxydation du substrat avant dépôt
- ➢ Favorise l'adhérence du SiC
- ➢ Très stable à haute température **1700** °C

❑ **Couche de revêtement :** Carbure de Silicium cubique (SiC)

- ➢ **CVD** à haute température à **1200 °C** avec du SiH_4 et C_3H_8
- ➢ Excellente résistance à l'oxydation
- ➢ Absorption solaire élevée **>80%**

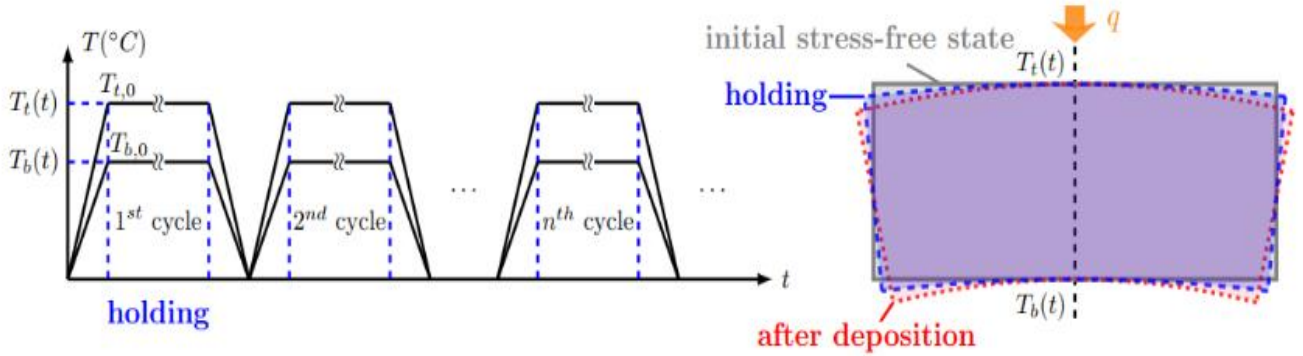
❑ **Oxydation en SiO_2 du SiC durant les cycles thermiques**

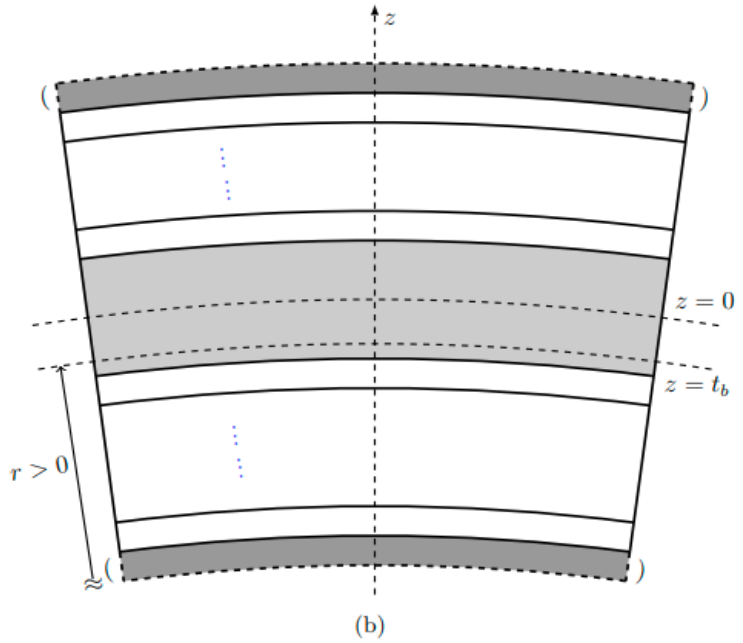
- ➢ Oxyde protecteur à haute absorptivité **>90%**



❑ Modèle 1D sur MATLAB

- Simule le vieillissement avec le cyclage (**température ambiante ↔ 1000 °C**)
- Calcule :
  - ✓ **Température dans les couches**
  - ✓ **Déformation**
  - ✓ **Contraintes dans les couches**





❑ Basé sur le formalisme d'Hsueh : calcule la déformation $\boldsymbol{\varepsilon(z) = c + \frac{z - t_B}{r}}$

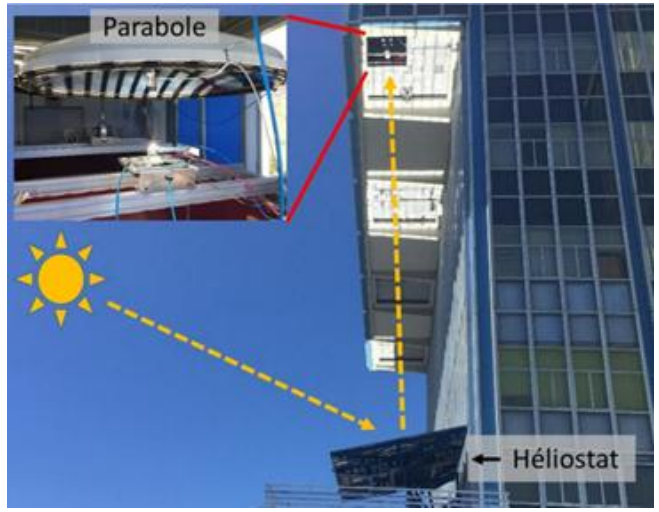
- c est la déformation uniforme
- $\boldsymbol{\frac{z - t_b}{r}}$ est la déformation due à la courbure
- $\mathbf{t_b}$ est la position de l'axe de courbure, $\frac{1}{r}$ est la courbure et $\mathbf{z}$ est la position dans la multicouche

❑ Modèle 1D sur MATLAB

- Contraintes dans le substrat : $\sigma_s(z) = \frac{E_s}{1-\nu_s}\left(c + \frac{z-t_b}{r} - \varepsilon_{s,thermique} - \varepsilon_{s,dépôt} - \varepsilon_{s,\text{thermique}} - \varepsilon_{s,fluage}\right)$
- Contraintes dans les couches : $\sigma_c(z) = \frac{E_c}{1-\nu_c}\left(c + \frac{z-t_b}{r} - \varepsilon_{c,dépôt} - \varepsilon_{c,\text{thermique}} - \varepsilon_{c,fluage}\right)$
  - ✓ dépôt : après dépôt
  - ✓ Thermique : dilatation thermique
  - ✓ Fluage : maintien à haute température

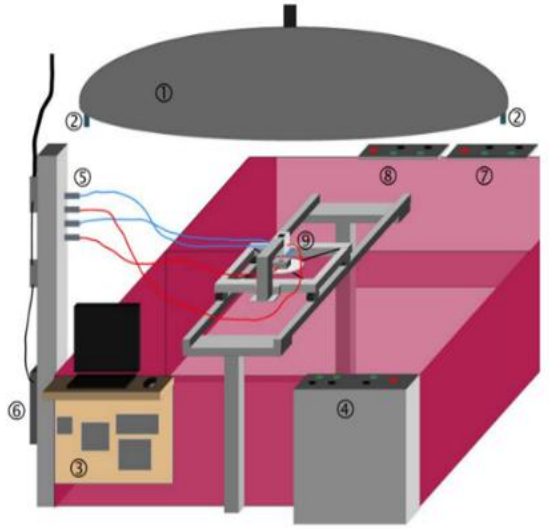
- Pour obtenir les contraintes, on résout un système d'équations à 3 inconnues **(c, t_b et r):**
  - ✓ La somme des forces dues à la déformation uniforme est égale à zéro
  - ✓ La somme des forces dues à la courbure subie par la multicouche est égale à zéro
  - ✓ La somme des moments par rapport à l'axe de courbure est égale à zéro

❑ Dispositif expérimental : SAAF (Solar Accelerated Aging Facility)



➢ Les composants essentiels

- **Système de concentration :**
  - ✓ Héliostat mobile (6 m × 4.5 m) → suit le soleil
  - ✓ Miroir parabolique fixe (Ø 1.5 m, 900 W power, concentre 15000 fois)
  - ✓ Point focal : Ø ~20 mm à 635 mm par rapport au centre
- **Kaléidoscope** : homogénéise le flux sur l'échantillon
- **Les pales mobiles** : contrôle le flux solaire
- **Refroidissement** : eau (kaléidoscope) and air comprimé (support de l'échantillon)
- **Système de contrôle et d'acquisition des données**

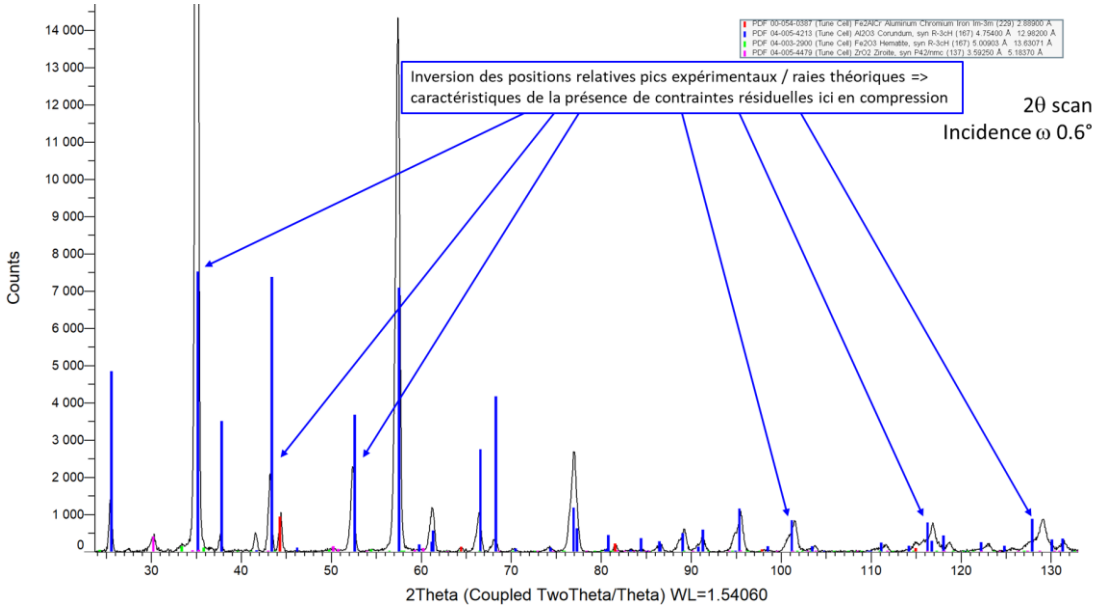


1. Parabolic dish reflector
2. Laser
3. Control panel
4. Control console (S/E trapdoor)
5. Cooling ball valves
6. Air flowmeter
7. Control console (tracking)
8. Control console (S/W trapdoor)
9. Experimental cart

❑ Détermination de la contrainte résiduelle par diffraction de rayons X (DRX)

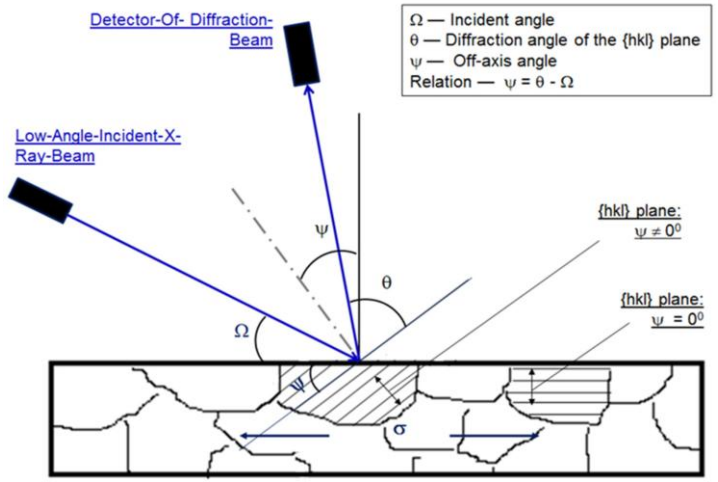
➢ Méthode DRX $\sin^2\psi$:

- Utilise les plans cristallins comme jauge de déformation
- **Mesure le d-spacing à différents angles ψ**
- $\varepsilon = f(\sin^2\psi)$ linéaire, la pente donne la contrainte
- **Limites de la méthode:**
  - ✓ Angle très élevé ($2\theta > 125°$)
  - ✓ Problématique : pics trop élargis pour les couches minces



➢ Alternative: GIXRD (Glancing Incident XRD):

- Angle faible et constant Ω
- ψ obtenu par $\psi = \theta - \Omega$
- Efficace pour les couches minces
- convient aux matériaux cristallins cubiques (SiC)

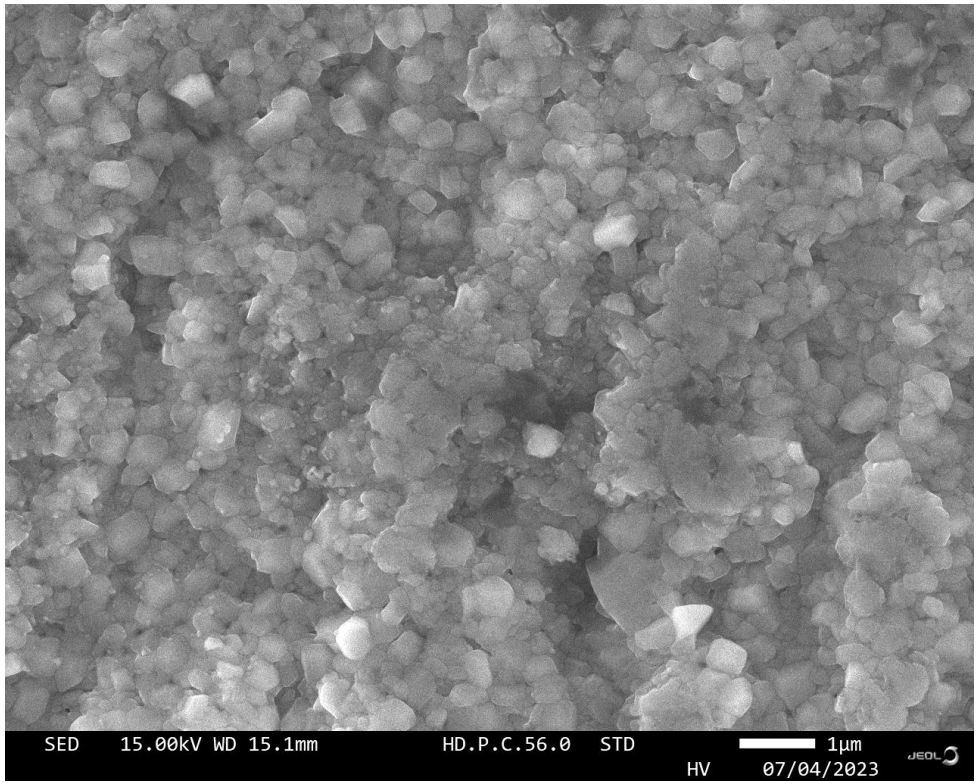


❑ Après oxidation : contraintes dans l'échantillon Al_2O_3/APMT

- Oxydation : **50 heures à 1100 °C dans air**
- Formation d'alumine : **α-Al_2O_3 (DRX et EDX)**
- Surface homogène (fissures et délaminations non observées)

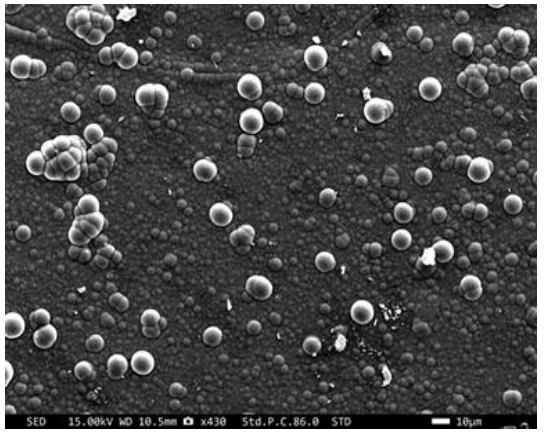
Couches	Numérique (MPa)	Expérimental (MPa)	Limite de compression (MPa)
Al_2O_3	-2490	-2760±427	-2000 to -4000

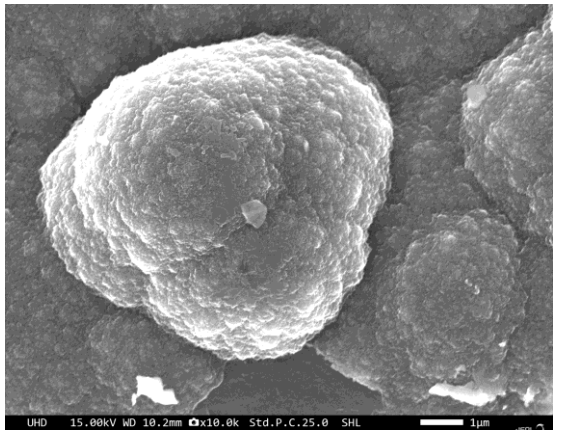
- Compression dans les deux couches
- Valeurs très proches (<10%)
- Le modèle représente bien la réalité



❑ Après dépôt de SiC : contraintes dans l'échantillon SiC/Al_2O_3/APMT

- **Image MEB :** morphologie typique en "Chou-fleur" du 3C-SiC
- Quelques fissures et délaminations observées après dépôt





Couches	Numérique (MPa)	Expérimental (MPa)	Compression limite (MPa)
SiC	-1845	-2393±512	2500-3500
Al_2O_3	-2967	-3113±483	2000-4000

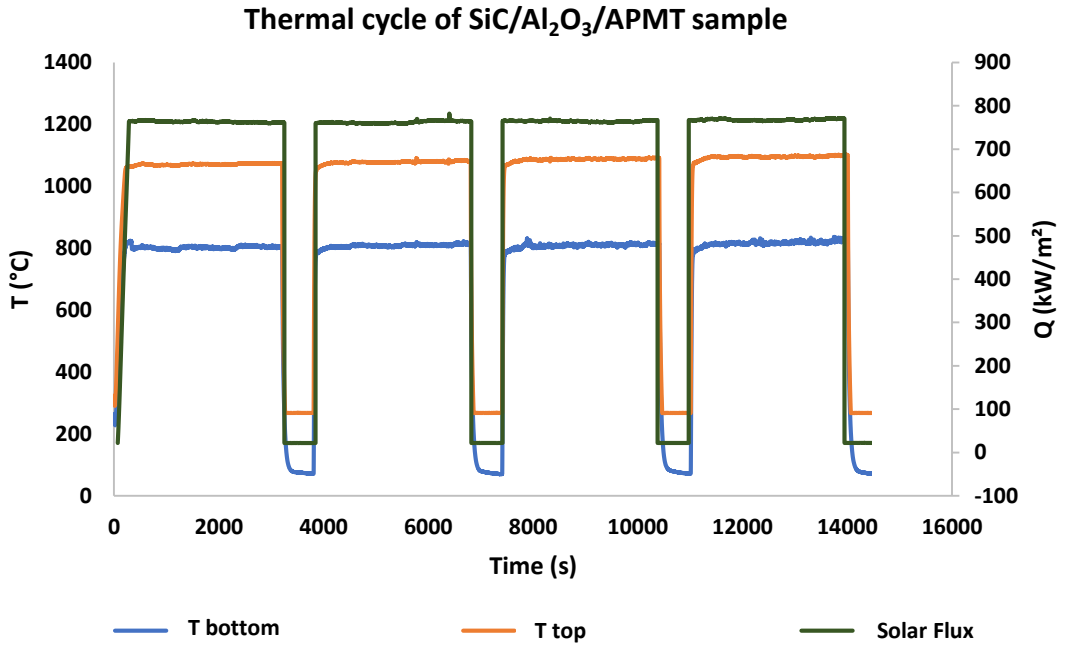
- Compression dans les deux cas
- Augmentation de la compression dans l'alumine par rapport à l'oxydation
- **La valeur numérique est 23% plus petite que la valeur expérimentale pour le SiC**
- Pour l'alumine les deux valeurs sont très proches **(<5%)**
- **Comparaison avec la limite**
  - Les fissures viennent de l'alumine
  - Ce qui affecte la couche de SiC



❑ Après cyclage thermique : contraintes dans l'échantillon $SiC/Al_2O_3/APMT$

➢ **Paramètres de simulation:**

- Nombre de cycle : **4**
- **1 heure** (**50 min** à haute température et **10 min** refroidissement rapide)
- Flux solaire incident : **800 kW/m²** → température : **~1100 °C**
- Dimensions de la multicouche :
  - ✓ Épaisseur du substrat : **2 mm**
  - ✓ Épaisseur d'Alumine (Al_2O_3) : **1 µm**
  - ✓ Épaisseur du SiC : **10 µm**
- Absorptivité du SiC : **83±1.73.15%,**

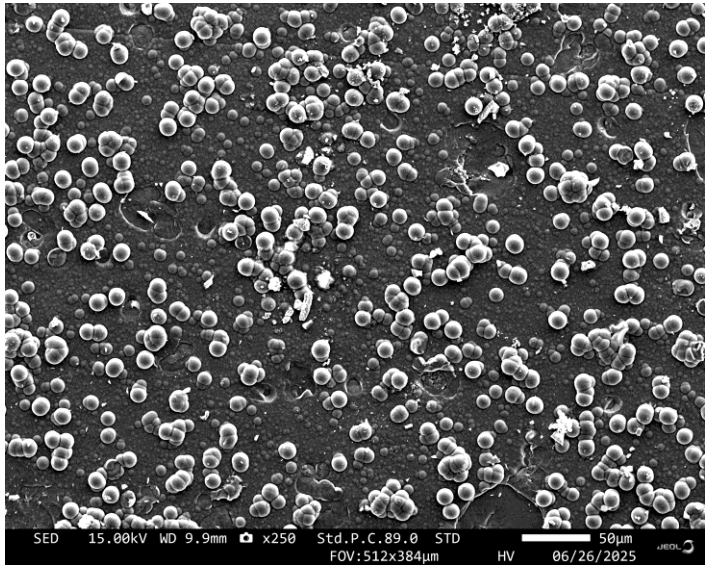


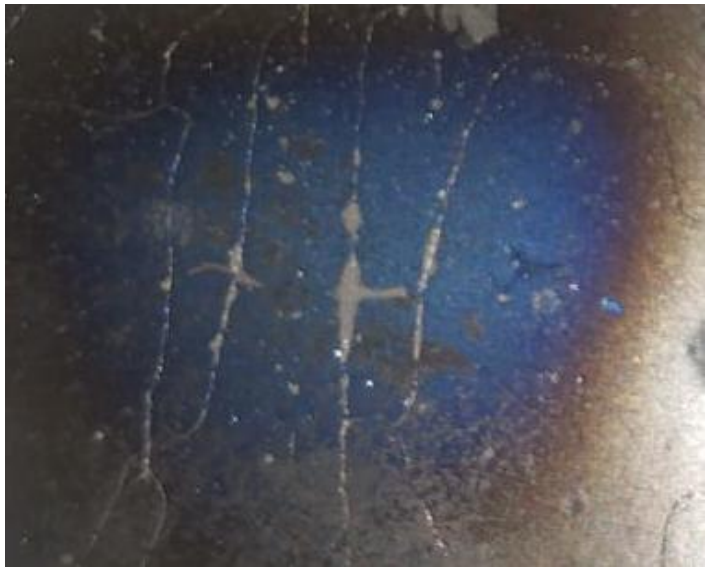
❑ Après cyclage thermique : contraintes dans l'échantillon SiC/Al_2O_3/APMT

- **Oxydation du SiC** : confirmée par l'EDX et la DRX
- Augmentation de l'absorptivité à **92.9±1.8%**
- **Propagation des fissures**

Couches	Numérique (MPa)	Expérimental (MPa)	Limite de compression (MPa)
SiC	-2530	-1128±328	-2500 to -3500

- **la compression expérimentale est 50% plus petite que la valeur numérique**
  - La DRX est très dispersive
  - Le modèle est très simplifié
- **Remarque :** la valeur numérique semble mieux décrire les observations (fissures et délaminations)
- **Comparaison avec d'autres méthodes**
  - Photoluminescence
  - Mesure de courbure (Stoney)





- La simulation et l'expérimentation sont très proches pour l'alumine mais méritent une correction pour le SiC.
- Problèmes observés : délamination et fissures venant de l'alumine.
- La compression obtenue (modèle et expérience) est en accord avec les observations sur l'échantillon.
- Comparaison avec d'autres méthodes de calcul de contraintes
- Augmentation de l'absorption avec l'oxydation du SiC et épaisseur de couche d'oxyde faible (non détectée par la DRX)
- Le concept est prometteur, mais a besoin **d'optimisation** pour la stabilité à long terme.
- Améliorer les conditions de dépôt : adhérence du SiC
- Réaliser plusieurs cycles et estimer la durabilité de la multicouche

Ce travail a bénéficié d'un financement de l'État français géré par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme France 2030, référence ANR-22-PESP-0005

Merci pour votre attention

Thiane Ndiaye : thiane.ndiaye@cnrs.fr

Journées annuelles du réseau thématique COnCOrD
09 et 10 octobre 2025



Annexe 1 : Mesure de contraintes résiduelles par DRX

$$d_{hkl} = \frac{1+\nu}{E} \times \sigma \times d_0 \times \sin^2\psi + \frac{-2\times\nu}{E} \times \sigma \times d_0 + d_0$$

$$\frac{d_{hkl}-d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \times \sigma \times \sin^2\psi + \frac{-2\times\nu}{E} \times \sigma$$

$$\varepsilon = \frac{d_{hkl}-d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \times \sigma \times \sin^2\psi + \frac{-2\times\nu}{E} \times \sigma$$

$$\varepsilon = C\sin^2\psi + D = f(\sin^2\psi) \text{ where}$$

$$C = \frac{1+\nu}{E} \times \sigma \text{ and } D = \frac{-2\times\nu}{E} \times \sigma$$

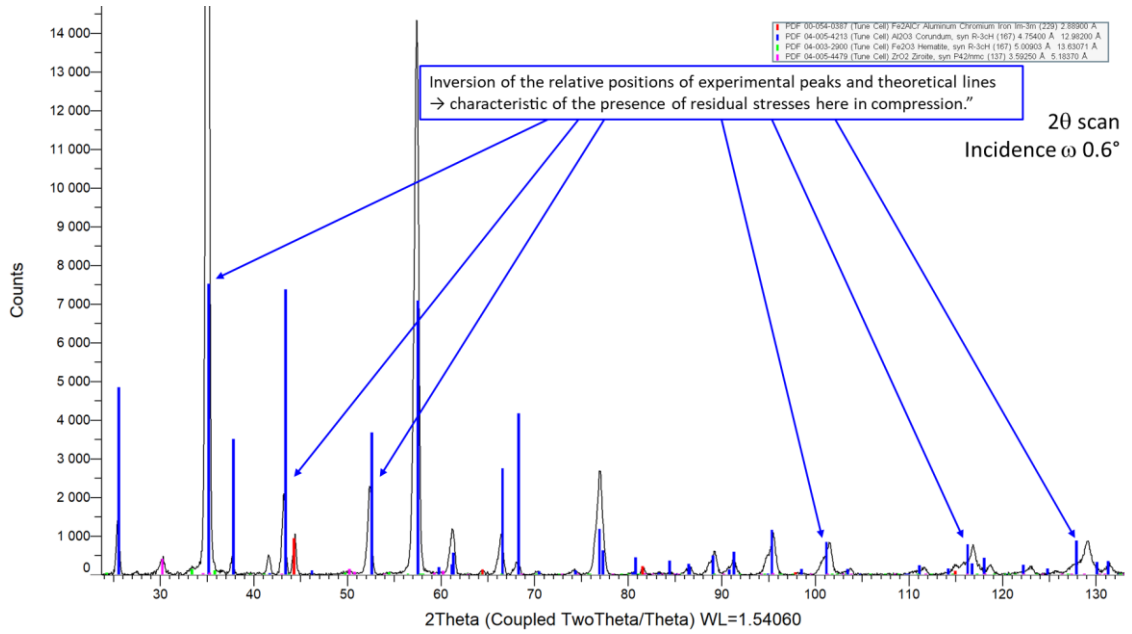
$$\sigma = \frac{E}{1+\nu} \times C$$

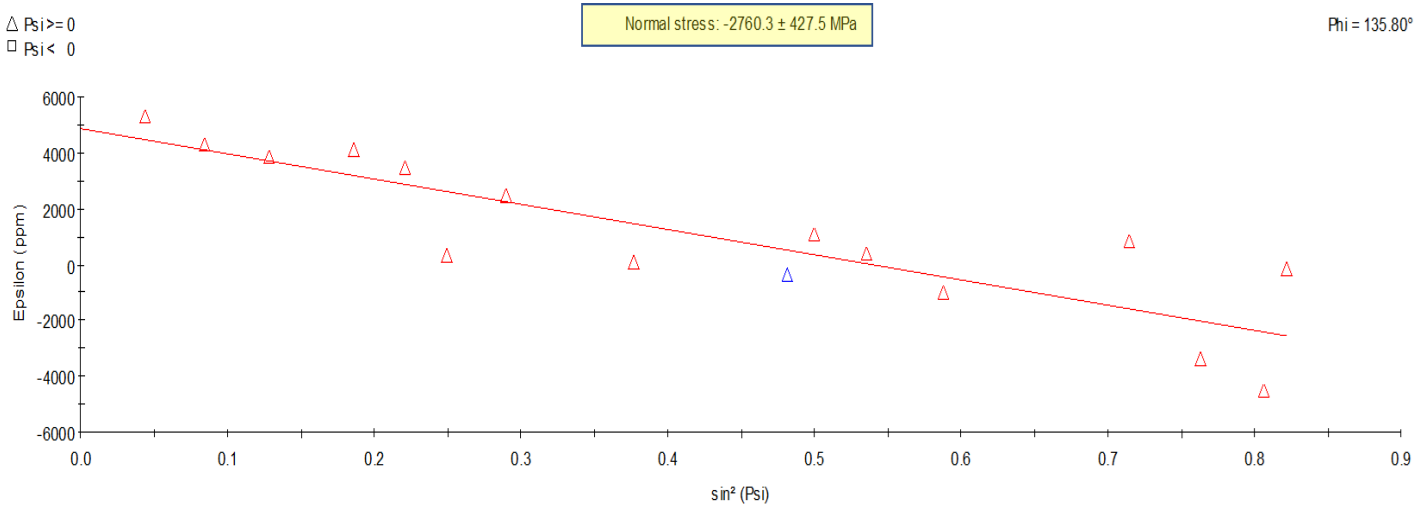
ε est la déformation dépendant de ψ

E est le module de Young

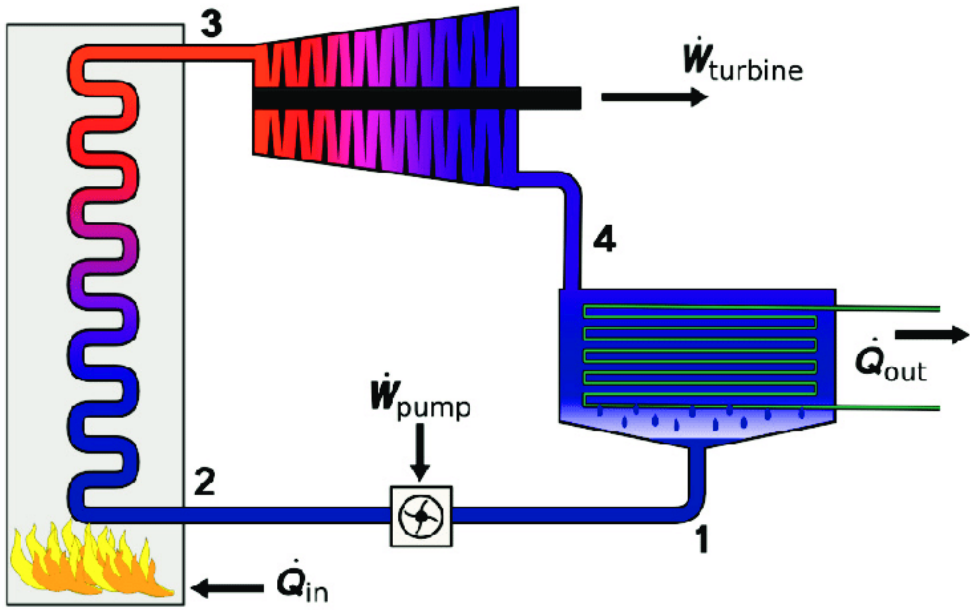
ν est le coefficient de Poisson

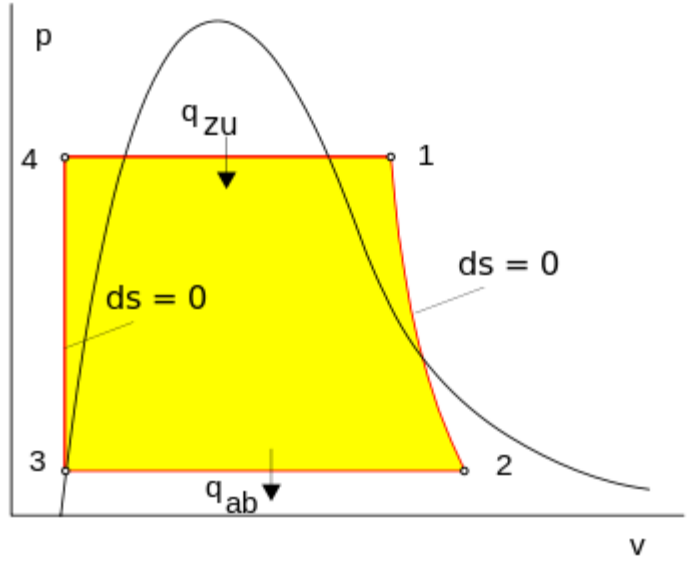
σ est la contrainte résiduelle





Annexe 2 : Rankine cycle

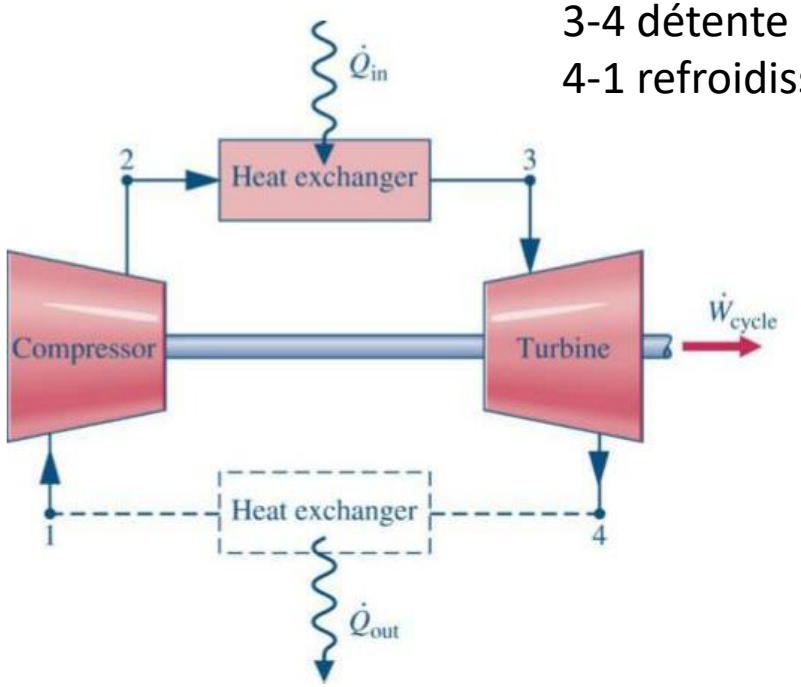


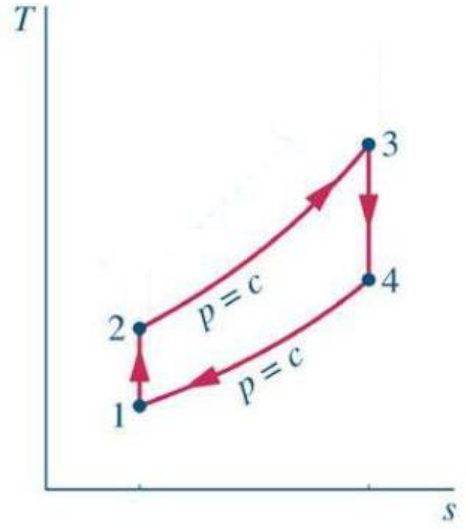


1-2 compression isentropique (compresseur)
2-3 chauffage à pression constante
3-4 détente isentropique (turbine)
4-1 refroidissement à pression constante

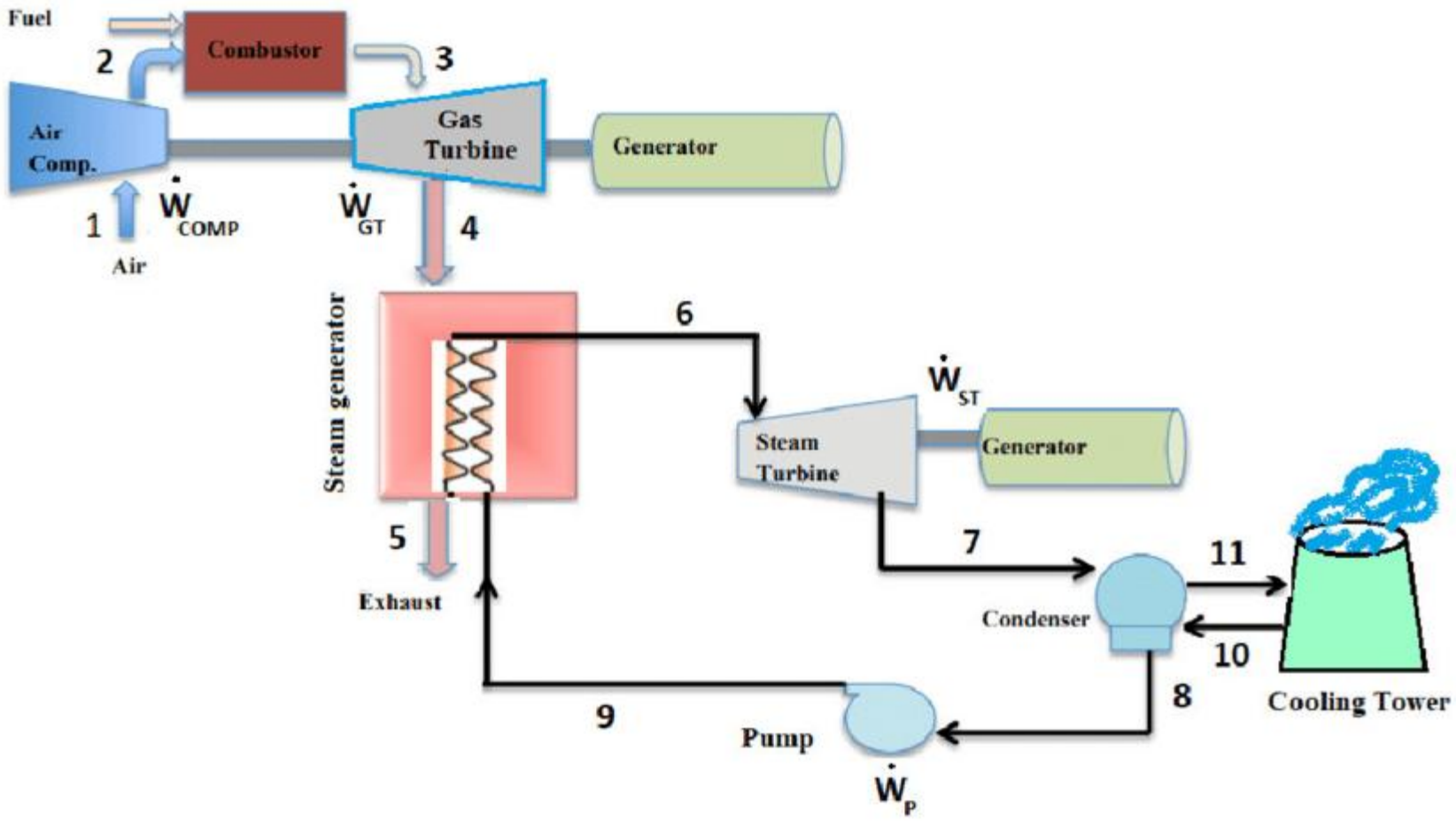
Annexe 3 : Brayton cycle

1-2 compression adiabatique et réversible
2-3 chauffage à pression constante
3-4 détente adiabatique et réversible (turbine)
4-1 refroidissement à pression constante





Annexe 4 : Combined cycle



The resultant force due to the uniform strain component is zero

$$\int_{z_{o,b}(t)}^{z_{c,bm}(t)} \frac{E_{o,b}}{1-\nu_{o,b}} \left[c(z,t) - \varepsilon_{o,th,b}(z,t) - \varepsilon_{o,cr,b}(z,t) - \varepsilon_{o,l,b}(z,t)\right] dz$$

$$+ \sum_{i=1}^{m} \int_{z_{c,b_i}(t)}^{z_{c,b_{i-1}}(t)} \frac{E_{c,b_i}}{1-\nu_{c,b_i}} \left[c(z,t) - \varepsilon_{c,th,b_i}(z,t) - \varepsilon_{c,cr,b_i}(z,t) - \varepsilon_{o,g,b_i}(z,t)\right] dz$$

$$+ \int_{-t_s\frac{t}{2}}^{\frac{t_s(t)}{2}} \frac{E_s}{1-\nu_s} \left[c(z,t) - \varepsilon_{s,th}(z,t) - \varepsilon_{s,cr}(z,t)\right] dz$$

$$+ \sum_{i=1}^{m} \int_{z_{c,t_{i-1}}(t)}^{z_{c,t_i}(t)} \frac{E_{c,t_i}}{1-\nu_{c,t_i}} \left[c(z,t) - \varepsilon_{c,th,t_i}(z,t) - \varepsilon_{c,cr,t_i}(z,t) - \varepsilon_{o,g,t_i}(z,t)\right] dz$$

$$+ \int_{z_{c,t_n}(t)}^{z_{o,t}(t)} \frac{E_{o,t}}{1-\nu_{o,t}} \left[c(z,t) - \varepsilon_{o,th,t}(z,t) - \varepsilon_{o,cr,t}(z,t) - \varepsilon_{o,l,t}(z,t)\right] dz = 0$$

The sum of bending component with respect to the bending axis is zero

$$\int_{z_{o,b}(t)}^{z_{c,bm}(t)} \sigma_{o,b}(z,t).[z-t_b(t)]dz + \sum_{i=1}^{m} \int_{z_{c,b_i}(t)}^{z_{c,b_{i-1}}(t)} \sigma_{c,b_i}(z,t).[z-t_b(t)]\,\mathrm{dz}$$
$$+ \int_{-\frac{t_s(t)}{2}}^{\frac{t_s(t)}{2}} \sigma_s(z,t).[z-t_b(t)]dz + \sum_{i=1}^{m} \int_{z_{c,t_{i-1}}(t)}^{z_{c,t_i}(t)} \sigma_{c,t_i}(z,t).[z-t_b(t)]\,\mathrm{dz}$$
$$+ \int_{z_{c,t_n}(t)}^{z_{o,t}(t)} \sigma_{o,t}(z,t).[z-t_b(t)]dz = 0$$

The resultant force due to the bending component is zero

$$\int_{z_{o,b}(t)}^{z_{c,b_m}(t)} \frac{E_{o,b}}{1-\nu_{o,b}} . \frac{z-t_b(t)}{r(t)} dz + \sum_{i=1}^{m} \int_{z_{c,b_i}(t)}^{z_{c,b_{i-1}}(t)} \frac{E_{c,b_i}}{1-\nu_{c,b_i}} . \frac{z-t_b(t)}{r(t)} dz$$
$$+ \int_{-\frac{t_s(t)}{2}}^{\frac{t_s(t)}{2}} \frac{E_s}{1-\nu_s} . \frac{z-t_b(t)}{r(t)} dz + \sum_{i=1}^{m} \int_{z_{c,t_{i-1}}(t)}^{z_{c,t_i}(t)} \frac{E_{c,t_i}}{1-\nu_{c,t}} . \frac{z-t_b(t)}{r(t)} dz$$
$$+ \int_{z_{c,t_n}(t)}^{z_{o,t}(t)} \frac{E_{o,t}}{1-\nu_{o,t}} . \frac{z-t_b(t)}{r(t)} dz = 0$$