



**HAL**  
open science

## Comportement thermomécanique de revêtements céramiques

Thiane Ndiaye, Ludovic Charpentier, Reine Reoyo-Prats, Frédéric Mercier,  
Raphaël Boichot

► **To cite this version:**

Thiane Ndiaye, Ludovic Charpentier, Reine Reoyo-Prats, Frédéric Mercier, Raphaël Boichot. Comportement thermomécanique de revêtements céramiques. Journées Annuelles du GDR TAMARYS, Jun 2023, Nancy, France. hal-04228571

**HAL Id: hal-04228571**

**<https://hal.science/hal-04228571>**

Submitted on 4 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Comportement thermomécanique de revêtements céramiques

Thiane NDiaye<sup>1</sup>, Ludovic Charpentier<sup>1</sup>, Reine Reoyo-Prats<sup>2</sup>, Frédéric Mercier<sup>3</sup>, Raphaël Boichot<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PROMES-CNRS, 7 rue du four solaire, 66120 Font-Romeu Odeillo, France

<sup>2</sup>PROMES-CNRS, Rambla de la thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan, France

<sup>3</sup>SIMaP-CNRS/Université Grenoble-Alpes/Grenoble INP, 1130 rue de la piscine, Domaine Universitaire, BP 75, 38402 Saint-Martin d'Hères, France

\* Contact : [ludovic.charpentier@promes.cnrs.fr](mailto:ludovic.charpentier@promes.cnrs.fr)

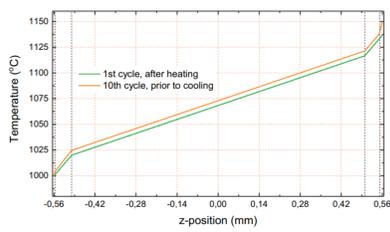
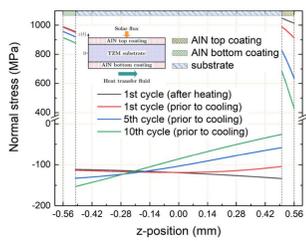
## Contexte et objectifs

- Les sollicitations mécaniques dues à l'alternance de cycles de montées et de descentes rapides en températures (entre la température ambiante et le point de fonctionnement supérieur à 1000 °C) sont source d'endommagement des matériaux céramiques pouvant être utilisés comme récepteurs de centrales solaires à tour.
  - Dans le cadre d'un projet ANR (2016-2021) mis en place entre les laboratoires PROMES et SIMaP (Science de l'Ingénierie, Matériaux et Procédés), les travaux de thèse de Danying Chen [1] ont permis de développer un modèle analytique permettant de déterminer le gradient de température et la répartition des contraintes au sein d'un matériau constitué d'un substrat revêtu d'une céramique ; soumis à un flux solaire concentré d'un côté, devant porter un fluide caloporteur à une température T de l'autre.
- ⇒ Un stage de master 2 effectué au laboratoire PROMES a eu pour objectif d'adapter ce modèle à un empilement différent et de comparer les résultats du modèle aux observations expérimentales (mesures de contraintes par spectrométrie Raman et Diffraction de Rayons X) après une campagne de vieillissement accéléré sur la plateforme SAAF (Solar Accelerated Aging Facility) [2].

## Modèle utilisé

Modèle 1D développé sous Matlab: calcul du profil de température et de contraintes dans l'épaisseur d'un assemblage alliages + revêtements céramiques prenant en compte:

- Les contraintes liées aux conditions de dépôt
- Les chocs thermiques liés à l'exposition sous flux solaire concentré
- L'oxydation du revêtement.

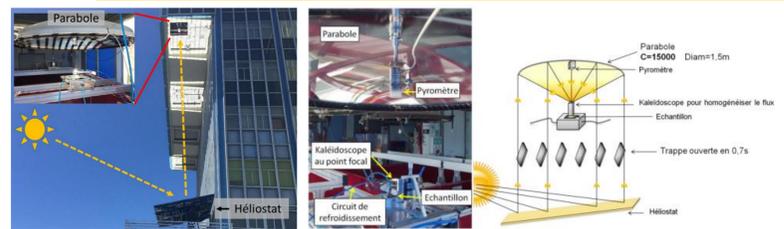


Répartition des contraintes et profil de température au sein d'un matériau composite constitué d'un alliage à base molybdène (TZM) revêtu d'AlN après plusieurs cycles de montée et descente en température (le plateau durant 10h). La température du fluide caloporteur est de 1000°C, le flux solaire incident de 10 MW.m<sup>2</sup> [1]

## Équipement expérimental

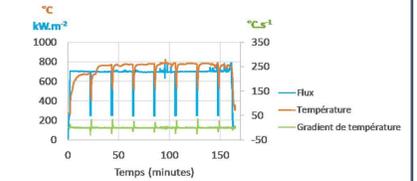
### SAAF (Solar Accelerated Aging Facility)

(placé au point focal d'un four solaire de 1,5 kW)



Emplacement, image et schéma descriptif du dispositif SAAF [2]

Possibilité de cycle de maintien en température, avec montée et descente rapide en température grâce à la rapidité d'ouverture/fermeture de l'obturateur



Exemple de cycles de montée descente en température opérés sur la SAAF, substrat T91/Pyromark [2]

## Avancement actuel

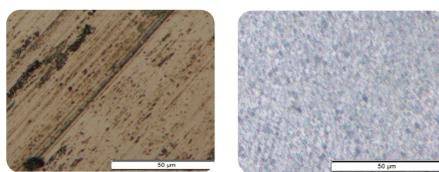
Recherche de paramètres (bibliographie, interpolation de données) à tester sur le modèle développé par D. Chen [1] ⇒ Essais du modèle en cours

Propriétés	Fe-Cr-Al-Mo	3C-SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Module de Young E(GPa)	= -0,0901*T + 222,31 [3]	430 [4]	379 [1]
Coefficient de Poisson ν	0,3 [1]	0,16 [4]	0,25 [1]
Densité (g.cm <sup>-3</sup> )	7,25 [1]	3,21 [4]	3,87 [5]
Conductivité thermique (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	27 [1]		10 [1]
α <sub>0</sub> (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	10,768 [1]	0,243 [4]	-2,002 [1]
α <sub>1</sub> (10 <sup>-6</sup> K <sup>-2</sup> )	4,059.10 <sup>-3</sup> [1]	0,013 [4]	0,039 [1]
α <sub>2</sub> (10 <sup>-6</sup> K <sup>-3</sup> )	-5,860.10 <sup>-6</sup> [1]	-1,541.10 <sup>-5</sup> [4]	-6,005.10 <sup>-6</sup> [1]
α <sub>3</sub> (10 <sup>-6</sup> K <sup>-4</sup> )	-6,174.10 <sup>-9</sup> [1]	8,801.10 <sup>-9</sup> [4]	4,828.10 <sup>-8</sup> [1]
α <sub>4</sub> (10 <sup>-6</sup> K <sup>-5</sup> )	1,065.10 <sup>-11</sup> [1]	-2,428.10 <sup>-12</sup> [4]	-1,900.10 <sup>-11</sup> [1]
α <sub>5</sub> (10 <sup>-6</sup> K <sup>-6</sup> )	4,569.10 <sup>-15</sup> [1]	2,576.10 <sup>-16</sup> [4]	2,897.10 <sup>-15</sup> [1]

Exemple des données extraites de la bibliographie [1; 4-5] ou de loi d'interpolation à partir des données du fournisseur [3]. Le coefficient d'expansion thermique de chaque matériau est calculé par une loi d'ordre 5:  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 * T + \alpha_2 * T^2 + \alpha_3 * T^3 + \alpha_4 * T^4 + \alpha_5 * T^5$

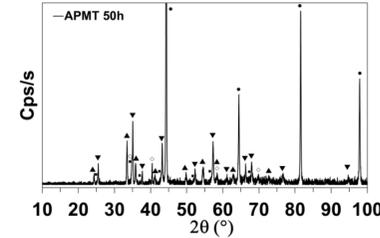
Prise en main du bâti d'expérimentation SAAF et d'outils de caractérisation (Raman, DRX) pouvant permettre d'évaluer les contraintes à la surface du matériau [4]

⇒ Essais à venir d'échantillon APMT non traité et oxydé pendant 50h sous air à 1100 °C



Référence Sa = 102 ± 14 nm Oxydé Sa = 158 ± 75 nm

Images en microscopie optique (et rugosité surfacique arithmétique mesurée par profilomètre optique) des échantillons APMT de référence (non traité) et après 50h d'oxydation sous air à 1100 °C



Diffraction de rayon X sur l'échantillon APMT après 50h d'oxydation sous air à 1100 °C et tableau référençant les pics liés au substrat (•) et ceux liés aux différents oxydes formés

Formula	Symbol
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	•
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	▲
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	▼
SiO <sub>2</sub>	○
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	■

## Conclusions & perspectives

- Adaptation du modèle en cours avec les paramètres concernant l'assemblage APMT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC
  - Prise en main du bâti expérimental (SAAF) et des outils de caractérisation (DRX, Raman) pour analyser les différentes couches d'oxyde
- ⇒ Lien à établir par la suite entre:
- Le profil de température modélisé et les mesures expérimentales
  - Le profil de contraintes donné par le modèle et le résultat des caractérisation DRX et Raman

### Références:

- [1] D. Chen et al., 'Modeling multilayer coating systems in solar receivers', Surface and Coatings Technology, 399 (2020) 126102. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126102.
- [2] R. Reoyo-Prats, 'Étude du vieillissement de récepteurs solaires – Estimation de propriétés thermophysiques par méthode photothermique associée aux outils issus de l'Intelligence Artificielle'; thèse UPVD soutenue le 24 septembre 2020.
- [3] <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/tube/kanthal-apmt/> (consultée le 16 juin 2023)
- [4] D. Chen, 'Multilayer coatings based on aluminum nitride coatings for receivers in concentrated solar power technology', Thèse UGA soutenue le 15 novembre 2019
- [5] 'Materials Data on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Materials Project'. LBNL Materials Project; Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, CA (United States), 2020.