

**Septièmes Journées Annuelles
du GDR TAMARYS**

7 - 9 juillet 2025

LIMOGES



Résumés Communications Orales

Les barrières thermiques : du procédé à la caractérisation

Alan Kéromnès

IRCER UMR CNRS 7315 Université de Limoges

☐ Poster ☒ Oral

L'élévation des températures de fonctionnement des turbines haute pression nécessite l'optimisation des barrières thermiques pour garantir leur durabilité face aux contraintes thermiques et environnementales, notamment l'infiltration des CMAS (Calcium, Aluminium, Magnésium et Silice).

Dans l'optique de mieux comprendre les sollicitations thermiques (gradient thermique) et chimiques (CMAS) auxquelles sont confrontées les BT, un essai dit « représentatif » des conditions de vol est mis en œuvre et fiabilisé par différents outils de diagnostic.

La projection plasma de suspension par injection axiale (ASPS : Axial Suspension Plasma Spray) est utilisé pour réaliser ces barrières thermiques. Dans le but de mieux comprendre et contrôler la microstructure produite par ce procédé, une étude des paramètres d'injection et du plasma est effectuée.

Enfin, l'analyse comparative de différentes microstructures et architectures (monocouches YSZ et bi-couches GdZ) révèle l'influence majeure de la porosité et de la morphologie (espaces inter-colonnaires) sur le gradient thermique et la résistance face aux CMAS.

Le lien entre les paramètres du procédé et la microstructure permet alors de comprendre les conséquences induites sur les propriétés thermiques (conductivité et gradient thermique) et la résistance aux CMAS.

Références :

Durabilité des barrières thermiques et environnementales céramiques : équilibres thermodynamiques dans le système $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$

Justine Bonnal ⁽¹⁾, Carine PETITJEAN ⁽²⁾, Pierre-Jean PANTEIX ⁽²⁾, David BONINA ⁽²⁾, Simon ARNAL ⁽³⁾, Michel VILASI ⁽²⁾

¹ Safran Aircraft Engines, 91000 Corbeil-Essones, France

² Université de Lorraine, CNRS, IJL, F-54000 Nancy, France

³ Safran Ceramics, 33700 Mérignac, France

☐ Poster ☒ Oral

La durabilité des revêtements céramiques utilisés pour protéger les aubes de turbines des moteurs aéronautiques dépend fortement de leur capacité à supporter la corrosion par les aluminosilicates de calcium et de magnésium (i.e. CMAS) ^[1,2]. Ces derniers s'infiltrent dans la microstructure des revêtements du fait de leur état liquide aux températures d'utilisation. La haute réactivité entre liquides silicatés et céramiques est cependant à même de fournir une protection du fait de la précipitation de phases potentiellement passivantes, telles que l'apatite $\text{Ca}_2\text{RE}_8(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2$. La littérature fournit des données thermodynamiques précieuses pour expliquer les mécanismes réactionnels et les équilibres dans ces systèmes complexes, tels les diagrammes ternaires $\text{CaO-SiO}_2\text{-RE}_2\text{O}_3$ ^[3-4]. Or, même en se limitant à des systèmes simplifiés (liquide $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, i.e. CAS), l'interaction avec les céramiques riches en terres rares implique de considérer a minima un système quaternaire. La présence d'alumine a notamment une influence sur l'étendue du domaine liquide ^[5]. Afin de décrire les équilibres observés dans des essais d'interaction entre un CAS et des matériaux riches en yttrium, l'influence de la teneur en alumine dans le ternaire $\text{CaO-SiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ a été étudiée à 1300°C : des ajouts de 2 à 10 mol.% d' Al_2O_3 ont été effectués dans deux systèmes représentatifs d'un liquide acide, ou basique. La caractérisation des mélanges à l'équilibre a été effectuée par diffraction des rayons X, microscopie électronique et microsonde de Castaing. Dans tous les cas, la présence d'un liquide est identifiée, dès l'addition de 2 mol.% d'alumine. L'étendue du domaine liquide est d'autant plus marquée que celui-ci est acide (riche en silice). Cette étendue a une influence directe sur la nature des phases en équilibre et sur la limite de solubilité de l'yttrium. La pertinence des données ainsi collectées a été vérifiée en observant les interactions entre un liquide CAS à 1300°C et diverses sources d'yttrium : oxyde Y_2O_3 , monosilicate Y_2SiO_5 et disilicate $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$. Dans tous les cas, l'équilibre établi est bien celui attendu entre un liquide et le cyclosilicate d'yttrium $\text{Ca}_3\text{Y}_2(\text{Si}_3\text{O}_9)_2$. Il a de plus été montré que le mécanisme réactionnel a une influence sur la morphologie des phases précipitées.

Références :

- [1] C.G. Levi et al., MRS Bulletin 37 (2012) 932-941.
- [2] D. Tejero-Martin et al., Journal of the European Ceramic Society 41 (2021) 1747-1768.
- [3] D.L. Poerschke et al., Journal of the European Ceramic Society 36 (2016) 1743-1754.
- [4] D.L. Poerschke et al., Journal of Alloys and Compounds 695 (2017) 1397-1404.
- [5] D.L. Poerschke et al., Acta Materialia 145 (2018) 451-461.

Développement métrologique et matériaux haute température sous environnement complexe

G. Pinaud ; B. van Ootegem

Ariane Group – 33160 Saint Médard en Jalles

☐ Poster ☒ Oral

Le présent document décrit une technique de mesure radiative mise en place à Ariane Group pour accéder aux paramètres thermométriques de surface lors de tests aérothermiques de matériaux complexes. Différentes installations expérimentales et configurations d'essai permettant d'élever en température des matériaux de protection thermiques sont décrites. Lors des essais de caractérisation matériaux, la connaissance de paramètres émissivité et température des matériaux n'est pas a priori une donnée connue, celle-ci est pourtant cruciale pour extraire les paramètres matériau que sont par exemple conductivité ou diffusivité. La technique proposée est basée sur l'acquisition temporelle de l'information de rayonnement spectral de l'échantillon soumis à la température. Celle-ci est ensuite comparée à un rayonnement de Planck afin d'en extraire les paramètres thermométriques de surface.

L'expérience étant basée sur le rayonnement émis par l'échantillon sur l'équipement, ce rayonnement peut être affecté de multiples manières, par diffusion, absorption ou réactions chimiques sur le trajet optique. La juxtaposition d'une simulation physico-chimique de l'expérience permet d'ajuster et d'optimiser les résultats et d'en extraire des données réalistes. On obtient ainsi un jugement de valeur sur la mesure qui peut être discuté et comparé aux mesures classiques afin d'évaluer le potentiel de la technique de mesure.

La présente technique a été utilisée depuis sur un très grand nombre de cas qui peuvent être favorables ou au contraire plus difficiles. Comme toute technique de mesure, celle-ci présente des limitations, mais permet de manière générale l'acquisition d'informations pertinentes pour des températures allant de 400°C à 3000°C. Le moyen de mesure présente l'avantage de pouvoir être implémenté sur presque tous les cas de figures expérimentaux, en laboratoire comme en essai extérieur.

Références :

Hay B., Hameury J., Fleurence N., Lacipiere P., Grelard M., Scoarnec V., Davee. G., "New Facilities for the Measurements of High-Temperature Thermophysical Properties at LNE," *Int J Thermophys* 35:1712–1724, 2014.

Full-Spectrum Fitting Method Applied to YAG:Dy : Impact of Oxygen Content and Laser Fluence on Wall-Temperature Phosphor Thermometry for Combustion

Tobias Guivarch^{1*}, Hugo Samson^{1*}, Jérôme Bonnet¹, Jessy Elias¹,
Sébastien Ducruix¹, Clément Mirat¹, Christopher Betrancourt¹,
Guilhem Dezanneau², Ronan Vicquelin¹

¹Université Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, Laboratoire EM2C, Gif-sur-Yvette, France

²Université Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, Laboratoire SPMS, Gif-sur-Yvette,
France

☒Poster ☒Oral

Achieving the European net-zero greenhouse gas emissions target requires the development of sustainable combustion processes across various industrial sectors. These promising alternatives introduce new challenges, such as modifying wall heat transfer. Accurate surface temperature measurements are essential for understanding these effects. Laser-Induced Phosphorescence (LIP) provides a semi-invasive method that exploits the temperature-dependent phosphorescence spectra of thermographic phosphors. YAG:Dy is a thermographic phosphor that emits a phosphorescence signal over the range of 300K to 2000K. However, its poor sensitivity with the intensity ratio method and its low sensitivity at lower temperatures with the lifetime method limit its use to high-temperature combustion applications. Additionally, its sensitivity to ambient oxygen reduces the accuracy of those methods. This study evaluates the performance of the Full-Spectrum Fitting (FSF) method, developed by the EM2C Laboratory [1], when applied to YAG:Dy. The method leverages the phosphor's spectral temperature dependence over a wide range (303 to 1773K), achieving an accuracy of 0.3K and a precision of 8.4K under given experimental conditions. It is observed that there is a laser fluence threshold above which temperature determination using the FSF method becomes independent of laser fluence. The impact of YAG:Dy's sensitivity to oxygen concentration on temperature measurement is quantified. In the worst case, uncertainty in oxygen concentration can introduce a temperature error ranging from 7 to 19K. Guidelines are provided to help mitigate these sensitivities in combustion applications.

Références :

[1] V. Lechner, C. Betrancourt, C. Mirat, P. Scoufflaire, S. Ducruix, Full spectrum fitting method: a new approach for instantaneous phosphor thermometry in harsh environments, Experiments in Fluids 63 (7) (2022) 110.

Quelques applications et développements récents dans le domaine du rayonnement des gaz à haute température et des plasmas

Philippe Rivière, Anouar Soufiani

Laboratoire Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (EM2C)

☐ Poster ☒ Oral

Nous décrivons dans un premier temps les principes que nous avons suivi pour construire une base de données spectroscopiques exhaustive, la base HTGR pour « High Temperature Gas Radiation database » puis, dans un deuxième temps, nous illustrons l'utilisation de cette base, éventuellement complétée par d'autres bases pour les molécules polyatomiques, pour des applications de transfert radiatif à l'équilibre thermodynamique local, ou hors équilibre. Les mécanismes radiatifs à prendre en compte dans les applications considérées comprennent les transitions rovibroniques pour les molécules diatomiques, les transitions vibro-rotationnelles pour quelques molécules polyatomiques d'intérêt pratique, les transitions électroniques pour les atomes et ions, ainsi que différents types de transition lié-libre et libre-libre. En ce qui concerne les applications, étudiées le plus souvent en collaboration avec des équipes de l'ONERA et du CNES, nous discuterons le rôle du rayonnement dans le problème de foudrolement des aéronefs où le plasma de type arc électrique impulsif peut être considéré à l'ETL, ainsi que dans d'autres applications où il est nécessaire de tenir compte du déséquilibre thermodynamique local, notamment du déséquilibre vibrationnel. Nous présenterons dans ce cadre la reconstruction des données de vol de la capsule Exomars-2016 de rentrée atmosphérique Martienne et discuterons le rôle du déséquilibre vibrationnel sur le rayonnement de jets de moteurs fusée à haute altitude.



Elaboration de composites C_f/ZrC_m par la synthèse en sels fondus

Alexandre EL MELHOUI¹, Laurence MAILLÉ¹, James BRAUN², Francis REBILLAT¹

¹ Laboratoire des composites thermostructuraux UMR 5801 (Université de Bordeaux, allée de la Boétie, 33600 Pessac)

² CEA, DAM, Le Ripault, F-37260 Monts, France

L'exploration spatiale implique le retour sur Terre ou l'atterrissage sur d'autres planètes de navettes spatiales, ce qui nécessite de traverser l'atmosphère lors de la rentrée atmosphérique. Durant ce processus, les engins subissent des températures extrêmes ($\approx 2000^\circ\text{C}$) et une forte oxydation, ce qui met à rude épreuve les matériaux actuels des boucliers thermiques. Les composites céramiques utilisés aujourd'hui offrent une faible résistance à l'oxydation, mais l'ajout de céramiques ultra-réfractaires (UHTC) semble prometteur [1], bien que les techniques de fabrication usuelles de ces matériaux (RMI, CVI, PIP) limitent encore leur efficacité et leur durée de vie [2]. Pour surmonter les limitations techniques des composites $C_f/UHTC_m$ actuels, une approche innovante est proposée : la synthèse en sels fondus [3].

Ce procédé comporte quatre étapes principales : (1) le mélange des précurseurs et des sels, (2) le chauffage, (3) le lavage et (4) le séchage, ainsi que deux mécanismes réactionnels : (i) solution-précipitation et (ii) réaction-diffusion. La sélection du sel repose sur une plage thermique étendue à l'état fondu, une viscosité modérée et une pression de vapeur saturante basse, assurant un milieu réactionnel stable. Les précurseurs sont choisis pour leur capacité à se dissoudre dans le sel fondu via la formation d'espèces ioniques stables en solution. Une comparaison des propriétés de plusieurs sels chlorés ainsi que des tests de dissolution du Zr ont été réalisés.

Des fils de carbone revêtus de ZrC et des composites C_f/ZrC_m ont été synthétisés sous argon avec du NaCl comme sel, à diverses températures et durées, afin de déterminer le profil cinétique de la formation de ZrC. Les épaisseurs de ZrC mesurées sont identiques pour les fils revêtus et les composites, pour un temps et une température donnés. Pour les fils, la différence de coefficient de dilatation thermique (CTE) entre la fibre de carbone et le ZrC génère une décohésion à l'interface. Dans les composites, l'ajout d'une interphase PyC compense ces contraintes, éliminant cette décohésion. Comparé au procédé RMI (infiltration de Zr fondu à 1800°C), la synthèse en sel fondu permet une infiltration homogène au cœur des préformes, créant une couche de ZrC autour de chaque fibre individuelle. Ces résultats valident la synthèse par sels fondus comme alternative aux procédés usuels pour l'élaboration de C_f/ZrC_m à plus basse température, maintenant ainsi l'intégrité du renfort fibreux.

Références :

- [1] N. P. Padture, « Advanced structural ceramics in aerospace propulsion », *Nature Mater*, vol. 15, n° 8, p. 804- 809, août 2016, doi: 10.1038/nmat4687.
- [2] C. Liégaut, « Élaboration de composites à matrice céramique ultra-réfractaire résistants aux très hautes températures sous flux gazeux », phdthesis, Université de Bordeaux, 2018. Consulté le: 12 décembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01807643>
- [3] T. Kimura, « Molten Salt Synthesis of Ceramic Powders », in *Advances in Ceramics - Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications*, C. Sikalidis, Éd., InTech, 2011. doi: 10.5772/20472.

Développement d'un banc de mesure d'émissivité spectrale normale à haute température adapté à CeO₂

Léo Gaillard^{1,2}, Abderezak Aouali¹, Julien Aubril¹, Gwenaël Biotteau¹, Pierre-Marie Geffroy², Benoit Rousseau¹

¹ Laboratoire de Thermique et Énergie de Nantes, Université de Nantes, CNRS UMR 6607, La Chantrerie, rue Christian Pauc, CS 50609 – 44306 Nantes CEDEX 3

² Institut de Recherche sur les CERamiques, UMR 7315, Université de Limoges, 12 Rue Atlantis 87068 Limoges

Un des leviers majeurs pour optimiser la production d'hydrogène (H₂) vert par thermochimie solaire utilisant l'oxyde de cérium (CeO₂) est le design radiatif de sa structure 3D. En effet, le rayonnement solaire chauffant l'architecture poreuse par une seule face entraîne un important gradient de température dans la profondeur de la structure. Cela limite la quantité d'oxyde atteignant la température de production, et par conséquent la quantité d'H₂ produite. Pour pallier à ce problème, le design radiatif a pour but d'homogénéiser l'absorption du rayonnement solaire par CeO₂ dans son volume. Pour cela, il est crucial de connaître son émissivité aux conditions de production d'H₂, i.e. 900 à 1500 °C, à pO₂ = 10⁻⁵ atm. Un banc spécifique de mesures d'émissivité à haute température a été développé dans ce but. L'échantillon est chauffé par un laser infrarouge ($\lambda = 1,0 \mu\text{m}$, $d = 2 \text{ cm}$, $P = 2 \text{ kW}$) asservi à un pyromètre bichromatique mesurant la température de surface de l'échantillon, permet ainsi la régulation de la puissance laser. Le flux émis par l'échantillon est collecté par un miroir parabolique hors-axe pour être renvoyé dans un spectromètre IRTF utilisé comme détecteur. Le miroir est motorisé pour pouvoir également être orienté vers un four corps noir de référence afin d'en collecter l'émission pour faire un rapport des flux entre l'échantillon et ce dernier. Les mesures obtenues sous air montrent une montée importante de l'émissivité entre 700 et 1000 °C.

Les spectres sont comparés à une modélisation multi-échelles faite à partir de mesures de réflectance et de transmittance normale hémisphérique à conditions ambiante, ainsi que des mesures de conductivité électriques de 900 à 1500 °C sur l'oxyde de cérium, sous une pO₂ allant de 1 à 10⁻¹⁸ atm [1]. Elle combine le modèle à 2 flux modifié à un modèle de Drude Lorentz pour obtenir des spectres d'émissivité à 900, 1000, 1200, 1400 et 1500 °C, pO₂ = 10⁻⁵ atm. Elle prédit une importante évolution de l'émissivité passant de faible ($\sim 0,2$) à conditions ambiantes, à forte ($\sim 0,84$) dès 900 °C à p(O₂) = 10⁻⁵ atm se traduisant pour une opacification de l'échantillon. Cette évolution est la conséquence de l'augmentation de la conductivité électronique et de la concentration des défauts électroniques dans le matériau avec la température. Les mesures présentant une opacification entre 700 et 1000 °C, en accord avec les spectres modélisés.

Le banc offre également la possibilité de mesurer, en plus de l'émissivité, la diffusivité et l'effusivité thermique du matériau étudié par méthode flash : de premières mesures ont été réalisées sur du carbure de silicium. Un contrôle de l'atmosphère environnante est également à l'étude.

Références :

[1] Gaillard, L. *et al.* **JQSRT** **2025**, en cours de soumission.

Enjeux autour de la modélisation thermo-fluidique des fours de refusion de l'aluminium

Louis Piquard

Constellium Technology Center

La production d'aluminium primaire est l'un des procédés industriels les plus énergivores, générant environ 12 à 16,5 tonnes de CO₂ par tonne d'aluminium produit, principalement en raison de l'électrolyse alimentée par des sources fossiles [1]. En revanche, le recyclage de l'aluminium par refusion de la ferraille ne nécessite qu'environ 5 % de cette énergie, avec une empreinte carbone réduite à environ 0,6 kg CO₂/kg d'aluminium (scope 1), ce qui en fait une voie privilégiée pour la transition vers une économie circulaire. En 2025, environ 35 % des 100 millions de tonnes d'aluminium produites annuellement proviennent du recyclage, une proportion qui devrait atteindre 50 % d'ici 2050 [1].

Dans ce contexte, la refusion de déchets en fin de vie représente un enjeu majeur, tant du point de vue du tri des déchets, de la gestion des pollutions organiques, que de la maîtrise des émissions indirectes (scope 3). Par ailleurs, la décarbonation du procédé de refusion, notamment par l'utilisation de vecteurs énergétiques alternatifs comme l'hydrogène, ouvre de nouvelles perspectives technologiques [2]. L'ensemble de ces défis rend indispensable le développement de modèles prédictifs pour le procédé de refusion, afin de soutenir la mise en place de boucles de recyclage robustes et d'accompagner le déploiement de technologies de chauffe innovantes et bas carbone.

Après une présentation du procédé de refusion, des bilans énergétiques permettront d'évaluer les performances énergétiques de technologies conventionnelles (brûleurs régénératifs, oxy-combustion) et innovantes (combustion d'hydrogène, torche plasma). Un modèle thermique métier simplifié, de type 0D, sera ensuite présenté [3]. Il permet de prendre en compte le caractère transitoire du procédé et d'évaluer rapidement l'impact des paramètres de pilotage sur les cinétiques de chauffe. Nous montrerons qu'il est possible, en première approximation, de découpler la modélisation de la combustion de celle de l'évolution thermique du four via l'introduction d'une efficacité intermédiaire : l'efficacité de combustion. Enfin, les limites de ce modèle seront discutées, notamment son incapacité actuelle à intégrer l'effet de la morphologie de la charge sur les performances de fusion, ou à être couplé à un modèle thermo-cinétique d'oxydation du métal. Ces verrous scientifiques, liés à la description fine des interfaces et des gradients thermiques, seront exposés afin de susciter l'intérêt de la communauté pour le développement de modèles plus prédictifs, au service d'un recyclage bas carbone de l'aluminium.

Références :

- [1] D. Raabe et al., «Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys,» *Progress in Materials Science*, vol. 128, 2022.
- [2] HyInHeat European project, «Hydrogen technologies for decarbonization of industrial heating processes,» [En ligne]. Available: <https://hyinheat.eu/>. [Accès le 2024].
- [3] L. Piquard, E. Clément et P.-Y. Menet, «A modeling methodology of new combustion technologies for aluminum remelting furnaces,» *Light Metals*, pp. 1243 - 1249, 2025.

Mesure de la capacité thermique massique et de l'émissivité des métaux liquides par lévitation aérodynamique

Maelenn Le Mener^{1*}, Mickael Courtois¹, Thomas Pierre¹, Elodie Courtois¹, Coline Bourges¹

¹Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

☐ Poster ☒ Oral

Dans le cadre de procédés industriels complexes à haute température, il devient de plus en plus nécessaire d'étudier les propriétés des métaux liquides. Les méthodes de caractérisation sans contact, comme la lévitation aérodynamique, permettent d'atteindre de hautes températures (1500°C-3000°C) et d'éviter la contamination de l'échantillon étudié. La lévitation aérodynamique présente les avantages d'avoir un moyen de chauffage indépendant de la méthode de lévitation et de pouvoir étudier tous types de matériaux, diélectriques comme conducteurs. La détermination de la capacité thermique massique en utilisant un dispositif de lévitation aérodynamique placé dans une enceinte inerte est présentée ici (Figure 1). Un jet d'argon placé sous un échantillon sphérique permet de le faire léviter et un laser de puissance est utilisé pour le chauffage. La Figure 2 présente le type de modulation qu'il est possible d'obtenir avec le chauffage laser tandis que la température est mesurée par un pyromètre. Ce pyromètre trichromatique « maison » a été développé au laboratoire pour mesurer également l'émissivité de l'échantillon spécifiquement à la longueur d'onde du laser. La puissance laser émise pour chaque expérience est mesurée, ainsi, la part absorbée par l'échantillon peut être déterminée (considérant la loi de Kirchhoff). Les résultats d'émissivités/absorptivités obtenus sur du fer et du zirconium liquides seront présentés et discutés.

Pour déterminer la capacité thermique, un modèle numérique développé sur le logiciel Comsol Multiphysics reproduit l'expérience. Ce modèle prend en compte les pertes thermiques, la capacité thermique et une conductivité thermique équivalente de la bille. Les pertes thermiques par rayonnement et convection sont inconnues, mais la variation de température lors de l'expérience est maintenue inférieure à 50 K, ce qui permet de les considérer constantes.

Dans un premier temps, les méthodes inverses sont utilisées pour estimer les trois paramètres précédemment cités via un algorithme de type Levenberg-Marquardt. La capacité thermique de différents métaux (fer, zirconium) est comparée avec la littérature et les limites et incertitudes de cette méthode sont discutées. Enfin une seconde méthode de calcul inédite est proposée permettant de s'affranchir des méthodes inverses. La capacité thermique à nouveau obtenue est présentée et comparée avec l'estimation par minimisation et avec la littérature.

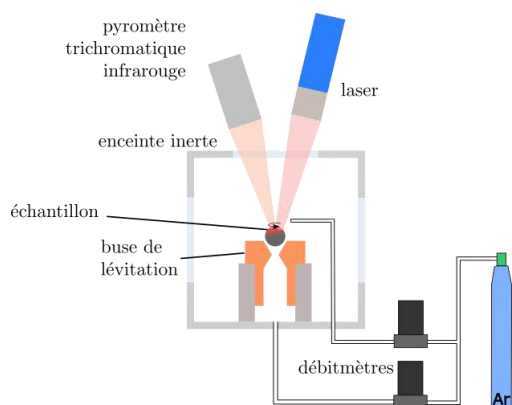


Figure 1 Schéma du dispositif de lévitation

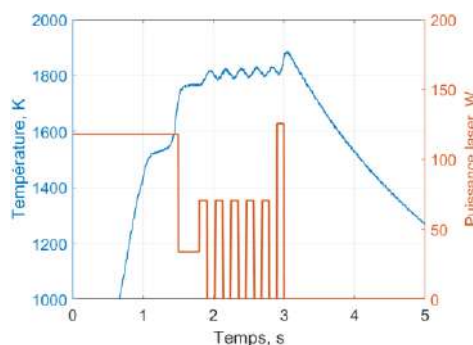


Figure 2 Puissance laser (orange) et température de l'échantillon (bleu) pendant un essai expérimental sur du fer pur

Caractérisation de la multicouche SiC/Al₂O₃/Fe-Cr-Al-Mo

Thiane Ndiaye¹, Reine Reoyo-Prats², Frédéric Mercier³, Christophe Escape¹, Éric Bêche¹, Ludovic Charpentier¹

¹ PROMES-CNRS, 7 rue du Four Solaire F-66120 FONT-ROMEUE ODEILLO, France

² PROMES-CNRS, Rambla de la thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan, France

³SIMaP-CNRS, 1130 rue de la piscine, Domaine Universitaire, BP 75, 38402 Saint-Martin d'Hères, France

*Correspondance : Thiane Ndiaye, thiane.ndiaye@cnrs.fr

■ Poster ■ Oral

Introduction

La gestion des contraintes thermiques et mécaniques dans les systèmes multicouches, en particulier dans les revêtements de protection soumis à des cycles thermiques sévères, reste un défi majeur dans de nombreux secteurs industriels (CSP, aviation, industries à haute température). Ce travail présente les méthodes de caractérisation pour estimer les contraintes dans un système multicouche composé d'un substrat de Kanthal APMT (Fe-Cr-Al-Mo), d'une couche préformée d'alumine (Al₂O₃), et de revêtement en carbure de silicium (SiC). Elle est en contact en face avant avec un flux solaire concentré (1000 W/m²) et en face arrière elle échange sa chaleur avec un fluide de transfert.

Préparation des matériaux

Les échantillons d'APMT sont polis dans un premier temps pour avoir une surface miroir (pour un dépôt de SiC adhérent). Dans un deuxième temps ils sont mesurés pour déterminer les dimensions et pesés pour avoir la masse avant traitement. Après chaque traitement subi (oxydation, dépôt de SiC et cycle thermique) des séries de caractérisation sont réalisées (microscopie optique, mesure d'émissivité, DRX, MEB et profilomètre). L'objectif est de montrer certains résultats obtenus.

Propriétés optiques

Les figures 7, 8 et 9 montrent respectivement les émissivités (absorptivités) spectrales des échantillons non oxydé, oxydé et revêtu de SiC. On constate une émissivité spectrale qui diminue continuellement lorsque la longueur d'onde augmente dans le cas de l'alliage seul. Avec la présence d'alumine l'émissivité se présente sous forme ondulatoire due aux différentes réflexions dans le matériau transparent. On constate la même chose avec le SiC mais avec des oscillations moins prononcées et une émissivité globalement importante. Le tableau 1 donne les valeurs d'émissivité et d'absorptivité totales des différents matériaux. On peut voir que le SiC est un bon choix pour l'absorption solaire avec 82%. L'aspect ondulatoire permet de connaître l'épaisseur des couches minces en utilisant la méthode de Mi et al [2].

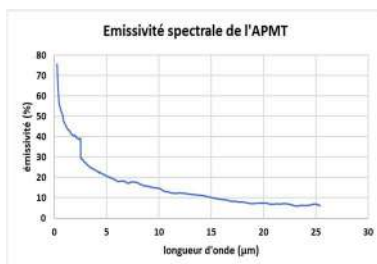


Figure 7 : émissivité spectrale de l'APMT non oxydé

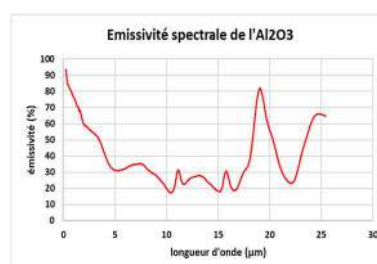


Figure 8 : Emissivité spectrale de l'APMT oxydé 50h à 1100 °C

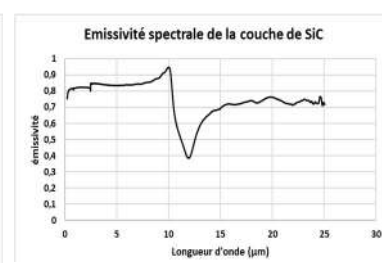


Figure 9 : Emissivité spectrale de l'APMT oxydé 50h à 1100 °C et revêtu de SiC à 1100

Tableau 1 : Propriétés optiques des matériaux constituant la multicouche

Matériaux	Emissivité (%)	Absorptivité solaire (%)
APMT	26,6	50,6
Al ₂ O ₃	40,4	80,3
SiC	82,2	81,5

Microscopie optique

Les figures 1, 2 et 3 montrent respectivement les images optiques de l'échantillon APMT non oxydé, oxydé (environ 2 μm) et oxydé avec revêtement de SiC (environ 10 μm). On remarque des rayures sur la surface de l'échantillon nu qui disparaissent avec l'oxydation. On obtient une surface plus homogène qui favorise l'adhérence de la couche de SiC. L'image de cette dernière montre une répartition du SiC non homogène, l'alumine reste visible. Ceci est dû au fait que la couche de SiC n'est pas assez épaisse, il est prévu d'augmenter le temps de dépôt pour obtenir une couche plus épaisse.



Figure 1 : image optique de l'APMT référence (x50)



Figure 2 : image optique de l'APMT oxydé 50 h à 1100 °C (x50)

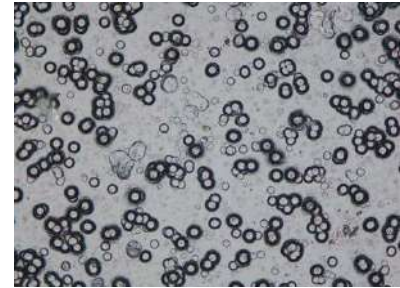


Figure 3 : image optique de l'APMT oxydé 50 h à 1100 °C et revêtu de SiC à 1100 °C (x50)

Diffraction des rayons X

Les figures 4, 5 et 6 montrent respectivement les spectres DRX des échantillons non oxydé, oxydé et revêtu de SiC. On retrouve certains pics du substrat dans les spectres des échantillons oxydé et revêtu de SiC. D'après la littérature, l'APMT s'oxyde en formant de l'Al₂O₃, ceci est confirmé par la DRX avec une présence en majorité des pics d'alumine. Cependant on retrouve quelques pics d'oxyde de Fer et de Chrome mais également des traces de Molybdène. En ce qui concerne le spectre de l'échantillon avec du SiC, on retrouve évidemment du SiC mais également de l'alumine, ce qui confirme les observations au microscope optique (il n'y a pas assez de SiC déposé). La connaissance du spectre de DRX nous permettra d'estimer la déformation et ainsi accéder aux contraintes [1].

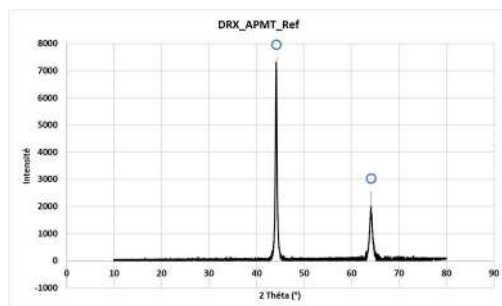


Figure 4 : Spectre DRX l'APMT non oxydé

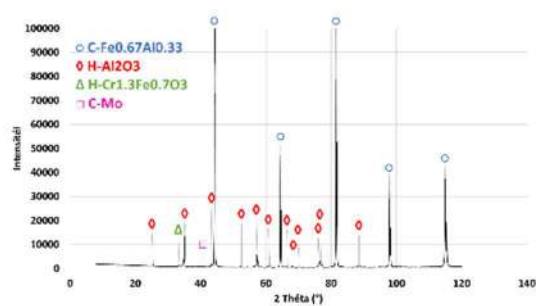


Figure 5 : Spectre DRX de l'APMT oxydé 50 h à 1100 °C

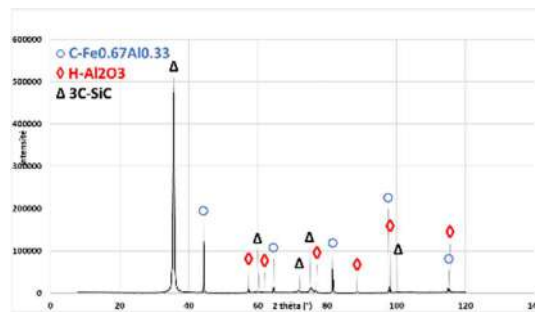


Figure 6 : Spectre DRX de l'APMT oxydé 50h à 1100 °C et revêtu de SiC à 1100 °C

Conclusion

Les résultats montrent une insuffisance de l'épaisseur du SiC qu'il faudra améliorer en augmentant le temps de dépôt. Le SiC présente une bonne absorptivité solaire mais l'importance de son émissivité pourrait poser problème (à voir lors de l'utilisation sous flux solaire).

D'autres méthodes telles que le MEB, l'EDS et le profilomètre sont aussi utilisées pour connaître l'état de surface avec un grossissement plus important, la composition atomique et la courbure des échantillons qui permettra de calculer les contraintes en utilisant la méthode de Stoney [3], [4].

Références

- [1] D. Delbergue, D. Texier, M. Levesque, and P. Bocher, 'Comparison of Two X-Ray Residual Stress Measurement Methods: $\sin^2 \psi$ and $\cos \alpha$, Through the Determination of a Martensitic Steel X-Ray Elastic Constant', in *Residual Stresses 2016: ICRS-10*, Sydney, Australia, Jul. 2016, pp. 55–60. doi: 10.21741/9781945291173-10.
- [2] 'Detecting the Oxidation of Zircaloy Claddings by Infrared Interference | Nano'. Accessed: Aug. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S1793292018500157>
- [3] H. Isselé, 'Caractérisation et modélisation mécaniques de couches minces pour la fabrication de dispositifs microélectroniques-application au domaine de l'intégration 3D', phdthesis, Université de Grenoble, 2014. Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00987507>
- [4] M. A. B. Dhia, 'Détermination des contraintes internes par méthode dynamique résonante : application aux massifs revêtus', phdthesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2016. Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01457159>

Capteurs photoniques infrarouges à superréseaux en conditions extrêmes

Philippe CHRISTOL

Institut d'Electronique et des Systèmes (IES)
CNRS-Université de Montpellier

☐ Poster ☒ Oral

Les capteurs photoniques à superréseaux de type II (T2SL) à base d'antimoniures (Sb) sont une nouvelle technologie de matériaux III-V pour l'imagerie infrarouge haute performance refroidie. Les premières matrices de détecteurs commencent à être commercialement disponibles mais pour adresser certaines applications spécifiques en conditions extrêmes, dans le domaine nucléaire ou spatial, se pose la question de la tenue des T2SL sous irradiation.

Après avoir décrit les structures quantiques T2SL puis leurs prises en compte comme zone d'absorption au sein de structures à barrière (appelées barrières), ce séminaire présente les premières mesures effectuées par l'IES sur des T2SL Ga-free InAs/InAsSb moyen infrarouge sous protons 63 MeV. Notamment, les composants montrent des dégradations en courant d'obscurité d'un facteur 2 pour des fluences $8E11 \text{ H}^+/\text{cm}^2$ [1] et la modélisation TCAD associée permet d'identifier les processus de transport qui pénalisent le comportement de ces détecteurs sous irradiation.

Un bilan des investigations à mener pour annihiler la dégradation des performances de ces détecteurs en environnement contraint est dressé.

Références : [1] C. Bataillon, M. Tornay, M. Bouschet, J. P. Perez, A. Michez, O. Saint-Pé, O. Gilard, P. Christol, « *Electrical Characterization of Type II Superlattice Midwave Infrared Photodetectors under protons at cryogenic temperature* », IEEE Transactions on Nuclear Sciences **71**, 1747-1752 (2024), doi [10.1109/TNS.2024.3406904](https://doi.org/10.1109/TNS.2024.3406904)

Microstructures et spectres d'émission des céramiques YAG, YSZ et de grenats haute entropie.

E. SAUZEAU^{1,2}, R. BOULESTEIX¹, L. DESPRES¹, F. ROSSIGNOL¹, O. ROZENBAUM²

¹Université de Limoges, CNRS, IRCER UMR 7315, Limoges (France)

²Université d'Orléans, CNRS, CEMHTI UPR 3079, Orléans (France)

■ Poster ■ Oral

L'ANR HYMAX (ANR-23-CE50-0021) a pour objectif de développer une chambre à oxy-combustion d'hydrogène. Le projet est divisé en deux axes principaux, portant d'une part sur la caractérisation, l'analyse et la modélisation des mécanismes fondamentaux impliqués dans la stabilisation d'une oxyflamme d'hydrogène et les échanges de chaleur au sein d'une chambre de combustion et, d'autre part, sur la conception de nouvelles céramiques dédiées à cette chambre en condition d'oxy-combustion d'hydrogène. Les travaux que nous présentons sont consacrés à cette seconde partie. En effet, l'oxy-combustion d'hydrogène bien que limitée à une température de flamme avoisinant 1900 °C, génère une atmosphère composée à ≈98 % de vapeur d'eau, entraînant une forte corrosion des matériaux constituant la chambre [1]. Pour limiter cette corrosion, des barrières thermiques et environnementales (ETBC) doivent être mises en place. Nous avons élaboré deux types de barrières et évalué leurs émittances spectrales par spectroscopie infrarouge entre 25 °C et 1500 °C.

Dans un premier temps, des céramiques de la famille des zircons (YSZ) et de la famille des grenats d'oxydes de terre-rares, en particulier à haute entropie, ont été sélectionnées en raison de leur bonne stabilité à haute température et de leur résistance à la corrosion. Dans le cadre de ce travail, des échantillons de céramiques ont tout d'abord été fabriqués sous forme massive par pressage uniaxial de poudres et frittage sous air, ou frittage-réactif dans le cas des grenats, afin de déterminer leurs propriétés thermoradiatives. Les émittances spectrales mettent ainsi en évidence deux comportements thermo-radiatifs distincts en fonction de la température : le YAG, semi-transparent dans le moyen infrarouge, et les zircons yttrifiés, présentant une émission thermiquement activée, à partir de 1000 °C, due à des mécanismes d'absorption polaroniques.

Dans un second temps, cette étude s'est concentrée sur des nouveaux grenats dits « à haute entropie » par un procédé de frittage-réactif. Deux compositions ont été plus spécifiquement étudiées : $(Y_{0,2}Er_{0,2}Ho_{0,2}Dy_{0,2}Gd_{0,2})_3Al_5O_{12}$ et $(Y_{0,2}Er_{0,2}Ho_{0,2}Dy_{0,2}Yb_{0,2})_3Al_5O_{12}$. Des analyses structurales et microstructurales ont confirmé l'obtention de ces composés sous forme de céramiques denses. De plus, les analyses spectroscopiques de ces matériaux ont montré que l'incorporation de terre-rares, connu pour leur luminescentes dans le domaine visible et IR, induit des propriétés d'émission particulières dans le MIR potentiellement intéressantes pour l'application visée.

Références :

[1] G. Li *et al.*, « The water vapor corrosion behavior and failure mechanism of Si with different structure at 1300 °C », *Appl. Surf. Sci.*, vol. 685, p. 161971, mars 2025

Caractérisation radiative d'un milieu fibreux par étude morphologique d'un empilement de cylindres et méthode Monte Carlo

Mahé Souveton^{1*}, Vital Le Dez¹, Franck Enguehard¹

¹Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA,
F-86962 Futuroscope Chasseneuil, France

☐ Poster ☒ Oral

L'isolation thermique à haute température repose la plupart du temps sur des matériaux très poreux constitués de fibres ou de particules de faibles dimensions spatiales. Dans ces matériaux, le transfert thermique par rayonnement joue un rôle fondamental qu'il faut pouvoir caractériser à toute échelle. Dans ce travail, nous étudions un empilement de cylindres infinis et interpénétrables sous vide, supposé représentatif d'un milieu fibreux réel, dont la phase solide (les cylindres) est constituée d'un matériau homogène semi-transparent froid dense, absorbant et non diffusant, caractérisé par son indice optique complexe monochromatique. La distribution des cylindres dans la boîte de calcul est souhaitée statistiquement homogène et isotrope afin de garantir de bonnes propriétés morphologiques. Pour y parvenir, un algorithme génère chaque axe de cylindre comme une corde μ -aléatoire du domaine de calcul [1] [2]. Les expressions analytiques de la porosité et quelques fonctions de corrélation de phases s'en déduisent.

Afin de simuler la propagation du rayonnement à l'intérieur de la boîte, une méthode de Monte Carlo en tirs balistiques de rayons est mise en œuvre. Chaque rayon peut être absorbé à l'intérieur des cylindres ou réfléchi ou réfracté aux interfaces entre les cylindres et le vide. Les proportions de rayons qui ressortent de la boîte permettent d'accéder aux valeurs de transmittance (T) et de réflectance (R) directionnelle-hémisphérique du domaine de calcul. Les propriétés radiatives effectives que posséderait un milieu 1D homogène équivalent et qui produiraient les mêmes courbes de T et R en fonction de l'incidence de l'éclairement sont déterminées par inversion avec la méthode de moindres carrés par comparaison avec un modèle de mur plan absorbant-diffusant et une fonction de phase de type isotrope, Henyey-Greenstein ou en série de Legendre. Une procédure pour calculer les sensibilités aux paramètres malgré le bruit statistique de la méthode Monte Carlo est mise en place [3]. Les résultats obtenus pour une grande valeur de la porosité semblent acceptables pour différentes fonctions de phase de diffusion. En revanche, d'autres calculs effectués pour une valeur plus faible de la porosité nous amènent à nous interroger sur la validité du modèle sur lequel nous basons notre inversion. Il y a aussi des difficultés dues aux fortes contraintes sur les paramètres pour la fonction de phase en série de Legendre. Des investigations sont en cours, en étudiant notamment le caractère non Beerien de la phase fibreuse [4][5].

Références :

- [1] E. Marakis and al, Uniform line fillings, Physical Review E 99 (2019)
- [2] R. Coleman, Random paths through convex bodies, Journal of Applied Probability 6, pp. 430-441 (1969)
- [3] De Lataillade and al, Monte Carlo method and sensitivity estimations. JQSRT 75, 529-538 (2002)
- [4] M. Tancrez, J. Taine, Direct identification of absorption and scattering coefficients..., IJHMT, 47(2), 373-383 (2004)
- [5] B. Lu and S. Torquato, Chord length and free path distribution functions for many body systems, JCP 98, (1993)

Simulateur solaire à haute densité de flux : Un outil pour la caractérisation thermophysique et radiative et l'étude de la durabilité de matériaux à hautes températures

J. A. TOUOYEM TALLA¹, B. HENRIOT², T. DUVAUT¹, O. TANTOT², N. DELHOTE², M. CHARLES³,
J. H. RANDRIANALISOA¹

¹ ITheMM, UR 7548, Université de Reims Champagne-Ardenne, UFR SEN, Campus Moulin de la Housse, 51687 Reims (France)

² Xlim, UMR 7252, Université de Limoges, F87000 Limoges (France)

³ CEA Le Ripault, Centre d'études du Ripault, 37260 Monts (France)

☐ Poster ☒ Oral

La connaissance des propriétés thermophysiques et radiatives de matériaux céramiques à hautes températures est cruciale notamment pour leur utilisation dans de nombreuses applications telles que les parois ou l'isolation des fours industriels, les procédés thermochimiques, les boucliers et les barrières thermiques. La caractérisation thermophysique et radiative de ces matériaux voire l'analyse de leur durabilité à hautes températures nécessitent une connaissance précise de la distribution du flux de chauffage et de leurs températures. Bien que différents dispositifs aient été développés dans la littérature à ces fins (fours solaires, laser haute puissance, fours fermés, etc.), le dispositif développé et présenté ici, un simulateur solaire à haute densité de flux, constitue une alternative intéressante, en offrant les mêmes avantages que les fours solaires en termes de densité de flux, de surface de chauffe et de possibilité de réaliser des caractérisations thermique et optique à distance, tout en étant installé en laboratoire et par conséquent indépendant des conditions météorologiques. Le simulateur solaire est équipé d'un dispositif de caractérisation du flux lumineux incident sur l'échantillon à étudier. Ce type de dispositif est déjà installé dans un certain nombre de pays européens (Allemagne, Suisse et Espagne) et ailleurs comme aux Etats-Unis, en Australie et à Singapour. Cette communication vise à présenter dans un premier temps, la conception, la mise en service et la caractérisation d'un simulateur solaire à haute densité de flux, installé récemment à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Dans un second temps, elle présente les résultats préliminaires des tests de chauffage d'échantillons réfractaires tels que du carbure de silicium (SiC), de l'alumine (Al₂O₃) poreuse et de l'oxynitrure de silicium (Si₃N₄). Et troisièmement, elle discute des perspectives qui découlent de la mise à en œuvre d'un tel dispositif.

Le simulateur solaire est constitué de sept modules de rayonnement, chacun composé d'une source lumineuse, couplée à un réflecteur ellipsoïdal. Sa conception a été réalisée en utilisant la méthode de tracé de rayons par Monte-Carlo qui a permis de prendre en compte les propriétés géométriques et optiques des réflecteurs ellipsoïdaux ainsi que celles des sources rayonnantes. La simulation de Monte Carlo a également permis l'analyse et l'optimisation de la distribution du flux incident à différentes positions du plan de mesure. Cette méthode a permis de déterminer une plage de puissance entre 5 et 15 kW sur un

disque de diamètre 5 cm, pour un rendement électrique-rayonnement lumineux de 20%. La puissance maximale utile du simulateur solaire est égale à 45 kWe. Le dispositif a été conçu pour accueillir 2 à 4 lampes supplémentaires pour une augmentation de sa puissance totale électrique si cela est nécessaire. Chaque module est composé d'une lampe à arc au xénon, choisie pour leur bonne reproduction du spectre solaire, d'une puissance de 6.5 kWe couplée à un réflecteur ellipsoïdal d'environ 1600 mm de distance focale. Les faisceaux lumineux issus des lampes sont focalisés grâce aux réflecteurs et leurs orientations au même point, le point focal du simulateur. Différentes méthodes, telles que la variation du plan focal et l'ajustement de la puissance des lampes, ont été développées pour optimiser la distribution du flux lumineux sur le plan focal. La Figure 1 présente le simulateur solaire réalisé et installé au laboratoire ITheMM de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

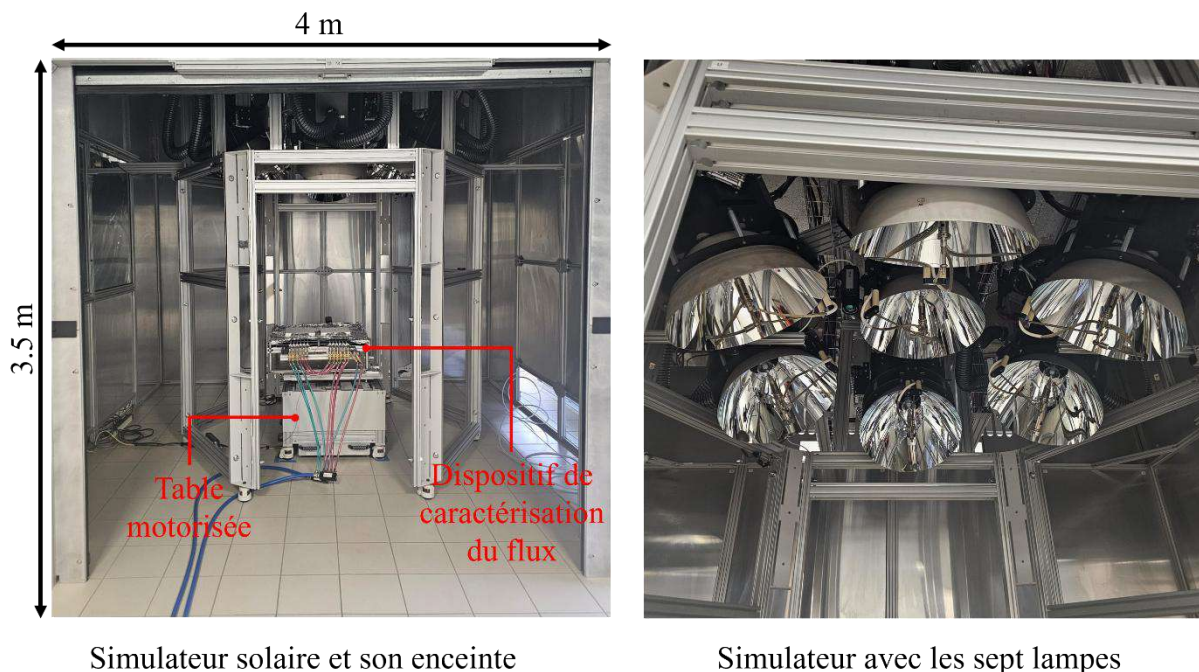


Figure 1 : Simulateur solaire d'une puissance de 45 kWe installé à l'ITheMM de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

La connaissance précise de la distribution du flux incident sur différents plans positionnés par rapport au point focal du simulateur est primordiale lors des applications de caractérisation thermo physique, radiative et l'étude de durabilité des matériaux. Deux méthodes de caractérisation du flux ont été utilisées à cet effet. Il s'agit d'une méthode directe et d'une méthode indirecte.

La méthode directe utilise un fluxmètre Gardon refroidi par eau. Ce fluxmètre est monté sur une table motorisée permettant des déplacements verticaux ± 10 cm et horizontaux ± 20 cm avec une précision de 0.1 mm. Le dispositif permet des mesures locales de densité de flux. La puissance totale reçue est obtenue par intégration numérique sur une surface donnée du flux surfacique donné par le fluxmètre. L'incertitude de la méthode directe est principalement liée à l'incertitude du fluxmètre Gardon et est donnée par son fournisseur à 3%.

La méthode dite indirecte, quant à elle, utilise une plaque hautement diffusante dite « lambertienne » refroidie par eau, le fluxmètre Gardon positionné en son centre et une caméra CCD (charge coupled device). Des images en niveaux de gris de la distribution du flux lumineux sur la plaque lambertienne ont été acquises par la caméra CCD pour chaque module de rayonnement. Les images acquises sont ensuite corrélées aux mesures locales de flux. L'incertitude de la méthode indirecte dépend principalement des incertitudes de la caméra CCD, du fluxmètre Gardon et de la méthode de calibration et peut atteindre 15%. La Figure 2 illustre le principe de fonctionnement de chaque méthode de mesure de flux.

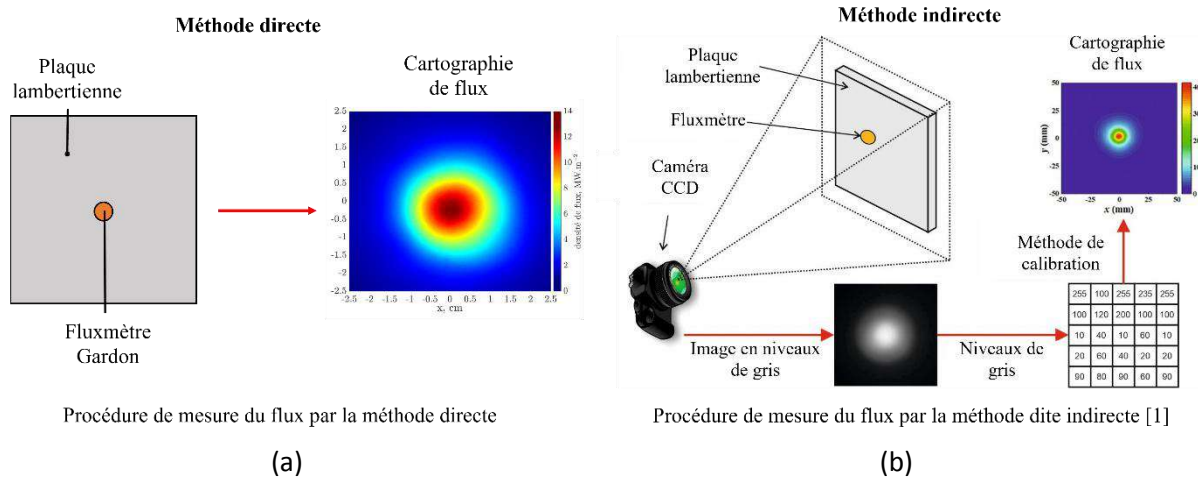


Figure 2 : Méthodes de caractérisation de flux. Mesure directe (a) et mesure indirecte (b).

Le simulateur solaire délivre, au plan focal, une puissance rayonnante maximale de 7.8 kW sur un disque de 5 cm de diamètre avec une densité de flux maximale de $12.7 \pm 0.7 \text{ MW.m}^{-2}$. L'écart maximal de flux mesuré entre la méthode indirecte et la méthode directe est évalué à 6%. La Figure 3 présente la cartographie du flux obtenue au plan focal lorsque toutes les lampes fonctionnent à 100% de leur puissance nominale.

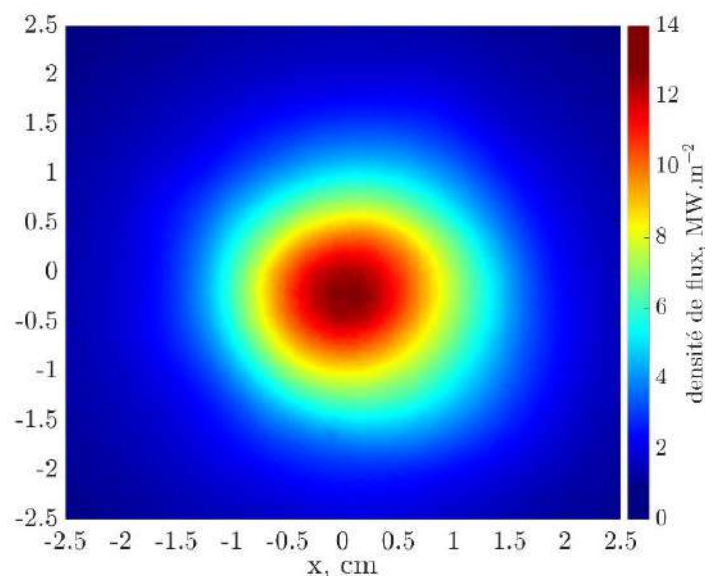


Figure 3 : Cartographie du flux au plan focal.

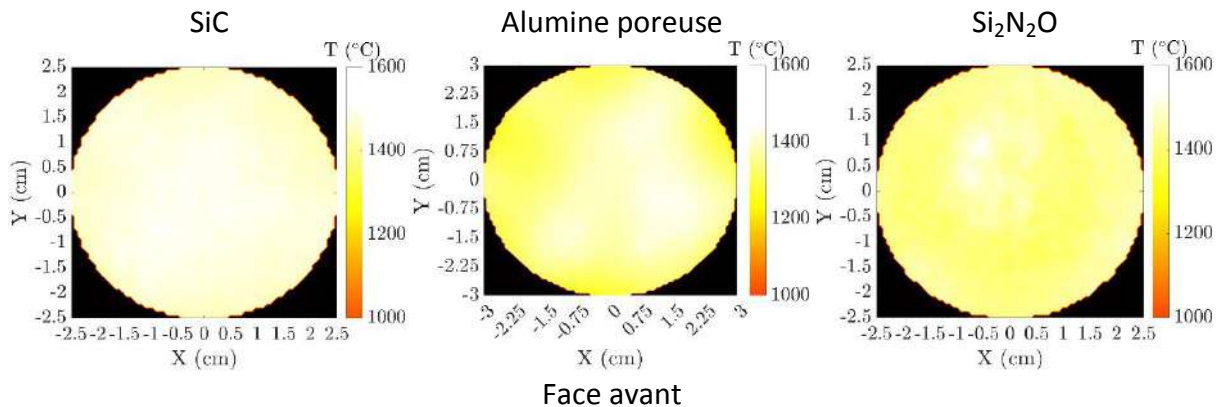
Après avoir mis en service le dispositif et procédé à sa caractérisation, des tests de chauffage sur différents échantillons réfractaires d'intérêt à savoir l'alumine poreuse (porosité d'environ 20%), le carbure de silicium et de l'oxynitride de silicium ont été menés. Les échantillons de carbure de silicium et l'oxynitride de silicium sont des échantillons cylindriques massifs, de diamètre de 50 mm et d'épaisseur de 5 mm tandis que l'échantillon d'alumine quant à elle, est de forme cylindrique de diamètre 60 mm et d'épaisseur 4 mm. La Figure 4 présente une photographie des différents échantillons.



Figure 4 : Photographies des échantillons de carbure de silicium, alumine poreuse et d'oxynitride de silicium.

Deux caméras infrarouges à ondes longues ont été employées pour la mesure de température en face avant et arrière des échantillons durant les tests sur le simulateur solaire. Ces caméras ont été choisies car la plupart des échantillons sont considérés comme opaques dans le domaine spectral des caméras, de 7.4 à 14 μm . Pour aller vers des mesures quantitatives de température, une méthode de calibration des caméras infrarouges jusqu'à 1000 °C a été développée. Elle consiste à déterminer l'émissivité apparente des échantillons en fonction de sa température dans le domaine spectral des caméras.

Des tests de chauffage ont été réalisés. Ils consistaient à utiliser les six lampes périphériques pour chauffer un échantillon logé au sein d'un isolant. L'ensemble composé de l'échantillon et de l'isolant est placé à différentes positions par rapport au plan focal du simulateur. Les échantillons ont été portés à différents niveaux de température jusqu'à environ 1500 °C avec une différence de température radiale et dans l'épaisseur inférieure à 10%. La Figure 5 montre les cartographies de température en face avant et arrière des échantillons testés.



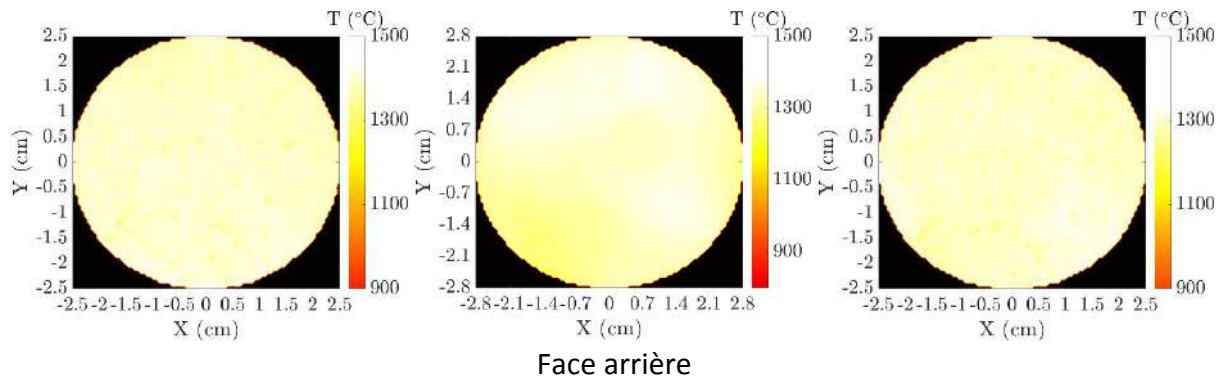


Figure 5 : Cartographies de température des échantillons en face avant et arrière.

Ce dispositif peut être associé à différentes cellules de test en fonction des applications visées. Il peut être utilisé pour la caractérisation radiative de matériaux à très hautes températures, en étant associé à un spectromètre à transformée de Fourier pour la mesure d'émissivité en température à partir de la face arrière de l'échantillon. Une combinaison du simulateur solaire et d'un réacteur thermochimique permet de tester les procédés de synthèse de combustibles tels que la gazéification et le craquage de méthane. Enfin, l'étude de la durabilité de matériaux soumis à un haut flux et à haute température peut être menée en associant ce dispositif expérimental à une caméra visible pour observer les déformations de l'échantillon.

Références :

- [1] M. Abdullah, B. Hernández Corona, M. Martins, N. Lopez Ferber, P. Armstrong, M. Chiesa, N. Calvet, Advancements, challenges, and opportunities in the measurement of high heat flux for concentrated solar thermal systems, *Solar Energy* 287 (2025) 113252. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113252>.

Optimisation topologique d'absorbeur solaire

A. de la Vauvre, Y. Favennec, L. Cangemi, B. Rousseau

LteN, IFPEN

Oral

Les absorbeurs solaires volumiques à haute température (+1000 K) rencontrent des défis liés à la formation de fissures et à la dégradation de l'efficacité, causés par d'importants gradients de température (200 K.cm^{-1}) et des pertes radiatives.

Cette thèse de doctorat porte sur le développement d'un cadre d'optimisation topologique pour les absorbeurs solaires volumiques en Carbure de Silicium (SiC), en s'appuyant sur une approche de milieu homogénéisé afin d'améliorer les performances thermiques. Bien que des études récentes aient commencé à explorer des variations spatiales de la géométrie des absorbeurs [1, 2, 3] introduisant des gradients de paramètres tels que la porosité et le diamètre des pores, ces approches restent limitées, se restreignant à une seule direction ou à un nombre fini de cas tests.

L'objectif de ce travail est de mettre en place un outil d'optimisation du couplage conducto-convecto-radiatif basé sur le calcul d'états adjoints [4] pour déterminer les distributions optimales de porosité permettant de minimiser une fonction de coût choisie. Les objectifs clés de l'optimisation incluent l'augmentation de l'efficacité, la réduction des gradients de température, ou l'équilibrage entre plusieurs critères de performance. L'écoulement est traité par l'équation de Darcy-Forcheimer compressible, la méthode LTNE (Local Thermal Non Equilibrium) est utilisée pour traiter les deux champs thermiques fluide et solide. Enfin, le flux solaire est modélisé par la loi de Beer-Lambert et le flux infra-rouge réémis est traité par le modèle P1 dont la pertinence sera discutée et analysée par comparaison à des simulations Monte-Carlo.

Des distributions optimisées de porosité sont obtenues pour deux objectifs principaux : maximiser l'efficacité et minimiser les gradients de température. Une distinction importante est faite entre les cas où le flux solaire incident suit une distribution gaussienne, et ceux utilisant un profil idéalisé de type top-hat, ce qui permet de mieux comprendre la conception des absorbeurs dans des conditions réalistes. Enfin, les premiers résultats de déshomogénéisation, c'est-à-dire de reconstruction de la géométrie à l'échelle discrète à partir du champ de porosité optimisé, seront présentés et discutés.

Références : [1] X. Chen, X.-L. Xia, X.-L. Meng, and X.-H. Dong. Thermal performance analysis on a volumetric solar receiver with double-layer ceramic foam. *Energy Conversion and Management*

[2] S. Du, T. Xia, Y.-L. He, Z.-Y. Li, D. Li, and X.-Q. Xie. Experiment and optimization study on the radial graded porous volumetric solar receiver matching non-uniform solar ux distribution.

[3] S. Sas Brunser and A. Steinfeld. Design and Optimization of Hierarchically Ordered Porous Structures for Solar Thermochemical Fuel Production Using a Voxel-Based Monte Carlo Ray-Tracing Algorithm.

[4] G. Allaire, E. Bonnetier, G. Francfort, and F. Jouve. Shape optimization by the homogenization method.

Shaping light with disorder: Toward the next generation of spectrally selective materials for energy efficiency

Cristina Gila-Vilchez, Olivier Rozenbaum, Leire del Campo, Conchi Ania, Cédric Blanchard

CEMHTI (UPR 3079 CNRS), Univ. Orléans, 45071, Orléans, France

☐ Poster ☒ Oral

Spectrally selective materials have gained significant attention in the last decade due to their critical role in energy efficiency, thermal management, and stealth applications [1,2]. Recent advancements in engineered materials, including photonic crystals, metamaterials, and plasmonic nanostructures, have enabled precise control over emissivity, allowing for applications ranging from thermophotovoltaics to military-grade infrared stealth and infrared sensing. However, challenges remain in optimizing fabrication techniques for large-scale deployment, improving cost-effectiveness and achieving dynamic tunability for adaptable emission control. As a result, materials with suitable properties must be engineered, but the state-of-the-art realizations are still far from satisfying all the requirements. In contrast, recent studies have shown that interesting optical functionalities can be achieved with random particulate media [3,4], contributing to relax the fabrication issues.

In this work, we demonstrate that random systems of resonant and lossless nanoparticles can achieve near-perfect absorption in subwavelength-thick slabs by exploiting cooperative scattering effects. A comprehensive approach fully developed within this study, combines numerical design, material fabrication, and experimental validation. Key integrating factors, such as constitutive parameters and textural geometry, were analyzed using a T-matrix approach based on the multipolar expansion of electromagnetic fields to engineer disordered structures with tailored optical responses. Then, we developed a realistic system consisting of disordered oxide particles -considered in their spectral range of resonance (TO-LO)- and lossless particles, achieving selective infrared absorption. FTIR spectroscopy measurements confirmed the theoretical predictions for absorption spectra, while microscopic characterization verified the particle distribution within the composites. The enhanced absorption response is attributed to the achievement of critical coupling conditions, where radiative and non-radiative losses are optimally balanced to maximize energy dissipation. This work highlights the importance of a fully integrated strategy (modeling, synthesis, and characterization) in the development of complex materials with engineered radiative properties.

Acknowledgments: CGV thanks the financial support of MOPGA 2023 (Visiting Fellowship Program funded by the French Ministry of Europe and Foreign Affairs) and Region Centre Val de Loire (call Accueil et accompagnement des chercheuses et des enseignants chercheurs 2024).

References: [1] B. Ko, D. Lee, T. Badloe, J. Rho, *Energies* 12, 89, (2019).
[2] W. Zhang, W. Shan, M. Qian, Y. Liu, K. Yu, *Infrared Phys. Technol.* 131, 104643, (2023).
[3] R.A. Yalçın, E. Blandre, K. Joulain, J. Dré villon, *ACS Photonics* 7, 1312–1322 (2020).
[4] T. Guerra, O. Rozenbaum, J.P. Hugonin, C. Blanchard, *Phys. Rev. B* 107, L220202 (2023).

Influence du baryum sur l'oxydation à 900°C sous air de l'acier 316L

Pierre MARTIN, Christophe ISSARTEL, Henri BUSCAIL

Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, 3 Rue Lashermes, 43009 Le Puy-en-Velay, France

☐ Poster ☒ Oral

La plupart des métaux, instables à l'air, se recouvrent d'une couche d'oxyde(s), dont le caractère protecteur dépend notamment de sa porosité, de sa teneur en défauts ponctuels et de leur mobilité. Dans le cas des aciers, certains éléments, à savoir le chrome, le silicium et l'aluminium sont susceptibles de s'oxyder sélectivement pour donner des oxydes protecteurs. La protection par SiO_2 n'étant jamais assurée seule, les deux grandes familles d'aciers résistants à l'oxydation à haute température sont donc les chromino-formeurs et les alumino-formeurs. ^[1]

De nombreux travaux visant à identifier des éléments chimiques capables de limiter la vitesse d'oxydation et/ou d'améliorer l'adhérence des couches ont été menés. Pour ce faire, des éléments (ré)actifs (Y, Ce, La, ...) sont incorporés dans l'alliage ou déposés en surface par une grande variété de techniques. ^[2] À l'inverse, les surfaces métalliques peuvent être polluées par des éléments chimiques susceptibles d'impacter le comportement à haute température, parmi lesquels figurent le baryum, utilisé en guise d'additif dans les liquides de forage ou encore dans certaines huiles de coupe.

À travers cette présentation, **l'influence du baryum sur l'oxydation à 900°C sous air durant 96h d'un acier austénitique 316L, chrominoformeur, est investiguée, pour la première fois à notre connaissance.** Les dépôts ont été réalisés par évaporation d'une solution aqueuse de carbonate de baryum, conduisant à des quantités surfaciques de Ba de l'ordre de $0,01 \text{ mg/cm}^2$.

Dans ces conditions, l'analyse par diffraction des rayons X des couches d'oxyde n'a pas permis de mettre en évidence de composés contenant Ba. Cet élément engendre cependant des modifications morphologiques drastiques, à corrélérer à un phénomène d'oxydation interne (cf. **Figure 1**). Enfin, des essais préliminaires menés à des teneurs en Ba supérieures ont permis de proposer un mécanisme d'action du baryum par identifications des phases formées.

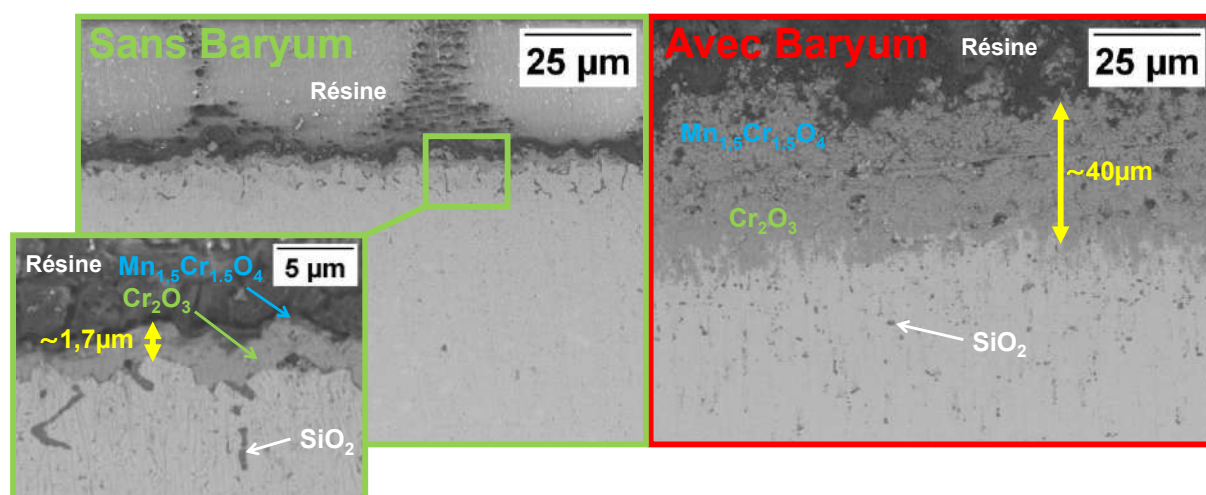


Figure 1 : Coupes transversales observées au MEB sur les échantillons de 316L avec et sans dépôt de Baryum, puis oxydés à 900°C sous air pendant 96h.

Références :

- [1] L. Antoni and A. Galerie. **2003**. *Techniques de l'ingénieur*. DOI: 10.51257/a-v1-m4221.
- [2] J. Piekoszewski *et al.* **2011**. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 206. p. 854–858. DOI : 10.1016/j.surfcoat.2011.03.104.

Comportement sous torche oxyacétylénique d'un composite C/UHTC : analyse in situ

F. Trad¹, J. Seymour¹, L. Maillé¹, T. Bourdeau¹, J. Braun², G. Couégnat¹, F. Rebillat¹

¹ Laboratoire des Composites ThermoStructuraux, UMR 5801 - CNRS - CEA - Safran - Université de Bordeaux, 3 Allée de la Boétie 33600 Pessac, France

² CEA, DAM, LE RIPAUT, F-37260, Monts, France

☒ Poster ☒ Oral

La compréhension des phénomènes d'oxydation lors d'une rentrée atmosphérique est un enjeu fondamental à cause des conditions extrêmes qui sont rencontrées : températures supérieures à 2000°C, vitesses hypersoniques au-delà de Mach 5, dans un environnement gazeux oxydant.¹ Les matériaux composites céramiques ultra-réfractaires (UHTC) sont de bons candidats pour ce type d'application^{2,3}. Ces matériaux sont connus par leur haute tenue mécanique. Ils possèdent une architecture complexe constituée d'un renfort fibreux, enrobé dans une matrice avec éventuellement un revêtement protecteur, ils peuvent résister à la fois à la chaleur et à l'oxydation.

Aujourd'hui, les techniques de caractérisation comme la MEB, la DRX ou l'EDS ne permettent pas de suivre en temps réel les mécanismes d'oxydation des matériaux, sous haut flux de chaleur et de matière. Or, les propriétés des matériaux évoluent fortement entre la température ambiante et la haute température. En effet, les phénomènes qui se produisent à la surface des protections thermiques sont complexes et impliquent de nombreuses réactions physico-chimiques à très hautes températures (dilatation thermique, recristallisation...).

Dans ce contexte, cette étude propose une approche expérimentale originale qui consiste à réaliser des essais en torche oxyacétylénique sous microtomographie de rayons X, sous synchrotron. Cette méthode est originale et n'a jamais été décrite dans la littérature. Elle permet un suivi *in-situ* du comportement du matériau durant l'essai, et ainsi de mieux comprendre les mécanismes de dégradation et de protection en conditions extrêmes. Différentes compositions du système Hf-Si-B-C ou Zr-Si-B-C ainsi que plusieurs paramètres d'oxydation (temps d'oxydation, taux d'oxygène et d'eau, angle d'incidence du flux) seront évalués.

Références :

(1) Regan, F. J. ; Anandakrishnan, S. M. Dynamics of Atmospheric Re-Entry ; American Institute of Aeronautics and Astronautics : Reston, 2000.

(2) Levine, S. R. ; Opila, E. J. ; Halbig, M. C. ; Kiser, J. D. ; Singh, M. ; Salem, J. A. Evaluation of Ultra-High Temperature Ceramics For Aero Propulsion Use. J. Eur. Ceram. Soc. 2002, 22 (14–15), 2757–2767. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00140-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00140-1).

(3) Binner, J. ; Porter, M. ; Baker, B. ; Zou, J. ; Venkatachalam, V. ; Diaz, V. R. ; D'Angio, A. ; Ramanujam, P. ; Zhang, T. ; Murthy, T. S. R. C. Selection, Processing, Properties and Applications of Ultra-High Temperature Ceramic Matrix Composites, UHTCMCs – a Review. Int. Mater. Rev. 2020, 65 (7), 389–444. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1652006>.

Caractérisation de coussins utilisés dans le procédé de coulée en source

Aurélien Kehringer, Emmanuel Véron, Emmanuel de Bilbao

CEMHTI, 1D Avenue de la Recherche Scientifique, France, aurelien.kehringer@cnrs-orleans.fr

☐ Poster ☒ Oral

Cette thèse est financée par le projet ANR TheCap, qui rassemble plusieurs partenaires industriels dans le secteur de la métallurgie et deux partenaires académiques, le CEMHTI à Orléans et le laboratoire du CEMEF à Sophia Antipolis.

La coulée en source est un procédé industriel utilisé depuis des dizaines d'années pour produire des pièces qui ne sont pas réalisables avec la coulée continue. Dans ce procédé, l'alliage métallique fondu remplit la lingotière par le bas pendant qu'une poudre de protection, appelée coussin est déposée dès l'arrivée du métal dans la lingotière, isole le métal fondu de l'air (Figure 1). Avec une épaisseur de quelques centimètres, cette poudre subit un très fort gradient thermique, allant d'environ 1500 °C (température de coulée de l'alliage) à l'interface entre le métal

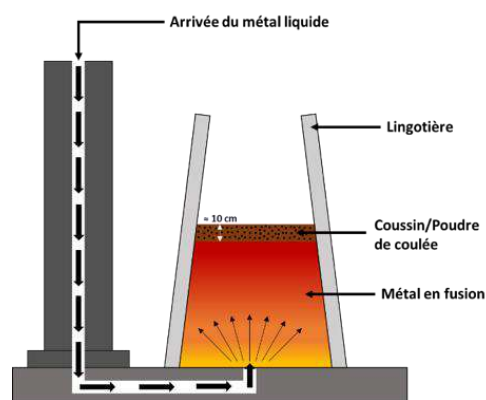


Figure 1 : Schéma du procédé de coulée en source

liquide, à quelques centaines de degrés avec l'interface exposée à l'air. Ce gradient engendre d'importantes transformations de phases dans la poudre. L'objectif de ce travail est d'étudier ces poudres réfractaires à haute température et de déterminer les différentes transformations physico-chimiques et les variations des propriétés thermo-physiques qui ont un effet direct sur le gradient de température dans le coussin et sur la qualité du lingot solidifié. Le carbone, sous forme de carbonates ou de carbone libre, est un verrou important dans la compréhension du comportement des coussins à haute température. D'après des études¹, le carbone aurait un effet retardateur sur la fusion du matériau. En effet, les particules de carbone se placeraient entre les autres particules et les empêcheraient, physiquement, de s'agglomérer pour fondre. D'autres études² montrent également que le type de carbone ainsi que la taille des particules ont un effet sur le temps de fusion du coussin.

Dans un premier temps, des analyses à température ambiante (fluorescence X, diffraction des rayons X et granulométrie laser) ont été réalisées afin de mieux connaître la composition chimique, minéralogique ainsi que la granulométrie de ces poudres. Il est alors ressorti qu'elles ont des compositions, aussi bien minéralogiques que chimiques, complexes avec notamment la présence de carbonates et de composés fluorés. Dans un second temps, des analyses des échantillons en température ont alors été effectuées en DRX *ex-situ* en température. L'objectif était d'observer l'évolution des phases en fonction de la température en partant de l'ambiante et en allant jusqu'à 1500 °C. En parallèle, des analyses Thermogravimétriques et Thermodifférentielles sous air et sous argon ont permis de confirmer la présence de certains mécanismes. La combustion du carbone libre et la décarbonatation de certains carbonates ont alors pu être identifiées confirmant l'indexation des phases en diffraction des Rayons X.

Il a donc été possible d'en conclure sur la présence de plusieurs mécanismes et transformations de phases lors de la montée en température.

Références :

- (1) Wei, En-fa, Yin-dong Yang, Chang-lin Feng, I. D. Sommerville, et A. McLean. « Effect of Carbon Properties on Melting Behavior of Mold Fluxes for Continuous Casting of Steels ». *Journal of Iron and Steel Research International* 13, no 2 (février 2006): 22-26. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(06\)60037-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60037-X).
- (2) Brandaleze, E., Santini, L., Gorosurreta, C., & Martín, A. (2007). Influence of Carbonaceous Particles on the Melting Behaviour of Mould Fluxes at High Temperature. *Proceedings of 16th Steelmaking Conference IAS, Argentina*, 363-371.

Transferts couplés, complexité géométrique et performances énergétiques : une approche Monte Carlo multi-échelle

Olivier Farges

Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54500, France

☐ Poster ☐ Oral

Dans un contexte de transition énergétique et d'optimisation des systèmes énergétiques complexes, cette conférence propose une exploration des transferts thermiques couplés (conduction, convection, rayonnement) dans des milieux à forte hétérogénéité géométrique et physique. L'approche développée repose sur la méthode de Monte Carlo formulée en espace de chemin pour traiter les problématiques multi-physiques et multi-échelles [1]. Elle se distingue notamment par son insensibilité à la complexité géométrique et phénoménologique.

Après un rappel des fondements et des variantes avancées de la méthode (symbolique, double randomisation, collisions nulles), plusieurs applications illustreront son potentiel :

- modélisation de l'efficacité énergétique de panneaux photovoltaïques en environnement urbain complexe [2],
- caractérisation thermique avancée de matériaux à haute température [3],
- intégration avec l'intelligence artificielle pour l'inversion et la conception optimale [4].

Une ouverture sera faite sur trois projets en cours :

- **ACACIA** : récupération de chaleur industrielle via des échangeurs poreux optimisés [5],
- **METEOR** : métamatériaux radiatifs pour l'efficacité énergétique à haute température,
- **MC-BAT** : diagnostics thermiques des bâtiments par simulation rapide d'images infrarouges.

Ce travail, ancré dans une dynamique de science ouverte, offre une boîte à outils méthodologique innovante pour la modélisation et l'optimisation de systèmes énergétiques, en lien direct avec les enjeux industriels de récupération de chaleur, de stockage et de réduction des pertes thermiques.

Références :

- [1] Jean Marc Tregan, Jean Luc Amestoy, Mégane Bati, Jean-Jacques Bézian, Stéphane Blanco, et al.. Coupling radiative, conductive and convective heat-transfers in a single Monte Carlo algorithm: A general theoretical framework for linear situations. *PLoS ONE*, 2023, 18 (4), [10.1371/journal.pone.0283681](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283681). [hal-04066139v2](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04066139v2)
- [2] Thomas Villemin, Olivier Farges, Gilles Parent, Rémy Claverie. Monte Carlo prediction of the energy performance of a photovoltaic panel using detailed meteorological input data. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 195, pp.108672. [10.1016/j.ijthermalsci.2023.108672](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108672). [hal-04222017](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04222017)
- [3] Léa Penazzi, Olivier Farges, Yves Jannot, Johann Meulemans, Vincent Schick. Monte Carlo functional estimation of the radiative source term in a semi-transparent medium: A faster coupled conductive-radiative model resolution. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, In press, [10.1016/j.jqsrt.2024.108894](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2024.108894). [hal-04416514](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04416514)
- [4] Alex Royer, Olivier Farges, Pascal Boulet, Daria Burot. A new method for modeling radiative heat transfer based on Bayesian artificial neural networks and Monte Carlo method in participating media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 201, pp.123610. [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123610](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123610). [hal-03947238](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03947238)
- [5] Raj Narayan Konduru, Olivier Farges, Vincent Schick, Patrick Hairry, Yves Gaillard, et al.. Experimental and numerical investigation of porous heat exchangers with Kelvin cell structured foam at high temperatures: Coupled conduction-convection and radiation heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 224, pp.125253. [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125253](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125253). [hal-04479243](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04479243)

Exemples d'applications du lancer de rayons aux problématiques de décarbonation énergétique

Charles-Alexis ASSELINEAU^{1,2}

¹ Universidad Politécnica de Madrid

² Australian National University

☐ Poster ☒ Oral

La simulation des transferts radiatifs par lancer de rayons est une méthode stochastique présentant de nombreux avantages: convergence stable et monotonique, adaptation aux géométries et propriétés radiatives complexes, absence de maillage, etc. Il est, de plus, possible de coupler les résultats de ces méthodes avec des méthodes déterministes de calculs de transferts conductifs et convectifs, par ailleurs bien établies. Dans cette présentation ces avantages sont illustrés à travers une série d'exemples de travaux récents et collaborations dans des domaines liés aux problématiques de décarbonation.

- La production d'énergie photovoltaïque par des modules à cellules bifaciales

Dans ce contexte les méthodes stochastiques permettent de prendre en compte des scénarios complexes de manière efficace. On mentionnera ici une comparaison systématique et exhaustive du lancer de rayons et la simulation par facteurs de vue [1] mettant en lumière une surestimation systématique de la production par les méthodes conventionnelles. Dans un autre travail le lancer de rayons permet l'identification de gains potentiels de plus de 20% de production pour les installations en toiture [2].

- La conversion photothermique dans les récepteurs pour l'énergie solaire concentrée.

Ici on illustrera le couplage multiphysiques avec des méthodes déterministiques par la méthode de la radiation nette (équilibre des radiosités) permettant de résoudre des problèmes complexes et on présentera certains cas d'études liés aux centrales de 3ème génération [3], [4], [5], [6] ou à l'optimisation de récepteurs à cavité [7], [8].

- La conversion thermophotovoltaïque.

Les premiers résultats obtenus dans le cadre d'une collaboration avec la start-up américaine Mesodyne Inc. permettent d'illustrer la complexité de l'étude de ces systèmes, notamment au niveau des propriétés radiatives traitées.

- L'étude des propriétés spectro-directionnelles de matériaux.

Finalement, l'application du lancer de rayons à l'estimation des propriétés radiatives effectives de pièces en superalliage de nickel (Inconel 718) obtenus par impression 3D [9], [10] illustrera des applications aux problématiques matériaux.

On conclura sur les perspectives de développement de ces méthodes dans le cadre de la décarbonation industrielle, notamment pour les procédés à haute température.

Références :

- [1] M. Ernst, C. A. Asselineau, P. Tillmann, K. Jäger, and C. Becker, "Modelling bifacial irradiance – Step-by-step comparison and validation of view factor and ray tracing models," *Appl Energy*, vol. 369, p. 123574, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.123574.
- [2] M. Ernst, X. Liu, C. A. Asselineau, D. Chen, C. Huang, and A. Lennon, "Accurate modelling of the bifacial gain potential of rooftop solar photovoltaic systems," *Energy Convers Manag*, vol. 300, p. 117947, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117947.
- [3] S. Wang, C. A. Asselineau, W. R. Logie, J. Pye, and J. Coventry, "MDBA: An accurate and efficient method for aiming heliostats," *Solar Energy*, vol. 225, pp. 694–707, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.07.059.
- [4] C. A. Asselineau, A. Fontalvo, S. Wang, F. Venn, J. Pye, and J. Coventry, "Techno-economic assessment of a numbering-up approach for a 100 MWe third generation sodium-salt CSP system," *Solar Energy*, vol. 263, p. 111935, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.111935.
- [5] S. Wang *et al.*, "Co-optimisation of the heliostat field and receiver for concentrated solar power plants," *Appl Energy*, vol. 348, p. 121513, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.APENERGY.2023.121513.
- [6] C. Turchi *et al.*, "CSP Gen3: Liquid-Phase Pathway to SunShot, National Renewable Energy Laboratory," *OSTI 1807668*, 2021, doi: 10.2172/1807668.
- [7] C.-A. Asselineau, J. Zapata, and J. Pye, "Integration of Monte-Carlo ray tracing with a stochastic optimisation method: application to the design of solar receiver geometry," *Opt Express*, vol. 23, no. 11, p. A437, 2015, doi: 10.1364/oe.23.00a437.
- [8] J. Pye *et al.*, "Experimental testing of a high-flux cavity receiver," in *AIP Conference Proceedings*, 2017, p. 110011. doi: 10.1063/1.4984485.
- [9] C.-A. Asselineau, M. Zheng, R. Pottas, and J. Coventry, "3D printed sub-mm geometrical surface structures for improved absorptance in high-temperature receivers.," in *SolarPACES 2022 Albuquerque (NM, USA)*, Albuquerque, Aug. 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.21786.76487.
- [10] C.-A. Asselineau, B. Rousseau, and J. Gonzalez-Aguilar, "Directional radiative properties of high-temperature materials results from the msca if heaters project," in *TPV15, the 15th international conference on thermophotovoltaics*, Madrid, Oct. 2024. doi: 10.13140/RG.2.2.11012.33924.