

# 8-ÈMES JOURNÉES ANNUELLES DU GDR TAMARYS

4-6 mai 2026  
Gif-sur-Yvette

France

# Table des matières

Influence de l'émissivité spectrale des matériaux réfractaires sur les performances des fours industriels, Antoni Augé [et al.] . . . . .	3
Monte Carlo pour le couplage conduction-rayonnement : prise en compte du rayonnement non-linéarisé., Mathis Boiteau [et al.] . . . . .	4
Optimisation topologique d'absorbeurs solaires volumiques à haute température, Augustin De La Vauvre . . . . .	5
Elaboration de grenat à haute entropie – propriété thermique, chimique et optique en température, Sauzeau Emeric [et al.] . . . . .	6
Couplage multi-physique combustion–rayonnement–transfert conjugué aux parois pour la simulation d'écoulements réactifs en oxy-combustion, Pierre Fauré [et al.]	8
Les enjeux et les défis de mesure de température dans la domaine sidérurgique, Grace Ham [et al.] . . . . .	9
Étude de la stabilisation de l'ébullition convective par matrice de picots macroscopiques à l'aide de la thermométrie de luminophores bidimensionnelle, Sacha Hirsch [et al.] . . . . .	10
Wall heat transfer and Radiation Effects on Large-Eddy Simulation of Methane Oxy-Flames Stabilized on a Swirled Co-Axial Injector, Paolo Illuminati [et al.] . .	11
Vieillessement accéléré par voie solaire de composites SiC/AlO/FeCrAlMo, Thiane Ndiaye [et al.] . . . . .	13
Instabilités thermoconvectives dans une cavité rectangulaire chauffée par effet Joule, Franck Pigeonneau . . . . .	14
Étude comparative de modèles spectraux pour la simulation des transferts radiatifs d'un mélange vapeur d'eau - brouillard de gouttes, Benjamin Pyryt [et al.] . . . .	15
Couplage conducto-radiatif de structures fibreuses hétérogènes dans un maillage tétraédrique par méthode hybride, Léo Royon [et al.] . . . . .	17

Amélioration de la modélisation de la conduction thermique transitoire dans des milieux hétérogènes voxélisés par la méthode des marcheurs Browniens, Mattéo Roch [et al.] . . . . .	18
Procédé de refusion d'aluminium par torche plasma : étude expérimentale sur un démonstrateur industriel, Gabriel Rogan [et al.] . . . . .	20
Morphological and non-Beerian radiative characterization of a fibrous medium, Mahé Souveton [et al.] . . . . .	21
AI-driven simulations and optimization of glass furnaces, Marion Stenta [et al.] .	22
<b>Liste des auteurs</b>	<b>22</b>

# Influence de l'émissivité spectrale des matériaux réfractaires sur les performances des fours industriels

Antoni Augé \* <sup>1</sup>, Olivier Farges <sup>2</sup>, Olivier Rozenbaum <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation – Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR3079 – France

<sup>2</sup> Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Objectifs Cette étude s'inscrit dans la démarche de décarbonation des procédés industriels à haute température. L'objectif est d'évaluer l'influence des propriétés radiatives spectrales des matériaux réfractaires et des gaz de combustion sur les performances énergétiques d'un four de refusion d'aluminium équipé de brûleurs oxy-combustible au gaz naturel. Caractérisation expérimentale La caractérisation des émissivités spectrales directionnelles des oxydes réfractaires a été réalisée au CEMHTI via un banc de spectroscopie FTIR haute température opérant jusqu'à 2500 K. L'acquisition des spectres d'émissivité sur un large domaine spectral et thermique fournit les conditions aux limites radiatives nécessaires à une simulation fidèle des échanges thermiques par rayonnement dans le four. Approche numérique L'originalité de l'approche réside dans la prise en compte explicite de la dépendance spectrale à la fois des émissivités de parois et des propriétés des gaz de combustion dans le calcul des transferts radiatifs. Pour se faire, nous utilisons la méthode de Monte Carlo dite en Line Sampling où des photons sont suivis dans le milieu. Cette approche permet de résoudre sans aucun biais l'équation de transfert radiatif en prenant en compte les réflexions multiples aux parois caractérisées par des émissivités spectrales et d'utiliser un modèle raie par raie pour l'absorption des gaz. Concernant l'absorption des gaz, une force de la proposition est que le coefficient d'absorption des gaz n'est pas calculé explicitement (ce qui s'avère coûteux dans un milieu à haute température, où la base spectroscopique HITEMP, contenant des centaines de millions de raies spectrales, est utilisée). À la place, des raies spectrales sont échantillonnées à certaines positions et fréquences dans le milieu. Un échange étroit avec des informaticiens de la synthèse d'image de l'IRIT a conduit au développement d'une première proposition d'échantillonnage par importance optimisé de ces raies pour l'atmosphère terrestre. Ici nous adaptons ce travail pour les milieux à haute température. Finalement ce même échange à l'interface entre physique et informatique a permis de développer des outils de suivi de rayon en géométrie complexe où on montre une insensibilité du temps de calcul au raffinement du nombre de triangles composant la géométrie. Ainsi, l'optimisation conjointe de l'échantillonnage des raies spectrales et du suivi de rayon en géométrie complexe permettent d'obtenir des temps de calcul compatibles avec des études industrielles tout en conservant une précision élevée. Cette approche, couplant caractérisation expérimentale et simulation spectrales, permet d'évaluer avec précision l'impact des propriétés radiatives sur l'efficacité énergétique globale du procédé et d'identifier les leviers d'optimisation pour la décarbonation de ces installations industrielles.

---

\*Intervenant

# Monte Carlo pour le couplage conduction-rayonnement : prise en compte du rayonnement non-linéarisé.

Mathis Boiteau \* <sup>1,2</sup>, Richard Fournier <sup>1</sup>, Olivier Authier <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire PLasma et Conversion d'Energie – Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National Polytechnique (Toulouse), Université de Toulouse – France

<sup>2</sup> Mécanique des Fluides, Energies et Environnement [EDF R D] = Fluid Mechanics, Energy and Environment [EDF R D] – EDF RD – France

Les méthodes de Monte Carlo appliquées au transfert thermique connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt, en particulier pour les configurations de grande complexité géométrique. Elles permettent de traiter des cas industriels où les rapports d'échelles sont une impasse pour les méthodes classiques (1). L'approche probabiliste est performante pour la thermique linéaire et dispose d'un cadre théorique bien établi (2). En pratique il est souvent possible de restreindre les applications aux cas où le rayonnement est linéarisable, malgré cela certaines industries comme celle de la métallurgie ou bien du nucléaire ont besoin d'une représentation plus fidèle du rayonnement. Les méthodes de Monte Carlo sont cependant réputées incapables de traiter les non-linéarités (3). Cette idée commence à être remise en cause grâce à des avancées récentes qui ont permis la construction d'un espace des chemins thermiques prenant en compte le rayonnement non-linéarisé (4). Dans un premier temps les méthodes probabilistes seront présentées dans le cadre de la thermique linéaire, afin de poser les concepts fondamentaux. Ce cadre statistique sera ensuite étendu au rayonnement non-linéarisé, selon le modèle de la loi de Stefan-Boltzmann. La difficulté ici provient du fait que cette non-linéarité interdit la formulation probabiliste directe utilisée dans le cas linéaire. Une proposition basée sur le concept des collisions nulles permet d'obtenir un estimateur non biaisé dans ce cadre, cependant l'algorithme associé n'est pas viable sur le plan opérationnel. Une seconde méthode s'ajoute pour lever ce verrou : les approximations successives de Picard, qui permettent de retrouver des performances acceptables au prix d'un biais. Ces méthodes feront l'objet de cette présentation, qu'il s'agisse de leur principe ou bien leur application concrète. Quelques résultats seront également présentés ainsi que certaines des limites actuelles faisant l'objet de travaux de recherche. (1) Peniguel, Christophe. "Complementary Finite Element and Monte-Carlo Methods to Solve Industrial Thermal Problems." 302 (2024): 06003. (2) Tregan, Jean Marc. "Coupling radiative, conductive and convective heat-transfers in a single Monte Carlo algorithm: A general theoretical framework for linear situations." (Public Library of Science) 18, no 4 (2023): 1-54. (3) Curtiss, J. H. "'Monte Carlo' Methods for the Iteration of Linear Operators." 32, no 1-4 (1953): 209-232. (4) Dauchet, Jeremi. "Addressing nonlinearities in Monte Carlo." (Nature Publishing Group) 8, no 1 (2018): art.13302-11 p.

---

\*Intervenant

# Optimisation topologique d'absorbeurs solaires volumiques à haute température

Augustin De La Vauvre \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> LTEN – CNRS, Nantes Université, CNRS : UMR6607 – France

Les absorbeurs solaires volumiques à haute température s'appuient sur des milieux poreux afin d'améliorer les transferts de chaleur au sein du volume. Si les études paramétriques ont permis d'explorer des variations de conception simples, la fabrication additive offre aujourd'hui l'accès à des distributions de porosité plus complexes. Dans ce travail, nous proposons un cadre d'optimisation topologique basé sur un modèle multiphysique homogénéisé, permettant de déterminer des distributions de porosité qui maximisent l'efficacité de l'absorbeur tout en limitant les gradients de température dans le solide, afin de réduire les risques de fissures. Les structures obtenues présentent des variations radiales et axiales complexes, capturant des effets qui échappent aux approches paramétriques classiques. Des géométries poreuses tridimensionnelles sont ensuite reconstruites à partir des champs optimisés à l'aide d'un outil dédié, fournissant des architectures représentatives en vue d'une fabrication additive et d'essais expérimentales.

---

\*Intervenant

# Elaboration de grenat à haute entropie – propriété thermique, chimique et optique en température

Sauzeau Emeric \*<sup>1</sup>, Rémy Boulesteix<sup>2</sup>, Lucille Despres<sup>3</sup>, Fabrice Rossignol<sup>4</sup>, Emmanuel Veron<sup>5</sup>, Martin Madelin<sup>6</sup>, Olivier Rozenbaum<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche sur les CERamiques – Institut de Chimie - CNRS Chimie, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut Matériaux Procédés Environnement Ouvrages – France

<sup>2</sup> IRCER - Axe 4 : céramiques sous contraintes environnementales – Institut de Recherche sur les CERamiques – France

<sup>3</sup> IRCER - Axe 2 : procédés plasmas et lasers (IRCER-AXE2) – Institut de Recherche sur les CERamiques – Centre Européen de la Céramique, 12 Rue Atlantis, 87068 LIMOGES CEDEX, France

<sup>4</sup> IRCER – IRCER, UMR-CNRS, 7315 Limoges – Centre Européen de la Céramique, 12 Rue Atlantis, 87068 LIMOGES CEDEX, France

<sup>5</sup> CEMHTI – CEMHTI UPR3079 – 3 Avenue de la Recherche Scientifique, 45100 Orléans, France

<sup>6</sup> Air Liquide, Centre de Recherche Claude-Delorme, Paris-Saclay, France. – AIR LIQUIDE - Loges-en-Josas – France

<sup>7</sup> Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation – Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR3079 – France

La réduction des émissions industrielles de gaz à effet de serre demeure un défi majeur. Lors d'un développement de systèmes de conversion d'énergie à haute température, la recherche sur des céramiques techniques s'avère essentielle afin d'améliorer également la durabilité du système. Dans le cadre du projet ANR HyMAX (ANR-23-CE50-0021), l'étude se concentre sur les grenats d'aluminium à haute entropie (HEAG). Ce groupe de matériaux est prometteur comme barrières thermiques et environnementales dans des environnements d'oxy-combustion d'hydrogène, caractérisés par des températures élevées et une atmosphère riche en vapeur d'eau (1). Les HEAG ont été synthétisés par mélange d'oxydes de terres rares (TR) et d'aluminium (Al), respectivement TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, selon un rapport molaire TR/Al de 0,6, suivi d'un frittage réactif à 1700°C pendant une heure. L'évolution des phases durant la synthèse a révélé la formation de phases monocliniques (TR<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub>) et pérovskites (TRAlO<sub>3</sub>) en tant que phases intermédiaires. La solution solide des phases grenat (TR<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) est observée à partir de 1400°C pour les HEAG. Nos travaux comparent les HEAG au grenat d'yttrium et d'aluminium (YAG) en tant que matériaux de barrière thermique et environnementale, en se concentrant sur leur conductivité thermique, leur résistance à la corrosion par la vapeur d'eau et leurs propriétés de rayonnement thermique. L'analyse des paramètres clés des barrières thermiques et environnementales a montré que la conductivité thermique était réduite d'un facteur 3 à température ambiante par rapport au YAG, améliorant ainsi l'isolation thermique avec les HEAG. Les tests de corrosion à 1400°C sous 80% d'humidité relative ont révélé une cinétique linéaire (5-10  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$ ) (2). Ce résultat est comparable à celui du YAG. Les mesures d'émissivité spectrale jusqu'à 600°C ont montré des raies d'émission distinctes provenant des terres rares (Er<sup>3</sup>, Dy<sup>3</sup>, Ho<sup>3</sup>) dans la zone de semi-transparence

---

\*Intervenant

du matériau, c'est-à-dire dans l'infrarouge moyen et proche (1-4  $\mu\text{m}$ ). Nous montrons ainsi que les propriétés optiques et radiatives des HEAG dans cette gamme spectrale peuvent être adaptées en ajustant leur composition ; permettant de ce fait une optimisation des fonctionnalités pour des applications ciblées à haute température dans des environnements difficiles. Ces résultats montrent que les HEAG sont des matériaux prometteurs pour les applications de barrières thermiques et environnementales de nouvelle génération dans les systèmes énergétiques basés sur la combustion d'hydrogène. Références (1) H. Chen et al., J. Mater. Sci. Technol., vol. 48, p. 57-62, 2020. (2) W. Liao et al., J. Alloys Compd., vol. 949, p. 169736, 2023.

# Couplage multi-physique combustion–rayonnement–transfert conjugué aux parois pour la simulation d’écoulements réactifs en oxy-combustion

Pierre Fauré \* <sup>1</sup>, Ronan Vicquelin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d’Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion – CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR288 – France

La recherche de nouvelles alternatives aux énergies fossiles a mis en évidence l’oxy-combustion de carburants tels que l’hydrogène ou le méthane comme des solutions prometteuses dans la lutte contre le changement climatique. Cependant, les températures élevées générées par ces procédés, ainsi que les fortes concentrations en H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>, rendent la simulation et l’étude de ces flammes particulièrement complexes. Dans de nombreux cas, la prise en compte des transferts radiatifs au sein des chambres de combustion devient indispensable pour les simulations numériques, afin de prédire avec précision les flux thermiques aux parois ainsi que les caractéristiques globales de la flamme. Le solveur de rayonnement Monte Carlo RAINIER, développé au laboratoire EM2C, permet de calculer la puissance radiative au sein de milieux participatifs ainsi que les flux radiatifs aux parois. Ces termes sources, intégrés aux équations de transport, permettent alors de prendre en compte les effets du rayonnement dans les configurations étudiées. Afin d’intégrer ces effets radiatifs, une nouvelle stratégie de couplage a été développée. Celle-ci repose sur l’utilisation conjointe des solveurs de combustion et de transfert thermique solide de la plateforme YALES2 (CORIA) avec le solveur de rayonnement RAINIER. L’objectif de cette présentation est de décrire la méthodologie de couplage proposée. Un premier exemple illustrant l’impact de ce couplage sera ensuite présenté sur une flamme plane laminaire H<sub>2</sub>/Air. Enfin, les résultats obtenus sur un cas à l’étude de couplage solide–rayonnement dans un milieu poreux seront présentés et comparés aux résultats déjà rapportés.

---

\*Intervenant

# Les enjeux et les défis de mesure de température dans la domaine sidérurgique

Grace Ham \* <sup>1</sup>, Morgan Ferté \*

2

<sup>1</sup> ArcelorMittal Global RD – entreprise privé – France

<sup>2</sup> ArcelorMittal Global RD – Entreprise privée – France

L'industrie sidérurgique repose sur une mesure fiable et précise de la température tout au long de la chaîne de fabrication de l'acier. Cependant, les mesures à haute température constituent un défi majeur en raison des environnements industriels sévères, caractérisés par des températures extrêmes, des poussières, des fumées, des vibrations mécaniques et de fortes perturbations électromagnétiques. La maîtrise de la température est particulièrement critique lors des étapes clés telles que les transitions de phase, le refroidissement contrôlé et les transformations métallurgiques, où de faibles écarts peuvent avoir un impact significatif sur la microstructure et la qualité finale du produit. Dans ces conditions, les capteurs doivent fonctionner de manière robuste et fiable malgré de nombreuses sources de perturbations, notamment le bruit de mesure, les incertitudes de procédé et les variations des propriétés de surface. Le développement de solutions de mesure adaptées, capables de fournir des données fiables sur l'ensemble du procédé sidérurgique, est essentiel pour le contrôle des procédés, l'optimisation industrielle et l'amélioration de la qualité des produits.

---

\*Intervenant

# Étude de la stabilisation de l'ébullition convective par matrice de picots macroscopiques à l'aide de la thermométrie de luminophores bidimensionnelle

Sacha Hirsch \* <sup>1</sup>, Nicolas Fdida , Cornelia Irimiea , Sylvain Petit <sup>2</sup>, Benoît Fond <sup>3</sup>, Guillaume Pilla

<sup>1</sup> ONERA, Université Paris Saclay [Palaiseau] – DMPE, ONERA, Univ. Paris Saclay, F-91123 Palaiseau, France – France

<sup>2</sup> ONERA-CORIA – DMPE, ONERA, Univ. Paris Saclay, F-91123 Palaiseau, France, Normandie Univ., UNIROUEN, INSA Rouen, CNRS, CORIA, 76000 Rouen, France – France

<sup>3</sup> DAAA-MAPE, ONERA, Université Paris Saclay [Meudon] – ONERA – FR-92190 Meudon – France, France

Les matrices de picots macroscopiques sont utilisées dans divers échangeurs monophasiques, notamment pour refroidir des aubes de turbine. Nous cherchons à étendre leur emploi à des écoulements bouillants fortement endothermiques. La thermométrie infrarouge n'étant pas adaptée à une telle géométrie, la thermométrie de luminophores est développée de manière originale comme alternative adaptée au système étudié. Cette technique optique permet de mesurer directement des champs de température surfaciques d'une forme complexe au travers de l'écoulement bouillant instationnaire. Les résultats obtenus dans un canal refroidi par eau montrent que le rôle des picots dans l'intensification de l'échange de chaleur est distinct du cas monophasique. Dans le cas diphasique, l'amélioration du coefficient d'échange global, liée à la favorisation de l'évaporation en film liquide, est estimée à 25 %. D'une part, l'ébullition nucléée est limitée en faveur de l'évaporation d'un film liquide, plus efficace. D'autre part, la stabilité accrue du film permet de retarder la crise d'ébullition. Au total, le coefficient d'échange global maximum atteint pour la géométrie à picots est de 17.4 kW/(m<sup>2</sup>K), contre 12.6 kW/(m<sup>2</sup>K) en géométrie plane. Les champs de températures montrent la quasi-absence de départs de bulles en géométrie à picots. Des distributions de température de surchauffe sont obtenues et sont comparées entre géométries et régimes d'écoulement. Enfin, des gradients de température verticaux dans des picots sont mesurés dans différents régimes d'écoulement, du monophasique liquide à l'ébullition en film (vapeur). L'ensemble de ces résultats quantitatifs permet d'alimenter des modèles 0D ou 3D (CFD) d'échangeurs à changement de phase, à la fois pour des géométries planes et à matrices de picots.

---

\*Intervenant

# Wall heat transfer and Radiation Effects on Large-Eddy Simulation of Methane Oxy-Flames Stabilized on a Swirled Co-Axial Injector

Paolo Illuminati \* <sup>1</sup>, Ronan Vicquelin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion – CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR288 – France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (EM2C) – CentraleSupélec, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris-Saclay – CentraleSupélec - 3, rue Joliot Curie - 91192 GIF-SUR-YVETTE CEDEX, France

The transition towards cleaner energy sources has made oxy-combustion a promising route for carbon capture and storage, since methane burned with oxygen-rich oxidizers produces exhaust gases mainly composed of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O, which simplifies downstream separation. Despite this advantage, predictive simulation of oxy-flames remains challenging because chemical conversion, turbulent mixing, radiation, and wall heat transfer are tightly coupled. Capturing these interactions is essential for understanding flame stabilization, temperature distribution, and heat losses in practical combustors. This work focuses on an oxy-methane configuration stabilized on a swirled co-axial injector and characterized by an M-shaped flame structure named FlameA1. This configuration is particularly demanding because it combines non-premixed and partially premixed combustion regimes within a strongly recirculating flow. Large-Eddy Simulation is performed with YALES2 to resolve the main turbulent structures governing mixing and flame anchoring. Radiative transfer is treated with the RAINIER solver using a Quasi-Monte Carlo approach. Compared with conventional Monte Carlo sampling, Quasi-Monte Carlo methods rely on low-discrepancy sequences, such as Sobol or Halton sequences, to reduce variance and improve convergence in radiative transfer calculations. This makes them attractive for evaluating radiative effects in turbulent oxy-combustion while maintaining an acceptable computational cost. Building on recent progress achieved on the coupling strategy, the present study is organized around two separated investigations designed to prepare a fully coupled framework. The first investigation consists of a radiative standalone case aimed at quantifying radiative heat losses and evaluating their influence on flame topology, temperature levels, and the overall thermal field. The second investigation consists of a separate conjugate heat transfer case devoted to quantifying the heat flux transferred to the combustor walls and identifying the flame is affected by wall losses. By treating radiation and wall heat transfer independently at this stage, the study isolates the physical contribution of each mechanism and clarifies their respective effect before addressing their simultaneous interaction with combustion. This step-by-step approach is intended to establish a robust basis for the next stage of the project, namely the coupling

---

\*Intervenant

of Large-Eddy Simulation, radiation, and wall heat transfer within a unified numerical framework. The resulting simulations will be compared with experimental observations in terms of flame morphology, flow patterns, temperature distribution, and global heat-loss indicators. Beyond the immediate objective of improving agreement with measured data, the broader goal is to strengthen the physical understanding of methane oxy-flames stabilized on swirled co-axial injectors and to support the development of predictive tools for practical oxy-combustion systems. In this perspective, the present standalone analyses are not separate end points, but the basis that can reduce modeling uncertainty and provide a clearer interpretation of the coupled thermo-fluid dynamics that govern flame behavior. Particular attention will be paid to the balance between computational cost and physical fidelity, since one objective of the work is to identify a tractable strategy for future coupled calculations. The standalone cases also provide controlled benchmarks for assessing sensitivity to radiative properties, wall boundary conditions, and mesh resolution before introducing the full multiphysics interaction under realistic industrial turbulent oxy-combustion operating conditions.

# Vieillissement accéléré par voie solaire de composites SiC/AlO/FeCrAlMo

Thiane Ndiaye <sup>1</sup>, Emma Castel <sup>1</sup>, Reine Reoyo-Prats <sup>1,2</sup>, Frédéric Mercier <sup>3</sup>,  
Thierry Encinas <sup>3</sup>, Stéphane Coindeau <sup>3</sup>, Ludovic Charpentier \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire – CNRS : UPR8521 – France

<sup>2</sup> Université de Perpignan Via Domitia – Université de Perpignan Via Domitia (UPVD) – France

<sup>3</sup> Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés – Institut de Chimie - CNRS Chimie, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Grenoble Alpes, Institut Polytechnique de Grenoble - Grenoble Institute of Technology – France

Les systèmes solaires à concentration (CST) de type tour requièrent des matériaux de récepteur capables de fonctionner à plus de 1000°C afin d'atteindre les rendements visés par les technologies de troisième génération (25–30%). Les solutions hybrides associant un revêtement céramique à un substrat métallique constituent une voie prometteuse, offrant une stabilité thermomécanique satisfaisante sous de fortes sollicitations thermiques cycliques. Cette étude évalue le comportement à haute température de revêtements en carbure de silicium (SiC) déposés sur un alliage Fe–Cr–Al–Mo (Kanthal APMT) exposé à un flux solaire concentré. Les substrats APMT ont été préalablement oxydés afin de former une couche intermédiaire continue d' $\alpha$ -AlO (1–2 $\mu$ m) jouant le rôle de barrière chimique et mécanique. Les couches de SiC, obtenues par dépôt chimique en phase vapeur à haute température (HT-CVD), présentent une épaisseur homogène comprise entre 10 et 24 $\mu$ m. Les analyses par DRX, MEB, EDS et spectrophotométrie optique ont révélé la formation de SiC cubique (3C-SiC) à microstructure globulaire, accompagné de fortes contraintes résiduelles en compression (–2000 à –2400MPa) responsables d'une microfissuration. L'augmentation de l'épaisseur du revêtement ou l'application d'un recuit post-dépôt permettent de relâcher partiellement ces contraintes. Une oxydation contrôlée conduit à la formation d'une fine couche de silice, améliorant l'absorptivité solaire au-delà de 90%. Les tests de cyclage thermique accéléré sous flux solaire concentré (jusqu'à  $\sim$ 900kW/m<sup>2</sup>, pour des températures de surface de 1050 à 1200°C) ont montré que la stabilité des revêtements dépend de l'épaisseur du SiC, de l'évolution des contraintes résiduelles, de l'épaisseur de la couche d' $\alpha$ -AlO et de la sévérité du cyclage thermique. L'optimisation de ces paramètres apparaît essentielle pour assurer la durabilité à long terme des récepteurs hybrides destinés aux systèmes CSP.

---

\*Intervenant

# Instabilités thermoconvectives dans une cavité rectangulaire chauffée par effet Joule

Franck Pigeonneau \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Mise en Forme des Matériaux – Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris), Centre National de la Recherche Scientifique – France

Le chauffage par dissipation de Joule est utilisé dans l'industrie du verre principalement pour la production de verres potentiellement volatils et polluants, de produits à forte valeur ajoutée, ainsi que pour l'isolation en laine. Dans ce travail, une étude numérique se concentre sur un modèle simplifié visant à reproduire un four électrique à verre. Notre étude se limite à une enceinte bidimensionnelle dont le rapport d'aspect est égal à deux. La source d'énergie provient de la dissipation Joule produite par un potentiel électrique appliqué à l'aide de deux électrodes correspondant à une fraction des parois verticales. Les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et du potentiel électrique sont résolues à l'aide d'une méthode des éléments finis. Trois paramètres interviennent dans le problème : le nombre de Rayleigh,  $Ra$ , le nombre de Prandtl,  $Pr$ , et la longueur des électrodes,  $Le$ , normalisée par la hauteur de l'enceinte. La méthode numérique a été validée dans un cas où les électrodes ont la même longueur que les parois verticales conduisant à un terme source uniforme. La réduction de la longueur des électrodes depuis la partie inférieure de la cavité entraîne la disparition du seuil de convection. À un nombre de Rayleigh modéré, la structure de l'écoulement est principalement composée d'une cellule tournant vers la gauche dans le sens des aiguilles d'une montre et d'une cellule tournant vers la droite dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Des simulations numériques ont été réalisées pour un cas spécifique avec  $Le = 2/3$ ,  $Ra \in (1 ; 10)$  et  $Pr \in (1 ; 10^3)$ . Quatre types de solutions d'écoulement ont été établis, caractérisés par une structure en régime permanent symétrique à deux cellules, avec un écoulement descendant au milieu de la cavité pour la première. Une première instabilité se produit pour un nombre de Rayleigh critique dépendant fortement du nombre de Prandtl lorsque  $Pr < 3$ . La structure d'écoulement devient asymétrique avec une seule cellule en régime permanent. Une deuxième instabilité se produit au-delà d'un deuxième nombre de Rayleigh critique quasi-constant lorsque  $Pr > 10$ . L'écoulement pour  $Ra$  plus grand que le deuxième nombre de Rayleigh critique devient périodique dans le temps. Si  $Pr < 3$ , une quatrième solution en régime permanent est établie lorsque  $Ra$  est supérieur à la deuxième valeur critique, caractérisée par une structure en régime permanent avec un écoulement ascendant au milieu de la cavité.

---

\*Intervenant

# Étude comparative de modèles spectraux pour la simulation des transferts radiatifs d'un mélange vapeur d'eau - brouillard de gouttes

Benjamin Pyryt \*<sup>1,2</sup>, Anouar Soufiani<sup>1</sup>, Philippe Rivière<sup>1</sup>, Stéphane Mimouni<sup>2</sup>, Chaï Koren<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion – CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UPR288 – France

<sup>2</sup> Mécanique des Fluides, Energies et Environnement [EDF R D] = Fluid Mechanics, Energy and Environment [EDF R D] – EDF RD – France

Un des principaux accidents graves étudiés dans la prévention en terme de sécurité des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) est l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Il s'agit d'une brèche dans le circuit d'eau primaire du réacteur, entraînant une importante perte de pression induisant la vaporisation de l'eau. Dans le cas d'un dénoyage complet, où l'eau est entièrement vaporisée, une des solutions proposées est le renoyage du cœur par le bas, à savoir une injection d'eau froide. Cette eau chauffe et bout très rapidement, ce qui provoque un détachement de gouttes à sa surface libre, entraînant la création d'un écoulement multiphasique vapeur d'eau/gouttes d'eau entre les crayons combustibles. Les premières simulations numériques de cet écoulement ont pu mettre en évidence une sous-estimation du flux thermique aux parois par rapport aux résultats expérimentaux (1). Pour les températures d'intérêt (700 à 1200K), les transferts radiatifs impliquant la paroi chaude, la vapeur ainsi que les gouttes ne doivent plus être négligés. L'objectif de cette étude est de développer un modèle de rayonnement permettant à la fois d'être suffisamment précis et représentatif de l'application considérée et de minimiser le temps de calcul CPU, ce qui lui permettrait d'être couplé à des calculs de CFD 3D de simulations industrielles. Le modèle spectral de référence est un calcul raie-par-raie (LBL) haute résolution dont les données spectroscopiques proviennent de la base HITEMP-2010 (2) pour la vapeur d'eau et dont les coefficients d'absorption, de diffusion ainsi que les fonctions de phase des gouttes d'eau sont données par la théorie de Mie à partir de résultats expérimentaux sur l'indice de réfraction de l'eau liquide (3). Deux modèles spectraux sont considérés ici, tous deux compatibles avec la méthode de résolution par ordonnées discrètes (DOM) et en milieu diffusant par les gouttelettes d'eau : le modèle k-corrélé (CK) (4) où les propriétés radiatives des gouttes d'eau seront considérées grises par bande ; et le modèle basé sur la fonction de distribution du spectre d'absorption (ADF) (5) utilisant une fonction de distribution jointe entre la vapeur et les gouttes. L'étude de ces modèles spectraux est faite à l'aide de calcul de transferts radiatifs en géométrie simplifiée entre des plaques planes parallèles. References (1) J. E. Luna Valencia, Étude du refroidissement d'un assemblage combustible par un écoulement vertical vapeur/gouttes à l'échelle d'un sous-canal, PhD. thesis, Université de Lorraine, 2023 (2) Rothman LS, Gordon IE, Barber RJ, et al., J Quant Spectrosc Radiat Transfer 2010;111:2139–50 (3) G. M. Hale, M. R. Querry, Journal

---

\*Intervenant

of the optical society of America, 1972;62(9):1103-1108. (4) Rivière Ph., Soufiani A., Int J Heat Mass Transfer 2012;55:3349–3358 (5) L. Pierrot, A. Soufiani, J. Taine, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 1999;62:523-548

# Couplage conducto-radiatif de structures fibreuses hétérogènes dans un maillage tétraédrique par méthode hybride

Léo Royon \* <sup>1,2</sup>, Cyril Daoût <sup>1</sup>, Frédéric Joly <sup>2</sup>, Denis Rochais <sup>1</sup>, Yassine Rouizi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA Le Ripault – Direction des Applications Militaires – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique et d’Energétique d’Evry – Université d’Evry-Val-d’Essonne, Université Paris-Saclay – France

Nous cherchons à caractériser des matériaux poreux hétérogènes à structure complexe et soumis à des hautes températures à l’aide d’un nouveau modèle numérique de couplage de la conduction et du rayonnement thermiques. Ce dernier modélise la conduction de manière déterministe par une méthode éléments finis, et le rayonnement de manière stochastique par lancer de rayons Monte-Carlo. L’ensemble de la simulation a lieu dans un maillage tétraédrique non structuré. Cet outil permet d’obtenir le champ de température couplé 3D, ainsi que les flux conductif, radiatif et le flux total selon une direction choisie. Par ailleurs, ce code de calcul permet de traiter des volumes numériques proches d’un VER sur un ordinateur de bureau et en des temps de calcul parfaitement raisonnables (quelques heures pour une simulation transitoire complète) malgré son aspect stochastique. Le modèle a d’abord été validé sur l’analyse comparée du GDR Tamarys menée par Penazzi et al. (1). Notre code de calcul assure la conservation du flux thermique. Nous montrons en outre que la gestion des conditions aux limites radiatives des parois adiabatiques permet d’expliquer les différences importantes obtenues par les différentes équipes. Nous présentons des résultats obtenus sur une géométrie issue d’une tomographie par rayons X d’un échantillon de matériau fibreux, représentée initialement par une " image " de taille 8403 (soit 592.7M) voxels. Cette dernière est ensuite maillée en tétraèdres non structurés puis étudiée. La phase solide (les fibres) est considérée comme opaque dans un premier temps, bien que l’objectif à court terme de l’outil soit de pouvoir représenter le comportement semi-transparent exhibé par les fibres. Pour illustrer les capacités de cet outil numérique, nous présentons une étude paramétrique sur l’évolution des profils de flux radiatif et conductif pour un matériau poreux en fonction de la température. Nous retrouvons numériquement la loi de Rosseland dans l’approximation d’un milieu optiquement épais. Référence : (1) L. Pénazzi et al, " Comparative analysis of methods for solving conduction-radiation coupling in heterogeneous materials ", 11th International Symposium on Radiative Transfer RAD-25 June 15-20, 2025

---

\*Intervenant

# Amélioration de la modélisation de la conduction thermique transitoire dans des milieux hétérogènes voxélisés par la méthode des marcheurs Browniens

Mattéo Roch \* <sup>1</sup>, Franck Enguehard <sup>2</sup>, Cyril Daoût <sup>1</sup>, Denis Rochais <sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA Le Ripault – Direction des Applications Militaires – France

<sup>2</sup> Institut P' – CNRS, Université de Poitiers, ENSMA – France

Les matériaux poreux tels que les feutres et les mousses constitués de céramiques réfractaires (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>) présentent d'excellentes performances thermiques recherchées pour de nombreuses applications à haute température (isolation, échangeurs de chaleur, absorbeurs solaires). La prédiction de leur comportement thermique nécessite de modéliser le transfert de chaleur transitoire en couplant conduction et rayonnement au sein de l'ensemble des constituants du matériau. Ces milieux hétérogènes présentent des morphologies 3D complexes, reconstruites numériquement sous forme de structures voxélisées par tomographie à rayons X. En raison de la discrétisation spatiale fine requise pour capturer fidèlement les détails microstructuraux, les méthodes déterministes deviennent particulièrement coûteuses en mémoire. Pour lever cette limitation, nous utilisons une approche entièrement stochastique : le transfert radiatif est simulé par lancer de rayons Monte Carlo, tandis que la conduction thermique est modélisée par le déplacement de porteurs d'énergie, appelés marcheurs Browniens, comme introduit par Seyer et al. (1). Ce travail se concentre sur la conduction thermique dans des structures voxélisées hétérogènes, et plus précisément sur le comportement des marcheurs Browniens aux interfaces entre constituants présentant de forts contrastes de propriétés thermo-physiques. Dans (1), la méthode proposée s'avère difficilement applicable à des géométries 3D réalistes. Deux approches alternatives sont proposées par Baioni et al. (2) et Oukili et al. (3), chacune offrant un traitement distinct du comportement des marcheurs aux interfaces. Nous présentons ici une extension 2D de ces approches, initialement formulées en 1D. À chaque pas de temps de la simulation, le déplacement d'un marcheur Brownien est régi par un schéma d'Euler–Maruyama, dépendant de la diffusivité thermique du constituant d'origine. Si le marcheur rencontre une interface entre deux constituants, sa position finale doit être corrigée afin de prendre en compte la diffusivité thermique du nouveau constituant. Les deux approches reposent ainsi sur une probabilité de transmission à l'interface : le marcheur est soit transmis dans le constituant adjacent, soit réfléchi vers celui d'origine. Dans la méthode de Lejay et al., le mouvement Brownien local du marcheur est pris en compte pour déterminer l'instant auquel la première interface est atteinte au cours du pas de temps. L'approche d'Oukili et al. repose quant à elle directement sur l'expression analytique de la probabilité de présence d'un marcheur en une position donnée. Les deux approches sont d'abord examinées en 1D, puis étendues à des représentations voxélisées 2D de céramiques poreuses présentant de forts contrastes de propriétés thermo-physiques. Leur

---

\*Intervenant

comparaison permet d'identifier la stratégie la plus adaptée pour de futures simulations 3D couplées conducto-radiatives. Références : (1) L. Seyer, F. Enguehard et D. Rochais, "Deterministic and stochastic approaches for the modeling of conduction-radiation coupling within non-Beerian semi-transparent media", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 325, p. 109086 (2024). (2) E. Baioni, A. Lejay, G. Pichot et G. M. Porta, "Random Walk Modeling of Conductive Heat Transport in Discontinuous Media", *Transp. Porous Media*, 151(14), pp. 2625–2645 (2024). (3) H. Oukili, R. Ababou, G. Debenest et B. Noetinger, "Random Walks with negative particles for discontinuous diffusion and porosity", *J. Comput. Phys.*, 396, pp. 687–701 (2019).

# Procédé de refusion d'aluminium par torche plasma : étude expérimentale sur un démonstrateur industriel

Gabriel Rogan \* <sup>1</sup>, Annabelle Erhart \*

<sup>1</sup>, Louis Piquard \*

1

<sup>1</sup> Constellium Technology Center – C-TEC Constellium Technology Center – France

Dans un contexte de décarbonation du procédé de refusion d'aluminium, Constellium a engagé un projet de démonstration industrielle visant à électrifier un four réverbère par l'intégration d'une torche plasma à arc non transféré fonctionnant à l'azote. Le projet s'appuie sur un four de démonstration d'une capacité de refusion de deux tonnes, équipé avant-projet d'un brûleur air gaz naturel servant de cas de référence pour l'évaluation des performances à venir de la chauffe par plasma. Le démonstrateur et la technologie de plasma seront présentés en détails, ainsi que l'analyse de sensibilité prévue sur les paramètres opératoires de la torche et leur impact sur les performances du procédé (temps de fusion, consommation énergétique spécifique, émissions, tenue des réfractaires et qualité du métal refondu). Le four sera également instrumenté en voûte pour une caractérisation des transferts plasma paroi et l'étude de l'impact de l'absence de rayonnement gazeux issu de l'atmosphère du four liée à l'utilisation d'azote comme gaz plasmagène.

---

\*Intervenant

# Morphological and non-Beerian radiative characterization of a fibrous medium

Mahé Souveton \* <sup>1</sup>, Franck Enguehard <sup>2</sup>, Vital Le Dez <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Thermique aux Nano échelles et Rayonnement [Institut Pprime] – Département Fluides, Thermique et Combustion [Institut Pprime], Université de Poitiers = University of Poitiers – France

<sup>2</sup> Pprime, CNRS, Université Poitiers, ISAE-ENSMA – Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, F-86962 Futuroscope Chasseneuil – France

In the domain of thermal insulation at high temperatures, refractory porous or fibrous materials are of particular interest. In these materials, the conductive and convective heat transfer modes can be negligible and thus, the radiative transfer plays a key role that must be accurately quantified. In this work, we study a random array of overlapping infinite cylinders under vacuum, assumed to be representative of a felt of fibers. The solid phase is assimilated to a homogeneous cold dense participating (absorbing and non scattering) medium with a spectral complex optical index. The distribution of cylinders inside the calculation box is imposed to be statistically homogeneous and isotropic to ensure interesting morphological properties. To achieve this, an algorithm generates each cylinder axis as a  $\mu$ -random chord of the calculation box. Analytical expressions for the average porosity, the overlapping ratio, the autocorrelation function and some chord lengths statistics are deduced. A Monte Carlo ray tracing method is implemented to simulate the propagation of radiation inside the medium. Each ray enters the box following a direction that complies with the conditions of the incident illumination, and may be absorbed inside the cylinders, or reflected or refracted at the interfaces between the cylinders and the vacuum. The fractions of rays exiting the box provide the directional-hemispherical transmittance and reflectance values of the calculation domain. They serve as numerical measurements. The radiative characterization is based on the Radiative Distribution Function Identification (RDFI) method, where the generalized radiative properties of an equivalent homogeneous medium are determined and approximated numerically with the use of a Monte Carlo method. Yet, the originality of our work is in the analytical determination of these generalized radiative properties of our particular material. A "non-Beerian" behaviour of the medium is highlighted. The generalized radiative properties are then used in a radiative model, which is then solved with a Monte Carlo algorithm. The results of transmittances and reflectances issued from this approach are compared to our previous numerical measurements. The agreement between the two methods is not perfect in all the situations that we consider but the behaviors of the curves are always very consistent. Investigation and improvements of the method are still undergoing.

---

\*Intervenant

# AI-driven simulations and optimization of glass furnaces

Marion Stenta \* <sup>1</sup>, Yassine Ayoun \*

<sup>1</sup>, Franck Pigeonneau \*

<sup>1</sup>, Elie Hachem <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Mise en Forme des Matériaux – Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris), Centre National de la Recherche Scientifique – France

The European glass industry, a cornerstone of strategic material sectors, faces unprecedented transformation as it seeks to drastically reduce its carbon footprint while maintaining performance and quality. The electrification of glass furnaces emerges as a promising solution for decarbonization, but it disrupts thermal processes and fluid dynamics, challenging traditional furnace design and impacting lifespan, glass quality, and energy efficiency. In response, the ANR industrial chair "TwinHeat" unites CEMEF research center with three glass makers, a furnace designer company and a software editor to develop next-generation digital twins. These advanced models aim to accurately simulate thermal and fluid behaviors in furnaces, optimized by cutting-edge AI techniques. The poster will showcase two key research efforts: the first thesis focuses on simulating and optimizing electric glass furnaces, while the second develops surrogate models using Graph Neural Networks to accelerate computations. Preliminary results and future work will be presented, paving the way for smarter, greener glass production.

---

\*Intervenant

# Liste des auteurs

Augé, Antoni, 3  
Authier, Olivier, 4  
AYOUN, Yassine, 22  
  
Boiteau, Mathis, 4  
BOULESTEIX, Rémy, 6  
  
Castel, Emma, 13  
Charpentier, Ludovic, 13  
Coindeau, Stéphane, 13  
  
Daoût, Cyril, 17, 18  
De la Vauvre, Augustin, 5  
Despres, Lucille, 6  
  
Emeric, Sauzeau, 6  
Encinas, Thierry, 13  
Enguehard, Franck, 18, 21  
ERHART, Annabelle, 20  
  
Farges, Olivier, 3  
Fauré, Pierre, 8  
FDIDA, Nicolas, 10  
Ferté, Morgan, 9  
Fond, Benoît, 10  
Fournier, Richard, 4  
  
Hachem, Elie, 22  
Ham, Grace, 9  
Hirsch, Sacha, 10  
  
Illuminati, Paolo, 11  
IRIMIEA, Cornelia, 10  
  
Joly, Frédéric, 17  
  
Koren, Chaï, 15  
  
Le Dez, Vital, 21  
  
MADELIN, Martin, 6  
Mercier, Frédéric, 13  
Mimouni, Stéphane, 15  
  
Ndiaye, Thiane, 13  
  
Petit, Sylvain, 10  
Pigeonneau, Franck, 14, 22  
Pilla, Guillaume, 10  
Piquard, Louis, 20  
Pyrty, Benjamin, 15  
  
Reoyo-Prats, Reine, 13  
Rivière, Philippe, 15  
Roch, Mattéo, 18  
  
Rochais, Denis, 17, 18  
Rogan, Gabriel, 20  
ROSSIGNOL, Fabrice, 6  
Rouizi, Yassine, 17  
ROYON, Léo, 17  
Rozenbaum, Olivier, 3, 6  
  
Soufiani, Anouar, 15  
Souveton, Mahé, 21  
Stenta, Marion, 22  
  
Veron, Emmanuel, 6  
Vicquelin, Ronan, 8, 11

