

Sujet de thèse :

Simulation du rayonnement des flammes par Méthode de Monte Carlo

Contexte, objectifs de la thèse

Les méga-feux de végétation en Californie et au Canada, ou encore l'incendie spectaculaire de la Cathédrale de Notre Dame, sont des exemples particulièrement marquants de grands incendies récents, avec des conséquences dévastatrices sur la biodiversité, le patrimoine, et un impact sur les populations. L'utilisation de la simulation numérique est un moyen évident de prédiction et de prévention des risques. Leur développement est nécessaire, mais le problème posé est complexe. Une des raisons est qu'il faut coupler différents phénomènes physiques et chimiques : les transferts de chaleur et de masse, la mécanique des fluides en régime turbulent, la combustion et la dégradation thermique des surfaces combustibles. Une autre difficulté est liée à la large gamme d'échelles impliquées : de l'échelle microscopique pour la dégradation thermique à l'échelle gigascopique pour la propagation sur le terrain.

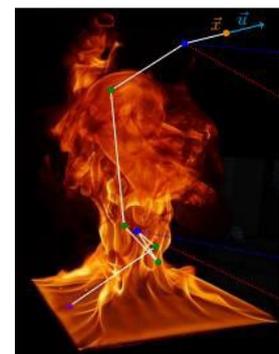
Plusieurs verrous limitent actuellement la précision des prédictions, parmi lesquels **la simulation du rayonnement issu des flammes** est un point particulièrement bloquant. Le rayonnement préchauffe les surfaces combustibles et propage à distance la chaleur dégagée par la flamme. C'est donc le « moteur » de la propagation, mais il est coûteux sur le plan numérique si l'on veut effectuer des simulations précises.

Le travail de thèse ciblera spécifiquement ce verrou du « rayonnement », en adoptant une approche originale basée sur les méthodes de Monte Carlo formulées en espace de chemins. Le-La doctorant-e viendra rejoindre une équipe construite autour du projet RAYFLAM (Simuler le rayonnement des flammes) dont l'objectif est justement de construire un modèle et un code de simulation de référence pour le rayonnement des flammes, afin de le coupler au code de propagation libre accès Fire Dynamics Simulator (FDS), qui permet de simuler la propagation des feux.

Travail à réaliser

Les flammes sont composées de gaz de combustion (CO_2 et vapeur d'eau en particulier) et de suies. L'ensemble est hétérogène, anisotherme et semi-transparent (cela signifie que l'absorption, la diffusion et l'émission de rayonnement varient fortement avec la longueur d'onde ou fréquence du rayonnement). La thèse permettra de créer une solution numérique de référence pour la simulation de flammes, en combinant **un modèle de gaz dit « line-by-line » (raie-par-raie) avec l'approche Monte Carlo**. Trois grandes phases sont détaillées plus loin.

1. L'idée de départ est de suivre le chemin parcouru par les photons issus de la flamme en fonction de leurs probabilités d'absorption et de diffusion, comme illustré sur la figure ci-contre qui correspond à une flamme de combustible liquide dans un bac. En réalisant ce suivi sur un grand nombre de chemins, les statistiques effectuées permettront de reproduire la puissance rayonnée par la flamme vers les surfaces combustibles ou la végétation avec une très grande précision. Le champ de rayonnement pourra également être reconstruit avec des méthodes de type réseaux de neurones que nous appliquons au laboratoire.



La première partie de la thèse initiera un travail bibliographique ciblé sur les feux, le rayonnement, les modèles de propriétés des gaz et les méthodes de Monte Carlo. Puis, le modèle mis au point sera implémenté et testé sur des flammes de référence. Un travail spécifique sur les réseaux de neurones sera ensuite adapté à la flamme simulée.

2. Dans un deuxième temps nous produirons des images numériques réalistes de flammes, en couplant le module de rayonnement créé avec le code de propagation FDS, et en nous inspirant des méthodes de synthèse d'image. Ces « jumeaux numériques » seront comparés avec des images visibles ou infrarouges de flammes réelles obtenues dans le cadre d'expérimentations menées en parallèle. L'enjeu est d'analyser les images numériques créées et d'évaluer le réalisme de la flamme obtenue, le rayonnement qu'elle produit, mais aussi sa dynamique et les structures turbulentes qui la composent par exemple.

La deuxième partie de la thèse orientera le travail bibliographique vers la synthèse d'image. Après une prise en main du code FDS, le module de rayonnement sera couplé au code FDS lui-même. En parallèle, une campagne expérimentale permettra la visualisation par caméra visible et infrarouge de flammes réelles. Le-La doctorant-e participera aux essais du LEMTA et analysera par comparaison le réalisme des images numériques générées avec son code.

3. Un travail important de valorisation est attendu autour de la thèse pour transmettre en libre accès le module de rayonnement construit. Le-La doctorant-e s'appuiera pour cela sur le réseau de l'équipe d'accueil, avec des échanges et séjours prévus en particulier avec les spécialistes en rayonnement de la plateforme ED-Star et les développeurs de FDS au NIST et à l'Université d'Aalto en Finlande.

Cette partie du travail comprend la rédaction du manuscrit et de publications. La participation aux conférences majeures en sciences de l'incendie est prévue également (International Symposium on Fire Safety Science et European Symposium on Fire Safety Science). Des possibilités de séjours dans les laboratoires partenaires à Toulouse, Aalto (Finlande) et Gaithersburg (Etats-Unis) seront envisagées en fonction de l'avancement de la thèse.

Le-la doctorant-e bénéficiera de l'appui de toute l'équipe construite autour du projet RAYFLAM et de son expérience dans le domaine des feux et du rayonnement. Il-elle profitera également de travaux analogues réalisés dans le domaine du climat (même niveau de difficulté, méthodes identiques à adapter au problème des incendies avec leur niveau de température élevé) [1-2].

Mots clés : rayonnement, flamme, incendie, simulation, Monte Carlo, réseaux de neurones

Période : Octobre 2025 / Septembre 2028

Financement : Projet RAYFLAM du Programme INRIA Quadrant

Cadre : Equipe Feux du LEMTA (Laboratoire Energies & Mécanique Théorique et Appliquée)

Encadrement : Pascal BOULET, Olivier FARGES, Yaniss NYFFENEGGER-PERE

Contact :

Pascal BOULET, Professeur de l'Université de Lorraine

LEMTA - Laboratoire Energies & Mécanique Théorique et Appliquée UMR 7563 -

Université de Lorraine, CNRS

2 avenue de la Forêt de Haye - BP 90161 54505 VANDOEUVRE cedex - FRANCE

pascal.boulet@univ-lorraine.fr Tél: (33) (0)3 72 74 42 32

[1] Y. Nyffenegger-Péré, Coupler le rayonnement et la spectroscopie raie par raie dans un même algorithme de Monte Carlo : permettre le calcul de référence des forçages radiatifs, Thèse de doctorat, Université de Toulouse (2023). 185 pages.

[2] Villefranque N. et al. (2019), A path-tracing monte carlo library for 3-d radiative transfer in highly resolved cloudy atmospheres. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(8) 2449- 2473.

PhD Student : Simulation of radiation from flames using Monte Carlo Method

Context, objectives

The wildland mega-fires in California and Canada, and the spectacular fire in Notre Dame Cathedral in France, are particularly striking examples of recent major fires, with devastating consequences for biodiversity and heritage, and an impact on people. The use of numerical simulation is an obvious means of risk prediction and prevention. The development of numerical codes is necessary, but the problem posed is complex. One of the reasons is that different physical and chemical phenomena need to be coupled: heat and mass transfer, fluid mechanics in turbulent conditions, combustion and thermal degradation of combustible surfaces. Another difficulty is linked to the wide range of scales involved: from the microscopic scale for thermal degradation to the gigascopic scale for propagation at the real scale.

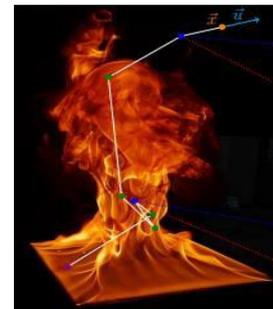
There are currently a number of bottlenecks limiting the accuracy of these predictions, of which the simulation of radiation from flames is a particularly difficult one. Radiation preheats the combustible surfaces and propagates the heat released by the flame from a distance. It is therefore the “key means” of propagation, but it is numerically costly if accurate simulations are to be carried out.

The thesis work will specifically target this “radiation” lock, adopting an original approach with Monte Carlo methods formulated in path-space. The PhD student will join a team built around the RAYFLAM project (Simulating Flame Radiation), the aim of which is to build a model and a reference simulation code for flame radiation, in order to couple it to the open-access propagation code Fire Dynamics Simulator (FDS), which simulates fire propagation.

Work plan

The flames are made up of combustion gases (CO₂ and water vapour in particular) and soot. The whole medium is heterogeneous, non-isothermal and semi-transparent (this means that the absorption, scattering and emission of radiation vary greatly with the wavelength or frequency of the radiation). The thesis will create a reference numerical solution for flame simulation, combining **a line-by-line model for the radiative properties with the path-space Monte Carlo approach**.

1 The idea is to follow the path taken by the photons emitted by the flame as a function of their absorption and scattering probabilities, as illustrated in the figure on the right-hand-side, which corresponds to a liquid fuel flame in a pan. By tracking a large number of paths, the statistics can be used to reproduce the power radiated by the flame towards combustible surfaces or vegetation with a very high degree of accuracy. The radiation field can also be reconstructed using artificial neural network-type methods that we are applying in the laboratory.



The first part of the thesis will begin with a literature review focusing on fires, radiation, gas property models and Monte Carlo methods. The model developed will then be implemented and tested on reference flames. Specific work on neural networks will then be adapted to the simulated flame.

2. Secondly, we will produce realistic numerical images of flames, by coupling the radiation subroutine created with the FDS propagation code, and taking benefit from image synthesis methods. These “numerical twins” will be compared with visible or infrared images of real flames obtained in parallel experiments. The challenge is to analyze the numerical images created and to assess the realism of the flame obtained, the radiation it produces, but also its dynamics and the turbulent structures it contains, for example.

The second part of the thesis will focus on image synthesis. After learning of the FDS code, the radiation module will be coupled to the FDS code itself. At the same time, an experimental campaign will enable the visualization of real flames using visible and infrared cameras. The PhD student will take part in the LEMTA tests and analyze the realism of the numerical images generated with his/her code.

3. A significant amount of work is expected in terms of promoting the thesis in order to make the radiation subroutine available in open access. To this end, the PhD student will draw on the network of his/her host team, with exchanges and visits planned in particular with the radiation specialists of the ED-Star platform and possibly the FDS developers at the NIST and the University of Aalto in Finland.

This part of the work includes writing the manuscript and publications. Participation in major fire science conferences is also planned (International Symposium on Fire Safety Science and European Symposium on Fire Safety Science). Depending on the progress of the thesis, there will be opportunities to spend time in the partner laboratories in Toulouse, Aalto (Finland) and Gaithersburg (USA).

The PhD student will benefit from the support of the entire team built around the RAYFLAM project and its experience in the field of fires and radiation. He/she will also benefit from similar work carried out in the field of climate (same level of difficulty, identical methods to be adapted to the problem of fires with their high temperature level) [1-2].

Keywords : radiation, flame, fire, simulation, Monte Carlo, Artificial Neural Network

Period : October 2025 / September 2028

Funding : Project RAYFLAM (Program INRIA Quadrant)

Frame : Fire Group, LEMTA (Laboratoire Energies & Mécanique Théorique et Appliquée)

Supervisors : Pascal BOULET, Olivier FARGES, Yaniss NYFFENEGGER-PERE

Contact :

Pascal BOULET, Professor Université de Lorraine

LEMTA - Laboratoire Energies & Mécanique Théorique et Appliquée UMR 7563 -

Université de Lorraine, CNRS

2 avenue de la Forêt de Haye - BP 90161 54505 VANDOEUVRE cedex - FRANCE

pascal.boulet@univ-lorraine.fr Tél: (33) (0)3 72 4 42 32

[1] Yaniss Nyffenegger-Péré et al., Spectrally refined unbiased Monte Carlo estimate of the Earth's global radiative cooling. In : Proceedings of the National Academy of Sciences 121.5 (2024).

[2] Villefranque N. et al. (2019), A path-tracing monte carlo library for 3-d radiative transfer in highly resolved cloudy atmospheres. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(8) 2449- 2473.