

## Sujet de stage M2

### Synthèse d'images infrarouges : formulation en intégrales de frontières instationnaire pour la simulation des transferts thermiques

**Mots-clés :** méthodes de Monte-Carlo pour le rendu, résolution d'équations aux dérivées partielles

#### Contexte

La simulation thermique et la synthèse d'images infrarouges sont importantes dans de nombreux contextes, comme le design de fours pour la décarbonation de l'industrie ou le design de villes pour réduire les îlots de chaleur urbains. Ces contextes font apparaître des systèmes aux géométries complexes, par les rapports d'échelle mais aussi la quantité de données impliquées : il faut par exemple tenir compte de vitres de quelques millimètres d'épaisseur comme de bâtiments éloignés de centaines de mètres. La communauté scientifique en informatique graphique a surmonté cette difficulté, aussi appelée problème de "la théière dans un stade", dans les algorithmes de rendu pour la synthèse d'images. Pour cela, deux éléments clés ont été développés : 1. des algorithmes de simulation de l'éclairage fondés sur la notion de chemins lumineux et 2. des structures de données pour la gestion de la complexité géométrique à toute échelle et l'évaluation efficace de requêtes géométriques (intersection rayon/surface, plus grande sphère inscrite dans une géométrie, etc). Or l'extension de ces travaux, fondés sur le transport d'énergie par rayonnement pour le rendu dans le spectre visible aux transferts de chaleur pour le rendu infrarouge n'est pas directe et se heurte à une difficulté : en infrarouge, le rayonnement est couplé à la conduction dans les solides et à la convection dans les fluides.

En s'appuyant sur des avancées en physique théorique, des algorithmes reposant sur la formulation de ces différentes physiques couplées (rayonnement, conduction, convection) dans un seul espace de chemins ont été développés [1] pour produire des images de synthèse infrarouges (voir Fig. 1). Toutefois, un biais est introduit par ces algorithmes lors de l'estimation de la température à la surface des objets (voir Fig. 2b), c'est-à-dire lorsque les chemins basculent en conduction (modélisée par un phénomène de diffusion).

Récemment, la communauté scientifique en informatique graphique s'est intéressée à la résolution sans biais des équations de diffusion [3], en raison de la redécouverte de l'algorithme Walk-on-Spheres datant de 1956 en physique [2] (voir Fig. 2a). Cet algorithme, simple à planter, présente de très bonnes propriétés de convergence, mais est initialement conçu pour la résolution d'un problème de diffusion dans lequel la grandeur recherchée est connue aux bords du domaine. Dans le cas de la thermique couplée, ce n'est pas toujours la grandeur elle-même (i.e. la température) qui est connue aux bords du domaine, mais parfois sa dérivée (i.e. le flux) ou une combinaison des deux.

Des travaux récents en informatique graphique proposent une extension de l'algorithme Walk-on-Spheres à ces types de conditions aux limites [4], en s'appuyant sur des **formulations en intégrales de frontières** ou *Boundary Integral Equation*. Proposées dès les années 1970 en mathématiques, ces formulations ont d'abord été traduites en espace de chemins, avant d'être mises en pratique pour la résolution de problèmes à la géométrie complexe en informatique graphique (voir Fig. 2c). Toutefois, ces propositions sans biais, émergentes, sont pour le moment formulées en régime stationnaire, c'est-à-dire que le temps n'est pas pris en compte dans la résolution, et leur gestion des différents types de conditions aux limites ne permet pas de les utiliser sur des problèmes de transferts de chaleur couplés.

#### Objectifs

L'objectif de ce stage est de contribuer à une meilleure compréhension de ces méthodes basées sur des formulations en intégrales de frontières, et d'explorer leur extension à des cas instationnaires, en vue de leur utilisation pour la simulation des transferts de chaleur.

## Mission du stagiaire

Suite à un premier stage de niveau L3, nous disposons des expressions analytiques des différents éléments impliqués dans la formulation en intégrales de frontières (BIE). Il reste à faire des choix pour construire un ou plusieurs estimateurs non biaisés, puis les mettre en oeuvre. On considérera un système avec des conditions limites de type température ou flux connus (appelées mixtes Dirichlet / Neumann dans la littérature). Des hypothèses simplificatrices seront faite pour commencer, comme l'uniformité des conditions initiales, elles pourront être levées au cours du stage en fonction de l'avancée.

Les missions du stagiaire seront les suivantes :

- Se familiariser avec la BIE et l'état de l'art.
- Proposer un algorithme instationnaire partant de la BIE.
- Réaliser une implémentation "preuve de concept" sur une géométrie simple (un slab).
- Comparer cette nouvelle proposition aux schémas actuels biaisés.
- Insérer la proposition dans un code existant pour la tester sur des géométries complexes.

## Compétences requises

- Connaissances en probabilités et statistiques
- Expérience de programmation (en langage C serait un plus)

De niveau Master2 ou dernière année d'école d'ingénieur en informatique, mathématiques appliquées ou en physique, nous recherchons un(e) candidat(e) curieux(se) avec une appétence pour l'interdisciplinarité et la recherche. En effet, ce stage peut éventuellement mener à une candidature au concours de l'École Doctorale Mathématiques, Informatique et Télécommunications de Toulouse pour l'obtention d'un contrat doctoral et la poursuite d'étude en thèse.

## Environnement

Ce stage sera réalisé au sein de l'équipe STORM de l'IRIT (laboratoire d'informatique), en collaboration avec l'équipe GREPHE du LAPLACE (laboratoire d'énergétique). L'IRIT étant dans une Zone à Régime Restrictif, une demande d'autorisation d'accès devra être réalisée. Le stage se déroulera sur le campus de Rangueil, et donnera lieu à une indemnité légale de 4,35€ par heure, soit environ 635€ par mois.

## Contact

[megane.bati@irit.fr](mailto:megane.bati@irit.fr) et [mathias.paulin@irit.fr](mailto:mathias.paulin@irit.fr)

## Références

- [1] Mégane Bati et al. “Coupling Conduction, Convection and Radiative Transfer in a Single Path-Space: Application to Infrared Rendering”. In: *ACM Trans. Graph.* 42.4 (July 2023). ISSN: 0730-0301. DOI: [10.1145/3592121](https://doi.org/10.1145/3592121). URL: <https://doi.org/10.1145/3592121>.
- [2] Mervin E. Muller. “Some Continuous Monte Carlo Methods for the Dirichlet Problem”. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 27.3 (1956), pp. 569–589. DOI: [10.1214/aoms/1177728169](https://doi.org/10.1214/aoms/1177728169). URL: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177728169>.
- [3] Rohan Sawhney and Keenan Crane. “Monte Carlo Geometry Processing: A Grid-Free Approach to PDE-Based Methods on Volumetric Domains”. In: *ACM Trans. Graph.* 39.4 (2020).
- [4] Rohan Sawhney et al. “Walk on Stars: A Grid-Free Monte Carlo Method for PDEs with Neumann Boundary Conditions”. In: *ACM Trans. Graph.* 42.4 (July 2023). ISSN: 0730-0301. DOI: [10.1145/3592398](https://doi.org/10.1145/3592398). URL: <https://doi.org/10.1145/3592398>.

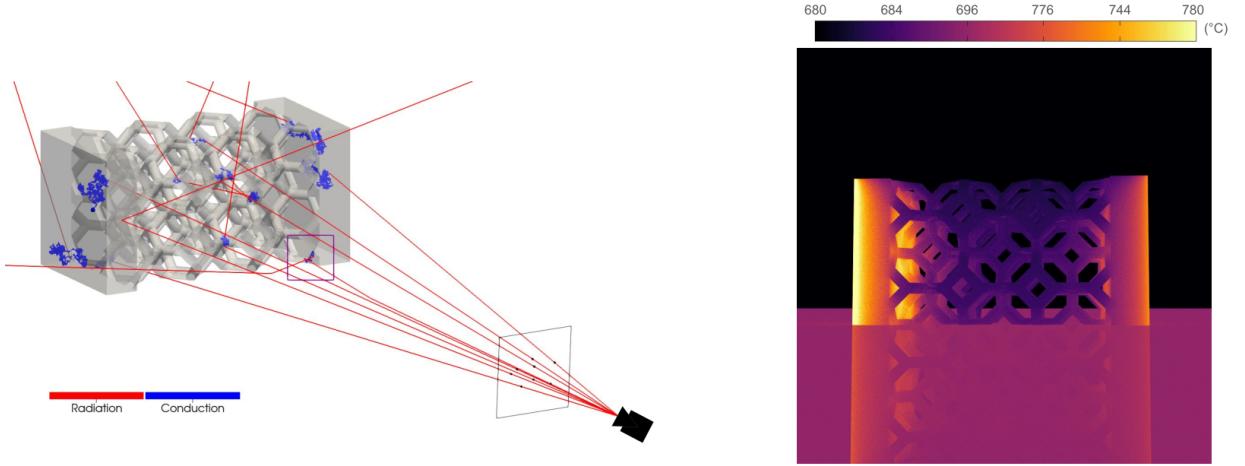


Figure 1: **Simulation thermique couplée.** Pour produire l'image infrarouge d'un radiateur (à droite), les méthodes statistiques utilisent des chemins (à gauche). La température en chaque pixel est obtenue comme la moyenne des températures rencontrées en fin de chemin, pour un grand nombre de chemins. Ceux-ci partent de la caméra puis subissent des interactions aléatoires avec la scène, ils alternent ici entre plusieurs modes de transfert thermique : le rayonnement en rouge et la conduction en bleu. Les chemins s'arrêtent lorsqu'ils rencontrent une zone de l'espace où la température est connue, ici il s'agit de la température des parois latérales à gauche et à droite ainsi que l'environnement. Image extraite de [1].

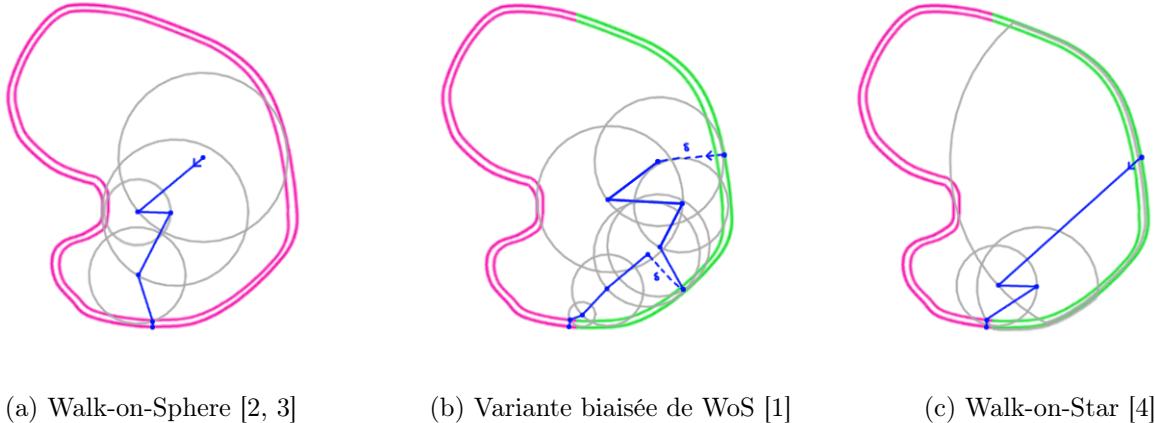


Figure 2: **Algorithme Walk-on-Sphere et ses variantes.** Afin d'estimer la température en un point sonde dans un solide, (a) l'algorithme WoS moyenne sur un grand nombre de chemins partant du point d'intérêt, les températures connues (en rose) des bords qu'ils atteignent. Chaque sommet de ces chemins est construit en échantillonnant une position sur la plus grande sphère inscrite dans le solide. (b) Lorsque le flux est connu aux bords du domaine (en vert), une variante de WoS consiste à décrire la température de paroi à partir de la température à une position à l'intérieur du volume ; provoquant un biais par l'introduction d'un paramètre numérique correspondant à une distance de réinjection  $\delta$ . (c) L'état de l'art consiste plutôt à construire des chemins à partir de domaines dits "étoilés", afin d'obtenir une solution bien moins biaisée.