

Titre du stage

DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES DE MONTE-CARLO AVANCÉES POUR LE CALCUL DES PERTURBATIONS : APPLICATION AUX PARAMÈTRES CINÉTIQUES

Internship title

DEVELOPMENT OF ADVANCED MONTE CARLO METHODS FOR PERTURBATION CALCULATIONS: APPLICATION TO KINETICS PARAMETERS

Type de sujet / Topic type*

- Développement de méthodes et de codes de calcul / Code development and algorithms

Contexte du stage

Le transport des neutrons dans le cœur des réacteurs nucléaires est décrit par l'équation de Boltzmann. La solution de cette équation par la **méthode de Monte-Carlo** se base sur la simulation d'un très grand nombre de trajectoires aléatoires de neutrons à l'intérieur du système considéré. Les moyennes sur l'ensemble des trajectoires simulées permettent d'accéder aisément aux observables physiques d'intérêt [1]. Chaque trajectoire décrit une marche aléatoire dont les propriétés mathématiques sont déterminées en accord avec les lois physiques sous-jacentes (probabilité d'interaction particule-matière, lois de renvoi en angle et énergie, multiplicité de fission, etc.) [1]. Par ces faits, la simulation Monte-Carlo a été toujours considérée – depuis son introduction – comme la méthode de référence pour le calcul des systèmes nucléaires [1]. Au CEA, la méthode de Monte-Carlo est mise en œuvre dans le code de transport TRIPOLI-4® [2], développé au Laboratoire de Transport Stochastique et de Données (LTSD) : ce code permet de simuler le transport des neutrons, des photons, des électrons et des positrons dans la matière et est par conséquent utilisé dans des domaines de la physique des cœurs, de la radioprotection et de l'instrumentation nucléaire. Grâce à la puissance croissante des ordinateurs, il devient envisageable d'utiliser la simulation Monte-Carlo pour les études de dimensionnement et les analyses de sûreté des réacteurs, ce qui requiert de pouvoir réaliser des **calculs de propagation d'incertitudes** fondées sur l'analyse de la variation d'un paramètre de l'équation de transport en réponse à la variation des propriétés physiques du système analysé (composition matérielles, sections efficaces, spectres de fission, etc.).

Internship context

The transport of neutrons in nuclear reactor cores is described by the Boltzmann equation. The solution of this equation by the **Monte Carlo method** is based on the simulation of a very large number of random trajectories of neutrons inside the considered system. The averages over all the simulated trajectories allow estimating physical observables of interest [1]. Each trajectory describes a random walk whose mathematical properties are determined in accordance with the underlying physical laws (probability of particle-matter interaction, laws of reference in angle and energy, multiplicity of fission, etc.) [1]. Therefore, the Monte Carlo simulation has always been considered - since its inception - as the reference method for the calculation of nuclear systems [1]. At CEA, the Monte-Carlo method is implemented in the transport code TRIPOLI-4® [2], developed at the Stochastic Transport and Data Laboratory (LTSD): this code makes it possible to simulate the transport of neutrons, photons, electrons and positrons in matter and is therefore used in the fields of reactor physics, radiation shielding and nuclear instrumentation. Thanks to the growing computer power, it is becoming possible to use Monte Carlo simulation for design studies and reactor safety analysis, which requires the ability to perform **uncertainty propagation calculations**: determining the variation of a parameter of the transport equation in response to the variation of the physical properties of the system (material composition, cross sections, fission spectra, etc.).

Description du sujet du stage

Ces études paramétriques sont réalisables via des **calculs de perturbation** qui permettent d'évaluer les effets de petites variations du système. Par exemple, selon la « *théorie standard des perturbations* » (SPT) l'estimation des perturbations de la réactivité du réacteur peut être calculée dès lors que le flux neutronique adjoint peut être estimé, ce qui se révèle une tâche fortement non-triviale. Récemment, l'avancée des méthodes Monte-Carlo a permis d'estimer le flux adjoint par le biais d'une approche dite *Iterated Fission Probability* et ainsi de mettre en œuvre les techniques de perturbation et de déterminer la variation de réactivité, au sein d'un unique calcul, due à une ou plusieurs perturbations des compositions des matériaux [3,4].

La théorie SPT est toutefois limitée aux perturbations de la réactivité. Or, on s'intéresse plus généralement aux effets induits par les variations des compositions matérielles du réacteur sur *d'autres paramètres critiques* de l'équation de Boltzmann, dans le cadre de la « *théorie généralisée des perturbations* » (GPT). Des méthodes de Monte-Carlo pour le calcul des quantités d'intérêt pour la GPT ont été très récemment proposées : ce sujet se situe à la pointe de la R&D dans le domaine de la simulation numérique.

Le stagiaire sera en charge **d'étendre les calculs de perturbations GPT** au cas des *paramètres cinétiques* (tels que la fraction β_{eff} de neutrons retardés, ou le temps de génération Λ_{eff}), qui revêtent une importance primordiale dans le contexte de la sûreté des réacteurs. Pour cela, le stagiaire pourra s'appuyer sur des nouvelles méthodes de calcul GPT récemment développées au LTSD [5]. Au préalable, une étude des équations des perturbations généralisées permettra de s'assurer de la cohérence de cette approche.

La nouvelle méthode proposée pour le calcul de la perturbation des paramètres cinétiques sera développée au sein d'un prototype de code Monte-Carlo, permettant ainsi de tester plus facilement différents choix d'implémentation, puis sera transposée au sein du code de référence TRIPOLI-4®. Enfin, une étape de validation du développement sera menée sur quelques cas tests représentatifs de configurations réelles de réacteurs nucléaires.

Internship topic description

These parametric studies can be carried out via **perturbation calculations**, which allow assessing the effects of small variations in the system. For example, according to the "*standard perturbation theory*" (SPT) the estimation of reactivity perturbations can be calculated as soon as the *adjoint* neutron flux can be estimated, which turns out to be a highly non-trivial task. Recent advances in Monte Carlo methods have made it possible to estimate the adjoint flux by means of an approach called *Iterated Fission Probability* and thus to implement the perturbation techniques and to determine the variation in reactivity, within a single calculation, due to one or more perturbations in the material compositions [3,4].

The SPT theory is, however, limited to the analysis of reactivity. However, we are more generally interested in the effects induced by variations in the material compositions on other critical parameters of the Boltzmann equation, within the framework of the "*generalized perturbation theory*" (GPT). Monte Carlo methods for calculating quantities of interest for GPT have just recently been proposed: this subject is at the forefront of R&D in the field of numerical simulation.

The student will be in charge of **extending the GPT perturbation calculations** to the case of *kinetic parameters* (such as the β_{eff} fraction of delayed neutrons, or the generation time Λ_{eff}), which are of paramount importance in the context of reactor safety. For this purpose, the student will build upon new GPT calculation methods recently developed at LTSD [5]. Beforehand, a study of the generalized perturbation equations will ensure the consistency of this approach.

The new method proposed for the calculation of the perturbation of the kinetic parameters will be developed within a prototype Monte Carlo code, thus allowing more easily testing different implementation choices, then

will be transposed within the reference code TRIPOLI-4®. Finally, validation will be carried out on a few test cases representative of real nuclear reactor configurations.

Bibliographie - Références / Bibliography - References

- [1] I. Lux, L. Koblinger, Monte Carlo particle transport methods (CRC press, 1990).
- [2] E. Brun et al, TRIPOLI-4®, CEA, EDF and AREVA reference Monte Carlo code, Ann. Nucl. Energy, 82, 151-160, 2015
- [3] B. Kiedrowski, Review of Early 21st-Century Monte Carlo Perturbation and Sensitivity Techniques for k-Eigenvalue Radiation Transport Calculations, Nucl. Sci. Eng. 185, 3, 2017
- [4] N. Terranova et al., New perturbation and sensitivity capabilities in TRIPOLI-4®, Ann. Nucl. Energy 121, 335–349, 2018
- [5] A. Jinaphanh, C. Carabajal, A. Zoia, Implementation and Testing of the GPT Sensitivities in TRIPOLI-4, Proc. Physor2022.

Ouverture éventuelle sur un sujet de thèse / Possible opening on a thesis proposal

Oui/Yes

Non/No

Profil du stagiaire

Master 2 ou 3^{ème} année école d'ingénieur : connaissances en informatique scientifique (C++, environnement Linux, Python, LaTeX) et en physique des réacteurs

Applicant profile

Master of Science or Engineering diploma : knowledge in scientific computing (C++, Linux OS, Python, LaTeX) and reactor physics

Localisation du stage / Internship location

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Centre de Saclay

DES/ISAS/DM2S/SERMA – Bât. 470

91191 Gif-Sur-Yvette Cedex

Personne(s) contact(s) / Contact person(s)

Nom : JINAPHANH

Prénom : Alexis

e-mail : alexis.jinaphanh@cea.fr

Téléphone : +33(0)1 69 08 62 75

Affiliation : DES/ISAS/DM2S/SERMA/LTSD

Nom : ZOIA

Prénom : Andrea

e-mail : andrea.zoia@cea.fr

Téléphone : +33(0)1 69 08 89 49

Affiliation : DES/ISAS/DM2S/SERMA/LTSD