

T05 : Développement de méthodes numériques pour la neutronique en milieu continu

Personnes contact : Davide MANCUSI, davide.mancusi@cea.fr ; tél. +33(0)1 69 08 78 72

DEN/DANS/DM2S/SERMA/LTSD

Andrea ZOIA, andrea.zoia@cea.fr ; tél. +33(0)1 69 08 79 76

DEN/DANS/DM2S/SERMA/LTSD

1. CONTEXTE

La méthode Monte Carlo est considérée comme la référence pour le calcul des propriétés neutroniques des réacteurs nucléaires. Elle est capable de traiter des géométries arbitrairement complexes sans introduire aucune approximation de discrétisation ; la physique du transport est prise en compte autant que permis par les données nucléaires élémentaires disponibles. Pour ces raisons, le Monte Carlo est la pierre angulaire du "réacteur numérique", le futur système de simulation intégré du comportement d'un réacteur nucléaire en conditions nominales et accidentelles.

Toutefois, un cœur de réacteur nucléaire est un objet complexe faisant intervenir des phénomènes physiques disparates, bien au-delà de la neutronique pure. Par exemple, les interactions et les contre-réactions entre la neutronique, la thermique du combustible et la thermohydraulique du caloporteur sont cruciales pour garantir la stabilité du cœur. De plus, le flux de neutrons dans le cœur active et modifie les compositions des matériaux irradiés, qui à leur tour rétroagissent sur le transport des neutrons.

Les exemples cités ont un point commun : pour prendre en compte finement les phénomènes de contre-réaction, il est nécessaire de résoudre un problème de transport neutronique dans un milieu où les propriétés locales (température, concentrations, densité) changent de façon continue. La méthode Monte Carlo, traditionnellement, fait l'hypothèse que les propriétés du milieu soient homogènes à l'intérieur d'un volume ; les changements ne sont permis qu'au passage d'un volume à un autre. Pour traiter correctement les contre-réactions, la méthode nécessite d'être adaptée. En l'état, le Monte Carlo ne peut pas atteindre la simulation d'un cœur à pleine puissance.

2. SUJET PROPOSÉ

L'objectif de cette thèse est de concevoir et explorer des algorithmes permettant de simuler le transport des neutrons dans un milieu continu. Parmi les approches proposées en littérature, il convient de citer au moins le **delta tracking**. Cette méthode, introduite par Woodcock dans les années '60 [1] et développée ultérieurement par d'autres [2,3], permet de réaliser le transport dans un milieu continu sans avoir à intégrer numériquement le chemin optique le long de la trajectoire. Le prix à payer est un surnombre de collisions fictives qui n'influencent pas l'état de la particule.

Une autre technique pertinente pour le problème du transport de particule en milieu continu est l'utilisation d'expansions fonctionnelles des réponses [4,5], qui lissent les encaissements de la simulation Monte Carlo en les projetant sur une base opportune de fonctions élémentaires. Une expansion fonctionnelle bien adaptée est capable de limiter la perturbation introduite par le bruit stochastique caractéristique du Monte Carlo ; pour cette raison, l'utilisation de ces méthodes est souvent proposée pour les couplages entre la neutronique Monte Carlo et des solveurs d'autres physiques (thermohydraulique, thermomécanique, etc.).

Le travail envisagé portera sur le développement des algorithmes identifiés dans un code de simulation simplifié, en C++ ou autre langage équivalent. Les algorithmes seront évalués vis-à-vis de leur performance (temps de calcul) et des approximations qu'ils introduisent. Pour les algorithmes plus performants, on pourra envisager l'intégration dans TRIPOLI-4® [6], le code Monte Carlo de transport de particules

développé par le SERMA (unité d'encadrement). Le but ultime est la simulation d'un système réel (par exemple un petit réacteur de recherche) avec prise en compte fine des contre-réactions thermiques.

3. PROGRAMME DE TRAVAIL PROPOSÉ

Le travail de thèse sera structuré autour des étapes suivantes :

- 3.1. Étude bibliographique de la méthode du *delta tracking* et de ses variantes ; étude des techniques d'expansion fonctionnelle des réponses.
- 3.2. Implémentation de la méthode du *delta tracking* dans une maquette de transport Monte Carlo simplifié, par exemple pour le transport monocinétique en géométrie élémentaire. Raffinement progressif de la méthode ; parallèlement, raffinement progressif de la physique du transport implémenté dans la maquette ; évaluation des bénéfices des différentes approches. Vérification de la méthode.
- 3.3. Couplage de la maquette à un modèle de thermohydraulique simplifiée ; mise en place d'une boucle de contre-réactions.
- 3.4. Implémentation dans la maquette de l'encaissement sur des expansions fonctionnelles. Étude de l'influence sur le couplage avec la thermohydraulique simplifiée.
- 3.5. Si compatible avec l'avancement de la thèse, intégration des algorithmes plus performants (delta tracking, expansions fonctionnelles) dans TRIPOLI-4® et démonstration de principe des nouvelles méthodes par la simulation d'un système complexe (par exemple un petit réacteur de recherche).

4. RÉFÉRENCES

- [1] Lux et Koblinger, "Monte Carlo particle transport methods: neutron and photon calculations", CRC Press (1991).
- [2] Leppänen, Ann. Nucl. Energy 37 (2010) 715.
- [3] Galtier et al., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 125 (2013) 57.
- [4] Beers et Pine, IEEE Trans. Nucl. Sci. 23 (1976) 1850.
- [5] Griesheimer et al., J. Comput. Phys. 211 (2006) 129.
- [6] Brun et al., Ann. Nucl. Energy 82 (2015) 151.