

La neutronique, ses succès et les défis qui l'attendent

À la fin de cette monographie, il paraît approprié de prendre du recul pour analyser l'état de la discipline neutronique, revenir sur ses succès et regarder les défis qu'elle aura à relever.

À l'origine simple rameau de la physique nucléaire, la neutronique est très vite devenue une branche autonome de la physique. Comme on l'a vu plus haut, ses applications sont nombreuses et variées, touchant les différents aspects de la physique des réacteurs et du cycle du combustible, de l'instrumentation nucléaire, de la sûreté-criticité et de la radioprotection. La neutronique est indispensable à l'industrie nucléaire, pour la conception, le pilotage et la démonstration de sûreté de ses installations. Elle est devenue une science suffisamment mûre pour participer non seulement à une modélisation, mais à une véritable simulation desdites installations. Cette maturité, concrétisée par le développement de codes de calcul neutroniques développés au CEA et utilisés par les industriels, ne signe pas la fin des travaux : de nombreux défis attendent encore les neutroniciens, avec à la clé des progrès importants.

La simulation neutronique : nécessairement multi-échelle

Le phénomène élémentaire de la neutronique est la réaction nucléaire. Le libre parcours moyen des neutrons dans la matière dépend énormément de leur énergie, celle-ci pouvant varier sur plus de dix ordres de grandeur dans le cœur d'un réacteur nucléaire. Ceci rend nécessaire de décrire les phénomènes neutroniques sur une très large gamme d'échelles d'espace. Un des grands défis de la neutronique réside dans la gestion de ces différentes échelles d'espace et d'énergie. Les méthodes développées sont remarquablement ingénieuses et efficaces. En décrivant les phénomènes par emboîtement d'échelles, *via* une approche « multi-échelle » en énergie et en espace, où la description microscopique du système fournit les données pour une description plus macroscopique, la neutronique a donné l'exemple pour une approche « multi-échelle » appliquée à d'autres disciplines.

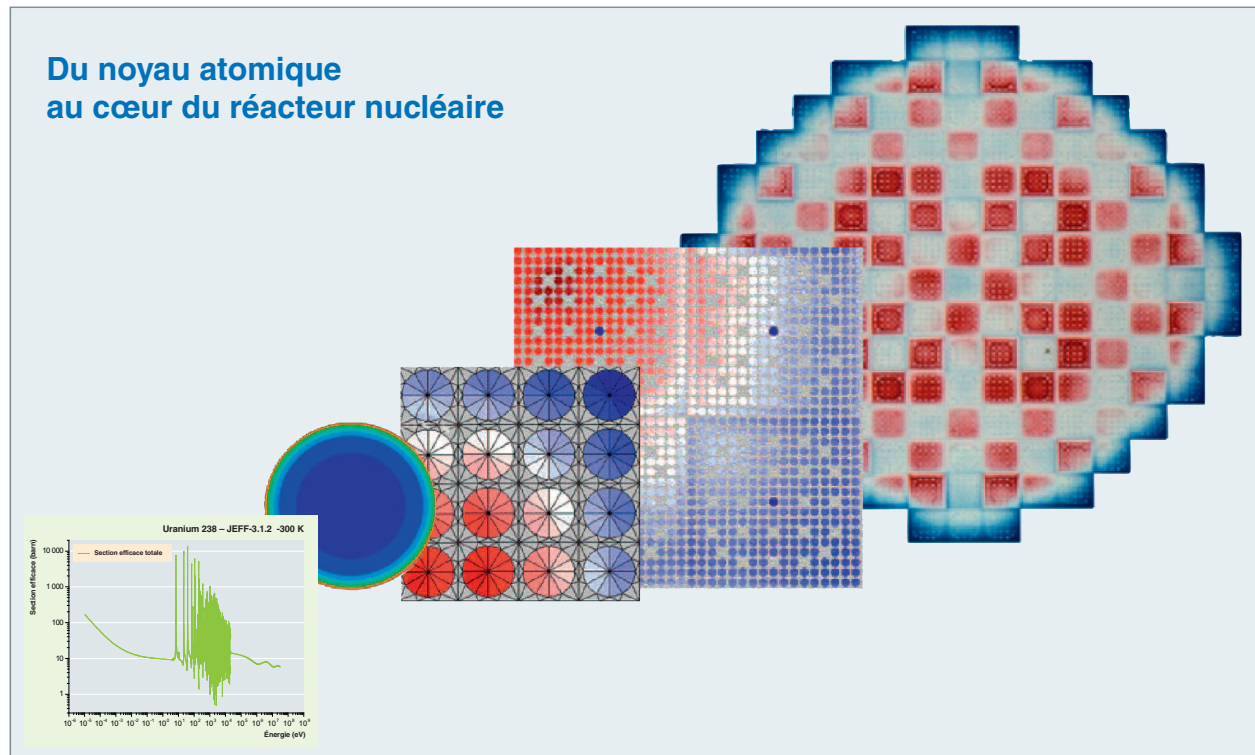


Fig. 179. Description multi-échelle du comportement neutronique d'un réacteur nucléaire.

Coupler la neutronique aux autres disciplines

Les systèmes nucléaires sont des systèmes complexes, mettant en jeu de nombreux phénomènes physiques couplés, ce qui rend nécessaire de les décrire ensemble, *via* une approche « multiphysique », à laquelle de nombreuses disciplines de la physique viennent concourir. Un des défis de la neutronique pour le futur est de systématiser son couplage avec les autres disciplines, en particulier la thermohydraulique et la thermomécanique.

Vers la simulation directe à 3+1 dimensions

Aujourd'hui, les calculs neutroniques déterministes de cœurs de réacteurs sont encore faits en deux étapes combinant des calculs à deux et trois dimensions, pour des raisons de temps de calcul. L'augmentation des capacités de calcul rend désormais possible des calculs directs à trois dimensions (sans étape d'homogénéisation), sur des maillages à plus de dix millions de mailles. Le CEA accompagne cette évolution en développant le code APOLLO3®. De nombreux concepts de réacteurs à gros cœurs ou à cœurs très hétérogènes bénéficieront pleinement de ces avancées. En outre, la prise en compte simultanée de l'aspect spatial et temporel dans une approche à 3+1 dimensions de l'évolution neutronique d'un cœur reste un défi important, ouvrant la voie à la simulation détaillée des phénomènes transitoires.

Quel statut pour la simulation Monte-Carlo ?

Une des spécificités de la neutronique est le développement et le succès des codes Monte-Carlo. Grâce à la finesse de la simulation qu'ils permettent (à condition d'y mettre le prix en temps de calcul !), ces codes servent de codes de référence, et leurs résultats ont un statut hybride entre un résultat de calcul et un résultat expérimental. Il sera intéressant de voir comment évolueront les codes stochastiques et les codes déterministes. L'accroissement exponentiel de la puissance de calcul étend l'utilisation des codes Monte-Carlo. À cet effet, le CEA développe le code TRIPOLI-4®. Pour autant, ces codes ne remplaceront peut-être pas de sitôt les codes déterministes, beaucoup plus légers et plus facilement utilisables pour des études paramétriques.

Plutôt que de les percevoir comme des outils concurrents, il est intéressant de mettre en relief les synergies possibles entre les deux familles de codes. À titre d'illustration, un code déterministe peut fournir un moyen d'accélérer significativement une simulation Monte-Carlo. Inversement, une simulation Monte-Carlo peut servir d'outil d'élaboration de données d'entrée homogénéisées et/ou condensées requises pour les codes déterministes.

La synergie entre simulation et expérience

Avec le développement de la simulation, le statut de l'expérience change : elle devient expérience de validation ou de détermination de données de base, et il peut alors s'agir d'expériences conçues pour isoler un effet particulier. Les expériences globales sur systèmes complets, beaucoup plus lourdes et chères, peuvent alors être réduites, mais probablement pas complètement supprimées. Les maquettes critiques ÉOLE, MINERVE et MASURCA dont dispose encore le CEA restent des outils précieux.

Maîtriser les incertitudes

Un des grands défis de la simulation du comportement de systèmes complexes consiste à savoir évaluer les incertitudes, celles-ci pouvant provenir d'incertitudes sur les données initiales, sur le modèle lui-même, ou sur la résolution de ses équations constitutives. La neutronique n'échappe pas à la règle : gagner de la précision, c'est gagner des marges à la conception et à l'exploitation des réacteurs. C'est aussi progresser dans le domaine de la sûreté et de la radioprotection. Le couplage entre disciplines (neutronique, thermohydraulique, thermomécanique) ajoute un degré de complexité à la problématique de la propagation des incertitudes.

Améliorer les données nucléaires

Les gains en exactitude et précision pour les futurs calculs neutroniques « de référence » viendront en grande partie de l'amélioration des données nucléaires. En effet, même si les codes Monte-Carlo sont de bons candidats pour acquérir le statut de code de référence en neutronique, leurs résultats ne seront bons que si les données nucléaires de base qui les alimentent sont précises.

Il y a un défi spécial dans l'assimilation des données nucléaires, qui tient au caractère très divers des expériences qui donnent accès à ces données : il s'agit d'intégrer sous forme de données validées des informations issues d'expériences aussi différentes que des mesures de sections efficaces différentielles sur des spectromètres et des mesures de bruit neutronique ou des résultats d'expériences d'oscillations sur des maquettes critiques. Les premières ont un statut de données brutes, et sont assimilables pratiquement telles quelles ; les secondes demandent un modèle pour être assimilées. D'autre part, la théorie microscopique des réactions nucléaires fournit un guide de plus en plus précis pour l'évaluation des données nucléaires. Comment utiliser toutes ces données en perdant un minimum d'information ? Il y a là une vraie difficulté méthodologique qui n'est pas encore totalement résolue.

Nonobstant, la communauté des neutroniciens a su se doter des structures adéquates pour construire quelques bases de données standardisées, fédératives et dont la qualité est garantie par un processus robuste d'évaluation par des experts. En particulier, le CEA est un acteur essentiel de la construction de la base européenne JEFF3, qui peut servir d'exemple pour la construction de bases de données similaires dans d'autres domaines scientifiques et techniques.

Des plates-formes pour la simulation

Le recours aux simulations numériques a toujours été une composante incontournable de la conception et de la démonstration de sûreté des installations nucléaires. C'est une nécessité issue du constat que certaines expériences, notamment celles portant sur la sûreté des réacteurs, ne peuvent être réalisées en vraie grandeur. Le CEA s'est fait une spécialité de ces simulations numériques, en tout premier lieu dans le domaine de la neutronique. Les codes de calcul et les bases de données associées capitalisent, en effet, la connaissance accumulée au fil du temps sur la modélisation des systèmes. La conception des grands logiciels de calcul est longue et complexe. Elle fait appel à un très grand nombre de compétences : physiciens, expérimentateurs, numériciens, informaticiens, mathématiciens... La simulation a longtemps consisté à développer des codes de calcul globaux dédiés à la description d'un phénomène physique ou d'un processus particulier. Depuis une dizaine d'années, il est apparu fructueux de subdiviser le calcul en modules génériques, et de grouper ces modules et les bases de données qui les nourrissent dans des plates-formes, qui permettent de les mettre en communication, les sorties des uns pouvant servir d'entrées à d'autres. Ce nouveau paradigme de la simulation *via* des plates-formes logicielles a ouvert la voie à la simulation multiphysique et multi-échelle, et a élargi son domaine d'utilisation. La neutronique, qui a été une discipline pionnière dans la construction des plates-formes de simulation, rentre pleinement dans ce cadre, concrétisé au CEA par la construction de la plate-forme SALOMÉ.

Les codes de calcul ont une durée de vie bien supérieure à celle des ordinateurs sur lesquels ils tournent : étant donné le temps de développement des codes, et leur durée d'utilisation qui peut s'échelonner sur vingt à trente ans, il est impératif de bien anticiper les besoins qu'ils devront couvrir, et l'évolution des machines informatiques sur lesquelles ils seront utilisés. C'est pourquoi les codes majeurs de neutronique développés au CEA-DEN doivent être considérés comme des investissements à long terme, au même titre que ceux pour des installations expérimentales.

Simulation numérique et calcul haute performance

Comme on l'a vu tout au long de cette monographie, le calcul haute performance (HPC*) a permis un bond en avant de la discipline neutronique. Il a fallu pour cela relever un défi : celui de l'adaptation des codes de calcul. Cette adaptation de l'architecture logicielle est indispensable pour utiliser pleinement la puissance des supercalculateurs.

Pour développer et mettre en œuvre les plates-formes de simulation, les équipes du CEA-DEN ont à leur disposition des supercalculateurs ou des réseaux de calculateurs parmi les plus puissants d'Europe. En effet, pour effectuer leurs simulations les plus voraces en puissance de calcul, elles ont accès à l'ensemble des moyens informatiques du TGCC (Très Grand Centre de Calcul) exploité par le CEA-DAM : le CCRT* du CEA et Curie, machine pétaflopique financée par GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif).

L'utilisation de ces outils est structurée dans le cadre de réseaux ou centres d'excellence dans lesquels le CEA joue un rôle majeur. On peut citer par exemple la Maison de la simulation, laboratoire commun CEA-CNRS-INRIA-Université de Paris-Sud-Université de Versailles Saint-Quentin, centre d'excellence multidisciplinaire à même de relever les défis du calcul intensif.

Ces calculateurs et les structures associées sont en passe de permettre le développement d'outils de type « réacteur numérique » ou « usine numérique » pour une évaluation extrêmement rapide de l'impact sur une installation d'une modification d'un choix de conception ou d'une donnée d'entrée. Les neutroniciens ont un rôle crucial dans ce programme certes de longue haleine, mais extrêmement exaltant pour les chercheurs du CEA.

Bernard BONIN
Direction scientifique

