

Contribution aux exercices de prospective 2020-2030
Contribution to the 2020-2030 prospective reflection

Energie nucléaire et environnement
Nuclear energy and environment

1) Aperçu / Overview

Thème de recherche proposé : **physique des réacteurs**

Axe principal concerné (**voir la liste des thèmes en fin de document**) : modélisation système, neutronique, cinétique, couplage multiphysique et multi-échelle – expériences validations/qualifications

Contributeur(s) (et affiliations) de la proposition :

Proposition's author(s) and affiliations:

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, CNRS-IN2P3/Université Paris Sud : X. Doligez, M. Ernoult, ...

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, IN2P3-CNRS/Université Grenoble Alpes : A. Bidaud, A. Billebaud, N. Capellan, S. Chabod, V. Ghetta, A. Nuttin, P. Rubiolo

Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, ENSICAEN/Université de Caen/CNRS-IN2P3 : J. –L. Lecouey, F.-R. Lecolley, G. Lehaut, N. Marie

Laboratoire de physique Subatomique et des technologies associées (SUBATECH) IMT Atlantique/CNRS-IN2P3/Université de Nantes : L. Giot, N. Thiollière

Email du contact de la proposition :

E-mail of the corresponding author:

doligez@ipno.in2p3.fr

Résumé (500 caractères max., incluant les espaces) :

Nous proposons l'objectif d'une plateforme numérique qui intégrerait l'ensemble des modèles neutroniques développés par l'IN2P3 pour la physique des réacteurs (neutronique, thermohydraulique et thermomécanique), renforcée par un programme expérimental de validation auprès notamment du réacteur VENUS (SCK-CEN) et de la plateforme FEST* (LPSC) pour repousser les limites des modélisations. Cet environnement numérique commun permettrait de pérenniser l'ensemble de notre savoir-faire en mettant à disposition des modèles élémentaires pour l'étude des systèmes nucléaires quels qu'ils soient, et d'ainsi de capitaliser les acquis pour explorer les différents concepts d'intérêt pour l'avenir ou les systèmes en cours d'exploitation.

*Fluid Experiments and Simulations in Temperature

2) Description de la question/problématique scientifique rattachée au thème (1 page) / *Description of the scientific issue connected to the topic (1 page)*

La modélisation des phénomènes physiques pour comprendre et prédire les différentes propriétés des réacteurs nucléaires reste un enjeu de recherche et développement fort. A titre d'exemple, notons que les grands industriels Français (CEA, EDF et Framatome) développent aujourd'hui une nouvelle chaîne de calcul intégrant des modèles physiques qui peinent à reconstruire les observations expérimentales faites sur l'EPR alors que ce dernier n'est qu'une évolution des REP actuels. Dans un contexte où les choix énergétiques sont complexes et le développement de nouveaux systèmes nucléaires mouvant, des outils dédiés à un système unique n'apparaissent plus comme une stratégie soutenable.

Après une appropriation des problématiques nucléaires autour des déchets nucléaires, des études systèmes, et des scénarios, l'IN2P3 s'est consacré à des études plus poussées sur des propositions innovantes (les ADS pour la transmutation des actinides mineurs, les RSF pour les réacteurs de 4^{ème} génération et l'utilisation de thorium dans des systèmes à eau). Grâce à son ancrage en recherche fondamentale et son expertise acquise depuis plus de vingt ans au service de ces systèmes innovants, notamment dans de nombreux projets européens (PDS-XADS, MUSE, EUROTRANS-IP, EVOL, FREYA, SAMOFAR, MYRTE, ...) et grâce à ses collaborations nationales et internationales (CEA, IRSN, EDF, IPM, Polemi, Polytechnique Montréal, ...), l'IN2P3 maîtrise les modèles neutroniques et connaît les limites des différents solveurs intégrés dans les chaînes de calculs industrielles. Il peut ainsi proposer une approche qui fait parfois (souvent ?) défaut dans l'ingénierie nucléaire.

L'objectif de recherche proposé aujourd'hui permettra de capitaliser et pérenniser les avancées réalisées à l'IN2P3 depuis plus de vingt ans. Il ouvre une nouvelle ère pour nos travaux dans la décennie à venir et donnera les moyens d'étudier des systèmes variés. Cette nouvelle structuration permettra de favoriser les collaborations avec des industriels et des organismes de recherche.

Par essence la recherche académique s'efforce de comprendre les processus physiques pour proposer de nouveaux modèles performants. Au-delà des efforts des équipes de l'IN2P3 pour les transcrire sur le plan numérique, elles ont conduit des expériences liées à la mesure de sous-criticité des ADS auprès du réacteur de recherche VENUS-F couplé à l'accélérateur GENEPI-3C ainsi que des expériences de transferts thermiques auprès des installations FFER et SWATH de la plateforme FEST qui ont permis d'améliorer les modélisations physiques « unitaires » des réacteurs. A titre d'exemples, les expériences sur réacteur ont permis d'initier les calculs de décompositions modales avec des méthodes Monte-Carlo qui pourraient être utilisés pour les réacteurs de puissance. Les études de la solidification de sels fondus ont permis quant à elles de valider les modélisations du transfert thermique et de proposer des outils de modélisation multi-physique, nécessaires pour les études de transitoires ou d'accident. Ces nouveaux modèles enrichissent les connaissances et l'expertise de l'IN2P3 sur la simulation des réacteurs. Notons également que les développements d'outils numériques et leur validation via des comparaisons code à code ou des benchmarks nous ont déjà permis d'étudier l'évolution du combustible et les transitoires typiques de la sûreté de plusieurs systèmes, notamment de SMR chargé au thorium.

Les 10 prochaines années pourraient permettre un programme de recherche dédié d'une part à l'amélioration des modèles développés par l'IN2P3 et à la pointe en physique des réacteurs (validation expérimentale comprise), et d'autre part à la rationalisation des efforts

de développement numérique en intégrant l'ensemble des modèles au sein d'un *framework* numérique commun. Un programme expérimental associé proposerait des expériences qui permettraient de tester la validité des modèles. Par exemple, l'étude expérimentale de la cinétique de la nappe de flux via des mesures de traverses dynamiques permettrait d'améliorer les modèles de cinétique et de quantifier les améliorations à apporter en comparaison avec des modèles moins sophistiqués (comme par exemple les méthodes des *Iterated Fission Matrix*, la méthode dite *SP3* et la cinétique nodale, utilisées à l'IN2P3). L'étude expérimentale de la cinétique est rendue possible ici grâce au couplage du réacteur VENUS avec l'accélérateur GENEPI dont un upgrade pour disposer d'une source pulsée plus intense reste possible si nécessaire. Les modélisations multiphysiques pour les réacteurs, incluant des outils sophistiqués tels que la CFD, doivent aussi profiter d'un programme expérimental adéquat. Une partie de ces validations pourront ainsi être effectuées dans les expériences de la plateforme FEST. Les modèles développés doivent être intégrés dans des codes plus complets et comparés aux standards internationaux pour quantifier les apports des efforts de recherche de l'IN2P3. L'utilisation dans ces développements des nouvelles techniques telles que le Machine Learning est aussi possible. Cette approche a été explorée dans la construction de métamodèles d'évolution du combustible pour les études de scénarios et est à explorer pour des modélisations plus fondamentales.

L'ensemble de ces outils numériques formalisés par une plateforme numérique commune, permettra de mener des études appliquées à des systèmes très variés comme par exemple le design de réacteurs innovants (comme ceux dédiés à la propulsion spatiale par exemple), la recherche d'optimum dans la gestion de réactivité pour les SMR ou pour l'étude des réacteurs d'Oklo, ou encore les calculs d'erreurs ou de biais dans les réacteurs de puissance actuels. L'intégration des calculs de sensibilités et d'incertitudes pour chacun des modèles rendra possible l'approche « design by uncertainty » qui permettra d'améliorer grandement la stabilité et la vitesse des simulations nécessaires à l'interprétation des expériences et aux calculs couplés. Il a également été prouvé que les modules de calculs de sensibilités des codes de transport pouvaient être détournés pour concevoir algorithmiquement des dispositifs nucléaires optimaux. Enfin, l'uniformisation de nos outils au sein d'un même objet aura aussi pour conséquence de renforcer la visibilité et l'expertise de l'IN2P3 comme acteur de la recherche sur l'énergie nucléaire.

L'objectif de recherche proposé s'appuie en grande partie sur des compétences déjà à l'œuvre au sein des différents laboratoires signataires. Il offre l'opportunité d'une mise en commun des outils et d'une réflexion cohérente sur les efforts à déployer tant sur le plan de la modélisation que sur sa validation expérimentale. Cette plateforme s'enrichira également au gré des études menées sur les différents systèmes d'intérêt dans nos équipes.

Merci d'indiquer le positionnement des objectifs dans l'état de l'art (échelle internationale), les liens avec des projets existants et/ou futurs, la pertinence du cadre académique dans la question abordée.

Please include description of motivation against (international) state-of-the-art, as well as links to other projects (existing or foreseen), relevance of the academic frame for the issue suggested.

Collaborateurs (personnes ou organismes) identifiés ou potentiels (dans et hors IN2P3) : CEA, SCK-CEN, IRSN, Industriels,...

Instruments/Outils impliqués : Réacteur VENUS (SCK-CEN) couplé à l'accélérateur GENEPI-3C, plateforme FEST (LPSC), Grille de calcul, codes MCNP, SERPENT, SMURE,

3) Suggestion de projet(s) pouvant répondre à la question/problématique proposée (1 page max.) / *Suggestion of project(s) addressing the issue proposed (1 page max)*

- Construction de la plateforme numérique. Ce projet doit permettre de regrouper l'ensemble des modèles développés et utilisés dans les différents projets au sein d'une même structure numérique. Un effort d'uniformisation des langages informatiques est une première étape indispensable. Le développement de modules communs (description de la géométrie, maillage, gestions des données, ...) sera aussi nécessaire. Pour ce faire, et pour le maintien de la plateforme, un renfort informatique est indispensable. Parmi les modules à développer/renforcer, on peut citer :
 - Décomposition modale en Monte-Carlo
 - Théorie des perturbations généralisée
 - Calcul de la puissance résiduelle
 - Modèles neutroniques des réflecteurs
 - Modélisation multi-physique pour les accidents
- Traverses dynamiques sur le réacteur VENUS. Programme expérimental auprès du réacteur VENUS permettant d'étudier la cinétique neutronique dans des conditions innovantes afin de confronter les nouveaux modèles aux expériences. Ce programme est conditionné à l'accès au réacteur (quelques mois d'expériences au minimum) et à l'instrumentation du cœur (petites chambres à fission U-235 et U-238 pour différencier les neutrons rapides des thermiques à insérer dans des assemblages). Un upgrade de l'accélérateur pour une source de neutrons plus intense est potentiellement à envisager en fonction du temps d'accès au réacteur pour atteindre une statistique suffisante.
- Modélisation et expériences des caloporteurs innovants pour le nucléaire. Ce projet continuera les efforts actuels pour l'amélioration de la modélisation et le développement d'expériences pour les caloporteurs à hautes températures (tels que les sels fondus ou les métaux liquides) proposés pour des réacteurs de génération IV ou pour des applications énergétiques ou médicales.
- Design by uncertainty. Le rapprochement de la physique des réacteur à celle de la physique des données nucléaires (via les nouvelles méthodologies GPT) permet d'envisager un renversement complet d'une situation où les sensibilités et incertitudes ne seraient plus calculées « a posteriori » dans une étape supplémentaire, lourde en calculs et mémoires, mal connectée à la physique des incertitudes « fondamentales » mais directement intégrées dans l'interprétation des expériences et les calculs couplés ce qui permettrait d'en améliorer la stabilité et la vitesse.
- WaThSNext : Water ways to Thorium for a Short-term competitive Next generation. Les pistes d'étude par simulation de petits cœurs refroidis à eau (lourde ou légère) et chargés en thorium, qui soient compétitifs pour venir compléter le parc des REP actuels et gérer le plutonium par transition au cycle thorium, sont innombrables. Outre la recherche de nouveaux modes de gestion de la réactivité (via par exemple l'ajout d'eau légère dans de l'eau lourde), on peut citer le recours à de nouveaux types de gaines ou à des crayons annulaires autorisant des niveaux de puissance plus élevés.

Toutes ces évolutions réalistes pourront être évaluées globalement et par les mêmes outils académiques dans le cadre du projet WaThSNext, de façon à donner une image plus précise du potentiel encore inexploité de la filière eau vis-à-vis des contraintes futures et idéalement à faire des recommandations.

- Propulsion nucléaire dans l'espace. Ce projet s'appuie sur l'expertise de l'IN2P3 sur les réacteurs de quatrième génération. L'objectif est de proposer de nouveaux concepts de réacteur de propulsion nucléaire dans l'espace permettant de dépasser les verrous actuels de cette technologie. Dans un premier temps, ce projet devrait aboutir d'ici 4-5 ans sur un concept de réacteur à sel fondu utilisant un mode de propulsion électrique. Des collaborations avec d'autres laboratoires du CNRS et des partenaires étrangers sont déjà initiées.

*Indiquer si possible l'envergure qu'auraient ce ou ces projets (manpower, budget, durée).
Indicate if possible the scale of this(these) project(s) (manpower, budget, duration).*

*

Merci de renvoyer ce document à prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr avant le

1er Novembre 2019

Please send this document to prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr before

November 1st, 2019

Liste des thèmes

- Physique des réacteurs : modélisation et expérimentation, neutronique, thermohydraulique, couplage multi-physique, acquisition de données de base (sections efficaces, évaluation des données nucléaires, données de thermohydraulique), physique de la sous-criticité, études de scénarios, ouverture interdisciplinaire : approche technico-socio-économique (prix, coût, ressources, ...). Application aux réacteurs actuels et innovants, études de scénarios...
- Radiochimie des matières nucléaires : données de base (spéciation, interaction avec ligands), compréhension des processus de dissolution, de séparation, processus de diffusion, modélisation. Application au traitement des combustibles usés, processus de dissolution et d'extraction, conditionnement des radionucléides, diffusion des radionucléides dans un site de stockage (matériaux, barrière, argile)...
- Irradiation des matériaux nucléaires : compréhension des processus d'endommagement par les ions et neutrons, acquisition de données de base, modélisation. Application aux matériaux de structures et combustible, tenue des déchets nucléaires à l'irradiation, impact de l'irradiation dans les gisements...
- Radioactivité et environnement : acquisition de données de base (spéciation, ligands), modélisation, processus de transferts, mesures de très basses radioactivités. Application au comportement des radionucléides dans le biotope, microorganismes, exploration de procédés de remédiation.

Research topics :

- Reactor physics : modelling and experimentation, neutronics, thermohydraulics, multi-physics coupling, basic data acquisition (cross sections, evaluation of nuclear data, thermohydraulics data), subcriticality physics, scenario studies, interdisciplinary activities : technical-socio-economic approach (price, cost, resources, etc.). Application to current and innovative reactors, scenario studies....
- Radiochemistry of nuclear materials : basic data (speciation, interaction with ligands), understanding of dissolution, separation, diffusion processes, modelling. Application to the treatment of spent fuels, dissolution and extraction processes, conditioning of radionuclides, diffusion of radionuclides in a storage site (materials, barrier, clay)...
- Irradiation of nuclear materials : understanding of ion and neutron damage processes, basic data acquisition, modelling. Application to structural and fuel materials, resistance of nuclear waste to irradiation, impact of irradiation in deposits...
- Radioactivity and environment : acquisition of basic data (speciation, ligands), modelling, transfer processes, measurements of very low radioactivity. Application to the behaviour of radionuclides in the biotope, microorganisms, exploration of remediation processes.