**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 : Réacteur nucléaire de fission de 4ème génération à combustible liquide

*Research topic of the proposition: Generation 4 Fission Nuclear Reactor based on a Liquid Fuel*

*Main research topic (****see the list of research topics at the end of this document****):*

Axe principal concerné (**voir la liste des thèmes en fin de document**) : Physique des réacteurs, données nucléaires et chimie associées

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

*Proposition’s author(s) and affiliations:*

Elsa Merle et Daniel Heuer (CNRS/IN2P3/LPSC), Sylvie Delpech (CNRS/INC/IPNO), Lydie Giot (CNRS/IN2P3/Subatech)

Email du contact de la proposition : merle@lpsc.in2p3.fr

*E-mail of the corresponding author:*

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

*Summary (500 characters maximum, including spaces):*

Le concept MSFR, axé sur la sûreté intrinsèque et la réduction des déchets, est étudié depuis 15 ans au CNRS dans un cadre européen. Ce réacteur est basé sur un combustible liquide circulant, nécessitant le développement de méthodologies, validations expérimentales, bases de données et outils de simulation innovants pour réaliser des études de physique, chimie, sûreté et conception. Le MSFR a été sélectionné en 2008 par le forum international Génération 4 comme réacteur à sel fondu de référence.

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

Les réacteurs à sels fondus (RSF) sont un des six candidats retenus par le forum international Génération IV de la DOE en tant que concepts prometteurs pour les réacteurs nucléaires du futur. En plus des 3 partenaires initiaux (Euratom, France et USA), 3 nouveaux pays (Russie, Suisse, Chine) ont annoncé qu’ils travailleraient sur ce type de réacteur et ont rejoint depuis 3 ans le comité de pilotage RSF de ce forum. La France, à travers le CNRS (via le programme interdisciplinaire français autour du nucléaire NEEDS), l’IN2P3 et plus particulièrement l'équipe MSFR du LPSC de Grenoble, le groupe radiochimie de l'IPN d'Orsay et l’équipe structure et énergie nucléaire de Subatech s’intéressent aux RSF couplés initialement au cycle du combustible Thorium mais étudiés depuis 2018 également dans l’autre cycle du combustible existant (cycle U/Pu).

Ces réacteurs à sels fondus ont comme principale caractéristique d’avoir un combustible sous forme liquide, un sel fondu fluorure ou chlorure, ce combustible jouant aussi le rôle de caloporteur. Ces caractéristiques lui apportent des avantages très intéressants au niveau de la sûreté et de l’incinération des déchets nucléaires. Notre projet concerne plus précisément le développement du concept de RSF nommé Molten Salt Fast Reactor (MSFR), connu comme le « réacteur du CNRS » (cf base ARIS de l’AIEA ou encore les rapports annuels du GIF), basé sur un spectre neutronique rapide et porté par le CNRS au niveau national, européen (nouveau projet SAMOSAFER du programme H2020 lancé les 8-9 octobre 2019) et mondial (forum international génération 4, agence internationale de l’énergie atomique).

Dans ce contexte, la particularité de l'IN2P3 est d'avoir des installations uniques et des compétences en chimie des sels fondus qui permettent de tester au stade laboratoire la réactivité des sels fondus sélectionnés comme candidats pour constituer le combustible des RSF. Ces installations, situées à Orsay, ont été financées en 2005-2006 par le programme de recherche CNRS PACEN et permettent de travailler avec le combustible réel, en laboratoire "actif", et d'étudier sa réactivité en cas d'accident grave tel que le contact sel/eau ou sel/air. Ces installations permettent également de réaliser la séparation/extraction des éléments dissous dans le combustible liquide afin de proposer des schémas de traitement du combustible, traitement qui est nécessaire pour récupérer la matière fissile d'un réacteur surgénérateur et pour diminuer la radio-toxicité des déchets ultimes.

Le positionnement à l’IN2P3 d’équipes travaillant à la fois en recherche fondamentale et appliquée lui permet également d’identifier de nouveaux besoins en termes de mesures de données nucléaires pour de tels concepts innovants. Par exemple, dans les dix dernières années, un effort particulier a d’abord été porté sur l’estimation de la puissance résiduelle pour les réacteurs actuels et le cycle U/Pu. Des calculs de puissance résiduelle de pulse de fission du 239Pu induite par des neutrons thermiques ont montré que de nouvelles mesures spectroscopiques de sept produits de fission contributeurs importants et dont les schémas de décroissance étaient mal connus amélioraient considérablement l’estimation de la puissance résiduelle de la fission thermique du 239Pu, point clé des études de sûreté. Ces mesures de spectroscopie qui ont été réalisées auprès de l’accélérateur de Jyväskylä par la collaboration TAS (Espagne, France, Royaume Uni) ont depuis été incluses pour la plupart dans la base de données JEFF3.3 et ont également fait l’objet d’articles dans Physical Review Letters. Le but est maintenant d’étendre ce travail d’identification des produits de fission importants contributeurs à la puissance résiduelle, et qui nécessitent de faire l’objet de nouvelles mesures avec la technique TAS au concept MSFR en cycle Th/U et U/Pu.

Les résultats de nos études basées sur diverses disciplines telles la physique des réacteurs, la chimie, les données nucléaires, les sciences des matériaux et de l'ingénieur, la sûreté et l’analyse de risques, motivent l'approfondissement en cours et dans les années à venir de ces recherches, en vue de prouver la faisabilité d'un tel réacteur. Depuis 2017, de nouvelles collaborations sont mises en place tant au niveau national (CEA, Framatome et ORANO) qu’international (Canada, Turquie…). Cela a permis d’obtenir plusieurs thèses de doctorat cofinancées entre le CNRS/IN2P3/LPSC et Framatome (début octobre 2017), le CEA (deux thèses débutant en octobre 2019) et Orano (début novembre 2019).

Nos études pour optimiser et valider le concept de MSFR peuvent être regroupées en cinq axes, visant à tester et démontrer les larges potentialités de ce type de réacteurs :

* **Optimisation et fonctionnement** de nouveaux types de réacteurs à sels fondus producteurs d’énergie et régénérateurs en cycle Thorium et en cycle Uranium.
* **Sûreté des réacteurs de 4ème génération à sels fondus**, avec des analyses de risques basées sur la connaissance des phénomènes physiques (criticité, puissance résiduelle et estimation des incertitudes associées…) et chimiques (solubilité des sels, corrosion…) du réacteur
* **Contrôle de la corrosion :** Dans les concepts RSF, le sel combustible liquide est en contact permanent avec les parois du réacteur et la tenue mécanique et chimique des matériaux de structure est une question majeure de ce type de concept. Des études sont menées également à Orsay pour proposer des solutions pour réduire la corrosion des matériaux de structure, solutions basées sur le contrôle du potentiel redox du sel fondu. Il s'agit de l'objectif d'une des thèses citées ci-dessus et financée par le CEA qui a démarré en octobre 2019.
* **Conception d’un réacteur à sels fondus dit Small-MSFR**, réacteur à sels fondus modulaire de puissance réduite, dans un cadre de collaboration industrielle : l’augmentation de la part des énergies renouvelables dans la production électrique, en particulier dans les pays de l’OCDE, et le manque actuel de perspective pour un stockage économique de l’énergie, nécessitent le maintien de sources de production de base ayant une grande flexibilité de production. Le nucléaire étant la principale source de production non carbonée, les réacteurs de quatrième génération devront être capables de modifier rapidement leur puissance afin de venir compléter la production des sources intermittentes telles que l’éolien et le photovoltaïque. Ceci crée de nouvelles problématiques et ainsi de nouvelles thématiques de recherche.
* **Conception de réacteurs incinérateurs de déchets** : un aspect capital pour la durabilité et l’acceptabilité du nucléaire de fission porte sur la gestion des déchets nucléaires, plus précisément la gestion du plutonium (qui peut être vu comme un déchet ou un combustible selon l’usage prévu) et des actinides mineurs (noyaux lourds produits en réacteur et hautement radiotoxiques). L’entreprise Orano (ex AREVA NC Cycle), notamment en charge des usines de la Hague, a décidé mi-2018 de lancer de la veille technologique sur le sujet des réacteurs à sels fondus et de leur capacité d’incinération et s’est adressée pour cela aux équipes du Master Projet MSFR du CNRS.

Notre approche académique est complémentaire de l’approche R&D de l’industrie ou celle semi-industrielle du CEA, partant de la connaissance des phénomènes élémentaires en physique et chimie, d’une analyse des bases de données évaluées et des nouveaux besoins, basée sur des études systématiques des diverses observables liées à ces phénomènes, et portée par des codes de simulation classiques de la recherche fondamentale (codes Monte-Carlo, algorithme génétique, résolution analytique…).

Collaborateurs (personnes ou organismes) identifiés ou potentiels (dans et hors IN2P3) :

*Identified of potential collaborators (people or organizations, in- and outside IN2P3) :*

En France :

* 3 laboratoires porteurs du projet : IPN Orsay, LPSC Grenoble et Subatech Nantes + le laboratoire de Génie Chimique (LGC) de Toulouse (CNRS/INC – contact : Prof. Pierre Chamelot)
* CEA : Paul Gauthé (Cadarache), Joel Guidez (direction scientifique), Antoine Gerschenfeld (Saclay) et Jérôme Serp (Marcoule)
* CORYS : Ralf Gathman et Olivier Bruneau
* Framatome Lyon : Stéphane Beils et Bernard Carluec
* Orano : Bertrand Morel et Gérald Senentz
* EDF R&D : David Lemasson, Delphine Gérardin et David Lecarpentier

Collaboration avec les partenaires suivants du projet européen SAMOSAFER (H2020) : TU Delft (Pays-Bas), Kalsruhe Institute of Technology (Allemagne), Politecnico di Torino et Politecnico di Milano (Italie), JRC ITU Karlsruhe (Allemagne), Paul Scherrer Institut (Suisse), Tubitak et Figes (Turquie)

Collaboration TAS (Total Absorption Spectroscopy) : Instituto de Fisica Corpuscular (Valence, Espagne), Subatech (CNRS-IN2P3), University of Surrey (Royaume Uni)

J. Leppänen (VTT, Finland)

Instruments/Outils impliqués :

*Facilities/tools involved:*

Laboratoire actif à l'IPN d'Orsay pour l'étude des actinides en milieux sels fondus

Codes de simulation en physique des réacteurs nucléaires :

* Codes neutroniques en évolution : REM (développé au LPSC/IN2P3), SMURE/MURE (développé à l’IN2P3, disponible à la NEA)
* Codes de transport Monte-Carlo existants utilisés pour nos recherches : Serpent (développé au VTT Finlande – modifié au CNRS/IN2P3 pour utilisation dans TFM et SMURE), MCNP (développé au LANL USA, utilisé tel que fourni)
* Codes de simulation multiphysique : couplage neutronique-thermohydraulique TFM-OpenFOAM (développé au LPSC/IN2P3)
* Code système : code LiCore (développé au LPSC/IN2P3) + une version LiCore de « simulateur réacteur en temps réel » incluse sur la plateforme logicielle ALICES de l’entreprise CORYS (développé en collaboration entre CORYS et le LPSC/IN2P3)

**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)***

Etant donnés les intérêts suscités par cette thématique dans le monde, les besoins de l’énergie nucléaire et les collaborations possibles, de nouvelles études sont en cours comme mentionné ci-dessus autour d'autres applications et versions du « MSFR » de référence étudié depuis une quinzaine d’années en tant que réacteur de puissance élevée et régénérateur en cycle du combustible Thorium : notamment en tant que petit réacteur modulaire (Small Modular Reactor ou SMR) de faible puissance, utilisant un des deux cycles du combustible U/Pu ou Th/233U, pour la production d’énergie, ou des transuraniens pour l’incinération des déchets nucléaires.

À court terme, une thèse, cofinancée entre Framatome et l’IDEX UGA, a été lancée fin 2017. Elle porte sur l’étude d’un SMR innovant basé sur le cycle U/Pu. Par ailleurs, une étude, sous contrat de prestation avec ORANO sur le thème de l’incinération du plutonium en RSF a débouché sur la mise en place d’une thèse sur ce sujet entre ORANO et le LPSC débutant en novembre 2019. De plus, la collaboration débutée il y a 2 ans, sur le développement d’un simulateur de pilotage de MSFR, avec l’entreprise CORYS (leader européen des simulateurs de réacteurs nucléaires) continue. Une première version est disponible depuis juillet 2019 et a été présentée lors de la réunion finale du projet SAMOFAR. Un nouveau stage master est prévu au printemps 2020 entre le LPSC et CORYS.

Dans un avenir proche, une innovation majeure résiderait dans le développement d'une instrumentation dédiée à l'analyse in-situ des sels fondus afin d'en connaitre la composition atomique. Basée sur la technique LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) et l'utilisation d'une sonde immergée dans le milieu, cette technique a été mise en œuvre dans les métaux liquides par le CEA. Dans le cadre d'une collaboration entre le CNRS, le CEA et l'Université du Wisconsin (USA), nous souhaiterions pouvoir travailler sur le développement d'une sonde adaptée aux milieux sels fondus. Les applications d'une telle technique sont variées : mesures de solubilité, suivi d'une extraction en ligne, identification et dosage des produits de corrosion in-situ.

Un objectif à moyen terme est également de quantifier l’impact des données nucléaires sur le calcul de la puissance résiduelle en utilisant à la fois les méthodes d’analyse des incertitudes basées sur la méthode Total Monte-Carlo et à plus long terme la théorie des perturbations. Dans un premier temps, les études seront notamment axées sur l’impact des incertitudes des rendements des produits de fission et des énergies moyennes de décroissance sur l’estimation de la puissance résiduelle avec pour première application le concept de réacteur MSFR et son inclusion dans son analyse de sûreté. L’idée à plus long terme est de développer un outil de calcul mis à disposition de la communauté pour le design des réacteurs du futur.

Internationalement, les trois équipes du CNRS (Grenoble, Orsay et Nantes) sont impliquées dans le programme Européen SAMOSAFER (Simulation Models and Safety Assessment for Fluid-fuel Energy Reactors) sélectionné par Euratom en 2019 et qui a débuté le 1er octobre 2019 pour 4 ans. Ce programme est consacré à l’identification des possibles accidents graves pour un MSFR et à leur modélisation, ainsi qu’à la définition des modes de fonctionnement normaux et dégradés du réacteur. Le CNRS est plus particulièrement en charge du groupe de travail « Reactor operation and control, and safety demonstration » dans lequel un financement de thèse a été obtenu. Les chercheurs du CNRS sont également impliqués dans le groupe de travail « Safety requirements » piloté par le CEA et Framatome et en charge d’une tache du groupe de travail sur la puissance résiduelle piloté par PSI.

Nous avons aussi contribué au montage du projet européen BONSAI soumis en réponse à l’appel Euratom du programme H2020 fin septembre 2019. Ce projet est dédié à l’étude de sûreté de plusieurs concepts de SMR de 4ème génération. Un groupe de travail piloté par le CNRS/IN2P3 (en collaboration avec Framatome, le CEA, EDF, KIT, JRC ITU, POLIMI, PSI) est dédié au réacteur à sels fondus type MSFR en cycle U/Pu avec un sel chlorure. Une thèse cofinancée par Framatome et le CNRS/IN2P3/LPSC est prévu dans ce cadre sur l’évaluation des effets de seuil de petits réacteurs sur leur niveau de sûreté, notamment en termes de gestion du combustible, de contrôle de la réactivité et d’extraction de la puissance.

Au niveau national, une collaboration autour du MSFR a été mise en place avec le CEA. Une thèse cofinancée entre le CNRS/LPSC et le service d’études des systèmes innovants (SESI) du CEA Cadarache sur l’étude du comportement du MSFR en situations accidentelles graves a commencé en octobre 2019. On espère, dans les toutes prochaines années, un renforcement de cette collaboration pouvant porter sur l’ensemble des problématiques liées aux MSFR en cycle U/Pu et basés sur des sels chlorures, avec le CEA Saclay et le CEA Cadarache, notamment via le projet ESQUIV mis en place au CEA en 2019 géré par Paul Gauthé et dans lequel des efforts de R&D sur les réacteurs à sels fondus sont prévus

Les forces du projet reposent sur les moyens de simulation et d’expérimentation et les méthodologies développés, validés et maîtrisés depuis plus d’une quinzaine d’années, sur la reconnaissance de l’expertise de ses membres dans la thématique, sur le rôle de pilotage et de responsabilités, sur des collaborations solides déjà existantes à la fois dans le monde académique mais aussi industriel français autant qu’au niveau européen et international, enfin sur une activité importante et continue de publications et de communications.

La faiblesse principale tient au départ à la retraite fin 2021 d’un des deux membres permanents de l’équipe du LPSC qui pilote la thématique au CNRS et qui travaille sur les aspects de physique des réacteurs, design et sûreté, plus précisément le seul chercheur CNRS, sans perspective de remplacement pour le moment, alors que les sollicitations et les propositions de collaborations sont croissantes.

*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**](mailto:prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr) **avant le   
1er Novembre 2019**

***Please send this document to*** [***prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr***](mailto:prosp2020-GT11-copil-l@in2p3.fr) ***before   
November 1rst, 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.