

Stage sur le développement du code système du réacteur MSFR et son application pour l'étude du réacteur

LPSC et CORYS - Grenoble – Printemps 2019

Stage niveau M2 / 3A – Durée : 5 à 6 mois

1 Contexte

La plupart des réacteurs nucléaires fonctionnant ou ayant fonctionné utilise un combustible sous forme solide. Les Réacteurs à Sels Fondus (RSF) ont la particularité d'utiliser un combustible liquide ce qui leur confère des avantages potentiels importants :

- L'homogénéité du combustible permet une combustion uniforme, ce qui évite les plans de chargement ;
- Les coefficients de contre réaction du combustible sont intrinsèquement négatifs, notamment grâce à la dilatation de combustible qui le sort partiellement de la zone cœur ;
- Le retraitement et la préparation du combustible peuvent se faire sans changement d'état de celui-ci ;
- En cas d'urgence, le combustible peut être vidangé rapidement par écoulement gravitaire vers des cuves conçues afin d'évacuer passivement la puissance résiduelle et d'assurer la sous-criticité ;
- Le retraitement du combustible peut se faire en ligne ou en mini batch et donc sans nécessiter l'arrêt du réacteur. Ceci permet de ne pas avoir de réserve de réactivité ;
- Une très grande flexibilité dans la composition en noyaux lourd du combustible pour les isotopes 'chauds'.

Dès les années 50, les réacteurs à combustibles liquides ont été largement étudiés soit sous forme de réacteurs homogènes (le composé contenant l'élément combustible est soluble ou en suspension dans l'eau), soit sous forme de réacteurs inhomogènes à sels fondus circulant dans une matrice de béryllium ou de graphite pour modérer le spectre neutronique (le composé contenant l'élément combustible est soluble dans les sels fondus). Des études historiques ont aussi montré la possibilité de piloter ce type de réacteur sans l'aide de barres de contrôle ou de commande grâce à ses excellents coefficients de contre réaction.

Les réacteurs à sels fondus expérimentaux ARE (Aircraft Reactor Experiment) et MSRE (Molten Salt Reactor Experiment) du laboratoire d'Oak-Ridge aux USA ont montré la possibilité de fonctionner sans pression à haute température (600 °C typiquement). Ces expérimentations ont mené à la définition dans les années 1970 du MSBR (Molten Salt Breeder Reactor), réacteur industriel de puissance jamais construit finalement car non compétitif alors comparé aux REP, mais largement étudié à Oak-Ridge aux USA puis en France par EdF et le CEA. Plus récemment, depuis 2000, grâce aux moyens de calcul modernes, le CNRS a montré que le MSBR souffrait de faiblesses rédhibitoires tels que la corrélation trop forte du retraitement chimique avec le fonctionnement neutronique du cœur (10% du combustible devait être retraité chaque jour), la production trop importante de graphite irradié difficile à gérer et surtout un coefficient de contre réaction thermique global pouvant être légèrement positif rendant le réacteur intrinsèquement instable.

En 2006 le CNRS, en collaboration avec EdF dans le cadre d'une thèse co-financée, a proposé un nouveau concept de réacteur à sels fondus en spectre rapide qui allie les avantages des réacteurs homogènes (pilotabilité) avec ceux des réacteurs à sels fondus (fonctionnement sans pression à haute

température) tout en évitant les défauts du MSBR. Ce nouveau concept a été retenu par le forum international GEN IV (Generation IV International Forum ou GIF) en 2008 sous le nom de MSFR (Molten Salt Fast Reactor, voir figure 1). Le réacteur est basé sur un combustible liquide circulant entre le cœur et des échangeurs de chaleur, ce liquide remplissant à la fois le rôle de combustible et de caloporteur. L'utilisation d'un spectre neutronique rapide permet, de plus, d'accéder à l'incinération des actinides et de fortement réduire les sections efficaces de capture des produits de fission, ce qui rend le retraitement du combustible moins impératif (retraitement de moins de 0,1% du volume total du combustible chaque jour). Enfin ce concept innovant de réacteur nucléaire est conçu pour accéder à une sûreté intrinsèque et réduire la production de déchets radioactifs.

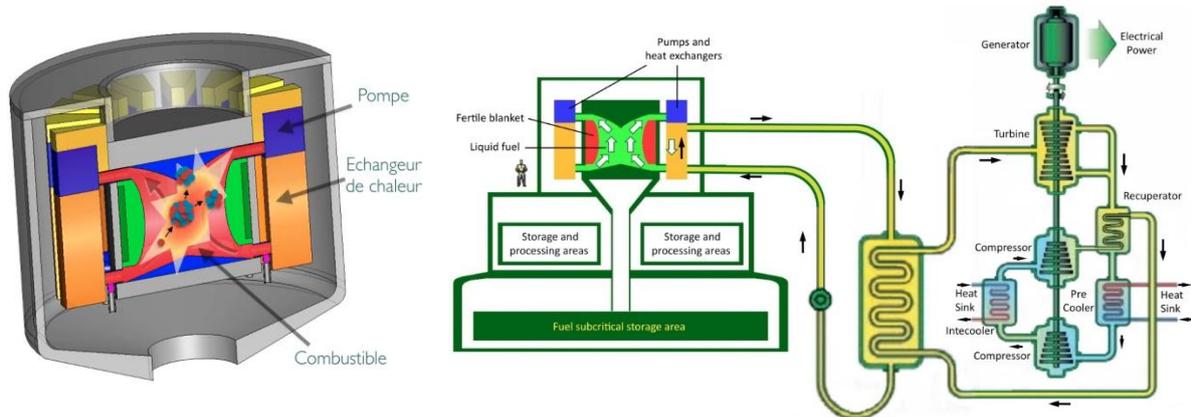


Fig.1. Représentation du circuit combustible du réacteur MSFR (gauche) et système complet incluant les 3 circuits (combustible, intermédiaire et de conversion de l'énergie) (droite)

Le MSFR est aussi au cœur de deux projets européens : le projet collaboratif Euratom Rosatom EVOL (Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor Systems) du 7ème PCRD (2011-2013) qui avait pour objectif de définir la meilleure configuration possible du système MSFR via des études de physique des réacteurs, de chimie et de matériaux ; et le projet SAMOFAR (Safety Assessment of Molten Salt Fast Reactors) du programme Horizon2020 (2015-2019) regroupant comme partenaires côté français à la fois des partenaires industriels (Framatome, l'IRSN, le CEA, EDF) et académiques (CNRS, Grenoble INP) et centré sur les études de sûreté du MSFR. Le LPSC est en charge des groupes de travail « Design and Safety » de ces projets européens. Enfin au niveau national, le projet team-MSFR porté par le LPSC est soutenu par le programme interdisciplinaire national NEEDS porté par le CNRS, en collaboration entre le LPSC, le laboratoire Subatech de Nantes, l'IPN d'Orsay, Framatome, le CEA, l'IRSN et EdF.

2 Cadre du stage

Du fait de l'augmentation de la demande énergétique menant notamment à un développement fort du nucléaire en Asie, cumulée dans les pays de l'OCDE à une augmentation de la part des énergies renouvelables nécessitant plus de flexibilité de fonctionnement de la part des sources non fatales, l'étude des réacteurs nucléaires est un domaine connaissant une évolution importante dans le cadre des choix sociétaux actuels. Un souhait fort s'exprime en faveur d'une production d'énergie durable avec des réacteurs à la fois régénérant leur combustible et minimisant les déchets, mais aussi pour la création de réacteurs capables de modifier ponctuellement et rapidement leur puissance afin de venir en appui à l'accroissement de sources intermittentes telles que l'éolien et le photovoltaïque. Ceci crée de nouvelles problématiques et ainsi de nouvelles thématiques de recherche. Il est ainsi nécessaire d'imaginer et de développer des systèmes nucléaires innovants permettant de contribuer à ce nouveau mix énergétique tout en étant acceptables par le grand public du point de vue de la sûreté, des déchets et du coût. Dans ce contexte, le concept de réacteur à combustible liquide MSFR a été identifié au niveau international comme très prometteur.

Du fait de l'originalité du concept MSFR et de son combustible liquide en circulation, les études et optimisations nécessitent la mise au point de nouvelles méthodologies d'analyse compatibles avec ce type de réacteur notamment dans les domaines de la sûreté et de la résistance à la prolifération, et le développement d'outils innovants de simulation multi-physique. De tels outils ont été mis au point ou sont en cours de conception. Ainsi l'équipe MSFR du LPSC développe actuellement dans le cadre du projet SAMOFAR un code système permettant de simuler le pilotage du réacteur dit MSFR. Ce code système basé sur le modèle neutronique LiCore (développé par Axel Laureau et nommé initialement CPZ pour Cinétique Point à Zone, cf référence [2] chapitre 5) est destiné à simuler en temps réel le comportement du MSFR lors de transitoires normaux et incidentaux afin de définir les procédures de pilotage du réacteur (démarrage, arrêt, suivis de charge). Un code couplé 3D neutronique-thermohydraulique, dont le temps d'exécution est plus long mais fournissant des résultats très précis, a également été mis au point (ref [2] chapitres 8 à 10) et permettra de comparer et améliorer les calculs réalisés avec le code système, plus rapide mais simplifié. Un calcul de suivi de charge illustré sur la figure 2 (droite) montre l'importance de la prise en charge du mouvement des précurseurs de neutrons retardés dans le MSFR lors d'un tel transitoire.

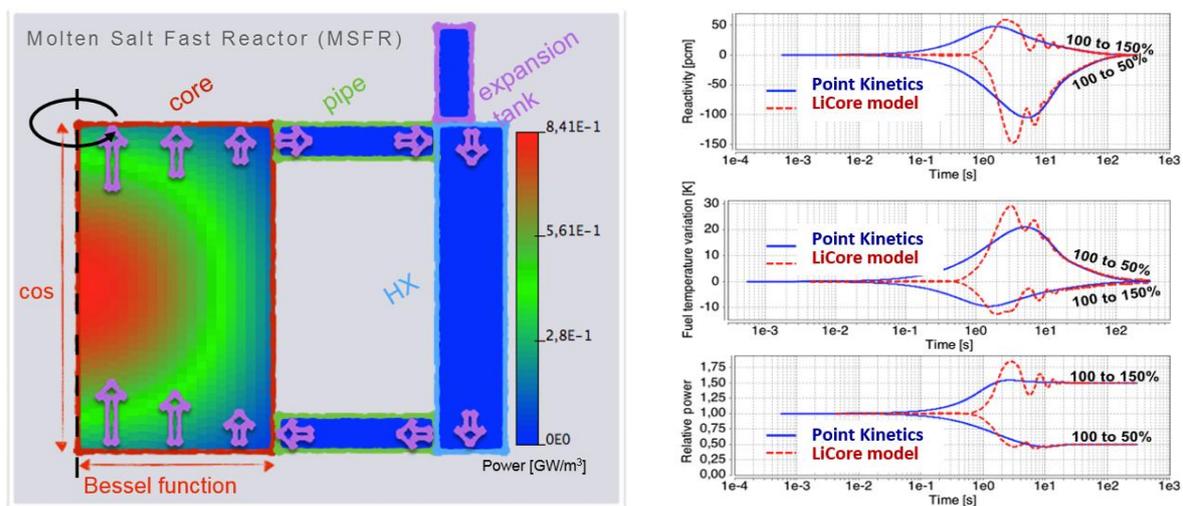


Figure 2 : schéma du MSFR dans le modèle LiCore (gauche) et comparaison du modèle LiCore et d'un modèle cinétique point sur un premier calcul de suivi de charge (droite)

Références

[1] Michel Allibert, Manuele Aufiero, Mariya Brovchenko, Sylvie Delpech, Véronique Ghetta, Daniel Heuer, A. Laureau, Elsa Merle-Lucotte, "Chapter 7 - Molten Salt Fast Reactors", Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, Woodhead Publishing Series in Energy (2015) – Téléchargeable sur la page <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/gpr/french/publis-rsf.htm> dans la section "Chapitres d'ouvrages et rapports"

[2] Axel LAUREAU, "Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs", Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (2015) - Téléchargeable sur la page <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/gpr/french/publis-rsf.htm> dans la section "Thèses" ou via le lien https://www.researchgate.net/publication/303543648_PhD_Thesis_-_2015_-_Developpement_de_modeles_neutroniques_pour_le_couplage_thermohydraulique_du_MSFR_et_le_calcul_de_parametres_cinetiques_effectifs

3 Sujet du stage

L'entreprise CORYS, installée à 200m du LPSC, est leader européen des simulateurs de pilotage (réacteurs nucléaires, trains). Elle utilise une plateforme intégrée de simulation nommée ALICES

(Atelier Logiciel Interactif de Conception et d'Etude de Simulateurs - <http://www.corys.com/fr/alicesr>) pour interfacier différents codes systèmes avec un utilisateur. Un premier stage (réalisé par F. Passelaigue, voir figure 3) a eu lieu en 2018, qui a permis d'interfacier le code LiCore développé par l'équipe MSFR du LPSC et écrit en java sur la plateforme ALICES de CORYS. Ce couplage est fonctionnel mais n'inclut pour le moment que le modèle neutronique LiCore. Afin d'avoir un simulateur complet facilement utilisable et diffusable permettant de réaliser des études de pilotage du MSFR, il faut connecter des modules d'ALICES existants (développés et utilisés dans le logiciel SIREP) pour modéliser le système complet incluant le circuit intermédiaire et le circuit de conversion de l'énergie du MSFR (cf partie droite de la figure 1).

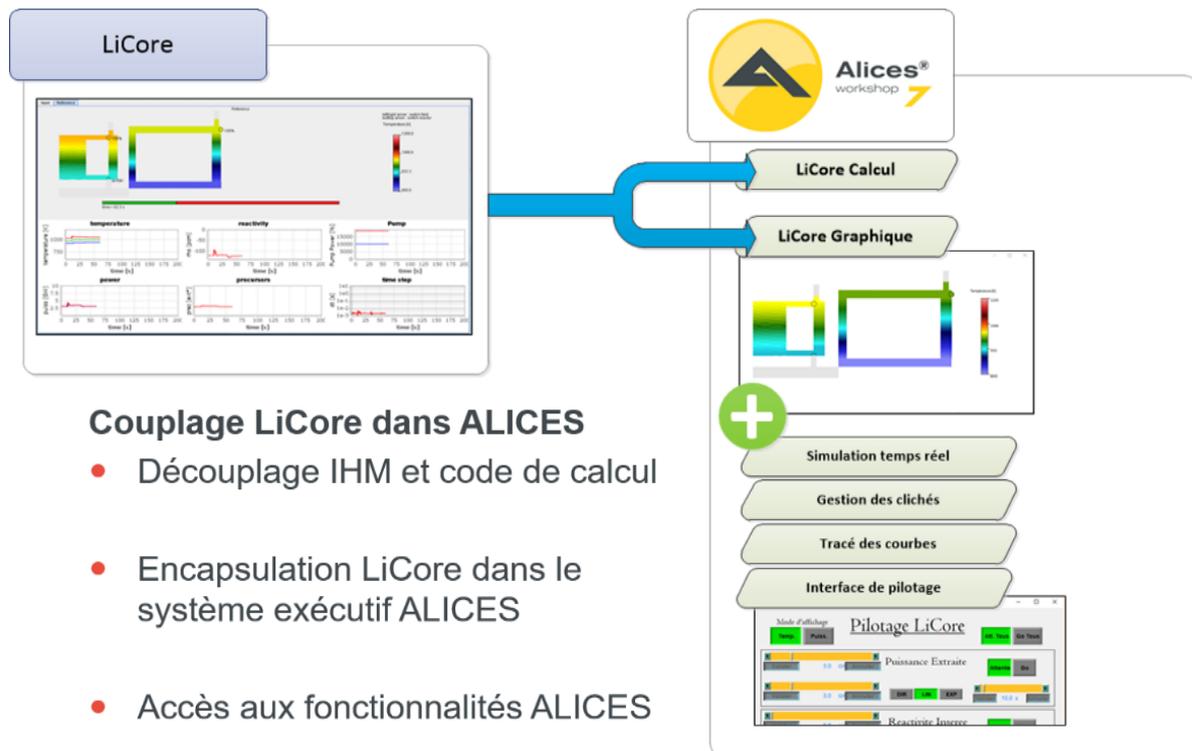


Figure 3 : Couplage réalisé lors du stage de F. Passelaigue du code LiCore sur la plateforme ALICES

Le stage se déroulerait en quatre temps (environ moitié au LPSC et moitié chez CORYS) :

- Au sein du LPSC, le stagiaire devra brièvement se familiariser avec le concept de MSFR et avec le code système LiCore 'nu'.
- Puis le stagiaire devra, dans les locaux de CORYS, se familiariser avec les fonctionnalités d'ALICES et plus spécifiquement le code système LiCore-ALICES existant
- Ensuite le stagiaire effectuera chez CORYS les développements du simulateur afin d'ajouter des modules pour simuler le fonctionnement des circuits intermédiaire et de conversion de l'énergie puis prendre en main le simulateur complet et savoir l'utiliser.
- Enfin le stagiaire effectuera la dernière partie du travail au LPSC en réalisant des études de pilotage normal du MSFR, par exemple de suivis de charge en 'réacteur prioritaire' ou en 'réseau prioritaire', tout en expliquant à l'équipe MSFR comment utiliser le simulateur.

Contacts / encadrement :

Elsa Merle – merle@lpsc.in2p3.fr – 04-76-28-41-50

Daniel Heuer – heuer@lpsc.in2p3.fr – 04-76-28-41-60

Jean-Christophe Blanchon - jblanchon@corys.fr

Olivier Bruneau – olivier.bruneau@corys.fr

La convention de stage et la rémunération seront gérées par le LPSC.

Pour en savoir plus sur le MSFR :

- Thèses en lien avec le sujet du stage :
 - o Axel LAUREAU, "*Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs*", Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, France (2015)
 - o Mariya Brovchenko, "*Etudes préliminaires de sûreté du réacteur à sels fondus MSFR*", Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, France (2013)
- Site complet des publications de l'équipe MSFR du LPSC :
<http://lpsc.in2p3.fr/gpr/gpr/french/publis-rsf.htm>
- « Rapport sur la gestion durable des matières nucléaires », <http://www.cea.fr/energie/rapport-sur-la-gestion-durable-des-matieres-nucl-106009>, Tome 4, pages 31-36 (2012)
- Collectif « L'énergie à découvrir », chapitre "La filière Thorium", pages 124-125, éditions CNRS (2013)
- Émission radio sur les réacteurs au Thorium : <http://www.franceculture.fr/emission-continent-sciences-nucleaire-filiere-d%E2%80%99avenir-quelles-reactions-en-chaine-2013-04-22>
- Sur le cycle thorium et le MSFR : <http://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8>
- « Science et Vie » Numéro 1130, Novembre 2011, pages 60-67 (2011)