

## **Rapport Prospectives IN2P3 à 10 ans : Physique des Réacteurs (Expérimentale)**

A. Billebaud (LPSC Grenoble), J.-C. Steckmeyer (LPC Caen)  
(13/05/04)

### **« Executive Summary »**

Depuis une dizaine d'années, l'IN2P3 a acquis une solide expérience dans le domaine de la physique des réacteurs en participant à divers programmes expérimentaux internationaux consacrés à la physique des ADS (Accelerator Driven Systems). L'expertise reconnue de l'IN2P3, tant du point de vue expérimental que de celui de la recherche, doit être mise à profit pour aborder dans les dix prochaines années les trois thèmes dominants de la physique des réacteurs suivants : les ADSR (Accelerator Driven Subcritical Reactors), les GFR (Gas Fast Reactors) et la filière thorium.

L'objectif principal des ADSR est l'incinération des actinides mineurs et la transmutation des produits de fission à longue durée de vie de façon à réduire considérablement leur radiotoxicité. Un fonctionnement des réacteurs en régime sous-critique est un gage de sûreté. Pour ce faire, il est impératif de développer diverses procédures de contrôle et de maîtrise de l'ensemble cœur-cible-faisceau (mesure de la réactivité, procédures de démarrage et d'arrêt, ...). L'établissement de ces procédures nécessite une compréhension parfaite de la neutronique des systèmes sous-critiques qui ne peut s'acquérir que par étapes successives, de complexité croissante, en réalisant et étudiant les divers projets envisagés par la communauté (MUSE-TRADE-MYRRHA).

Les réacteurs rapides caloportés gaz sont un axe prioritaire de la DEN du CEA avec la réalisation d'un prototype d'une puissance de 20-50 MWth à l'horizon 2014. La forte implication de l'IN2P3 dans l'étude des systèmes et scénarios à spectre rapide doit être accompagnée d'un engagement sur le plan expérimental. Différents aspects tels que l'utilisation de matériaux réfractaires et réflecteurs, la présence de canaux vides, ... peuvent être étudiés en configurations critiques et sous-critiques auprès du réacteur maquette MASURCA (CEA Cadarache) de façon à être comparés aux prédictions des codes de calcul et aux résultats de travaux réalisés jusqu'à maintenant. Dans ce but, l'IN2P3 doit œuvrer très fortement auprès du CEA pour prendre part à un tel programme.

Dans le cadre d'un déploiement de l'énergie nucléaire à l'échelle mondiale, l'utilisation du thorium-232 par rapport à l'uranium enrichi, présente l'avantage de ne pas conduire à un épuisement des ressources. De plus, la régénération du combustible, la diminution de l'inventaire initial et la moindre production d'actinides mineurs sont autant d'atouts supplémentaires. L'impact de l'incorporation du thorium-232 dans le combustible nucléaire est une étape incontournable dans la recherche de combustibles innovants. L'étude des systèmes et scénarios basés sur les réacteurs à sels fondus doit être poursuivie et accompagnée de la réalisation d'une boucle à échelle réduite qui devrait être riche d'enseignements en R&D pour les études de chimie, de neutronique, de thermohydraulique et des scénarios.

\*

### **Retour d'expérience en matière de physique des réacteurs**

Depuis la loi Bataille de 1991 la contribution du CNRS, et plus particulièrement de l'IN2P3, à la physique des réacteurs expérimentale s'est concrétisée par sa participation à plusieurs programmes expérimentaux internationaux dédiés à la physique des ADS (Accelerator Driven Systems), permettant de débiter une activité de recherche jusqu'alors conduite exclusivement par la DEN du CEA. Citons les expériences FEAT (First Energy Amplifier Test) puis TARC (Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing) conduites par Carlo Rubbia au CERN de 93 à 96 dont les objectifs étaient respectivement de valider la capacité d'un ADS (remis au jour au début des années 90) à produire de l'énergie, ainsi que celle à transmuter des produits de fission à vie longue. De 98 à nos jours citons enfin les expériences MUSE-3 et MUSE-4 (MULTiplication d'une Source Externe) qui se sont déroulées auprès du réacteur maquette MASURCA (CEN Cadarache) couplé dans la phase la plus récente (MUSE-4, 2000-2004) à une source pulsée de neutrons (GENEPI, GENérateur de NEutrons Pulsée Intense) conçue et construite par l'IN2P3. Ce programme, qui touche actuellement à sa fin, avait pour principe l'étude de la neutronique d'un système sous-critique avec une source parfaitement définie, afin de découpler la physique de la cible de spallation (étudiée par ailleurs) de celle du milieu multiplicateur. En particulier il s'est attaché à la mise au point de techniques permettant la mesure absolue du niveau de sous-criticité,

paramètre crucial de la sûreté de ce type de réacteur et la validation d'outils de référence (codes de calcul, données,...).

La participation à ces expériences a permis de s'impliquer concrètement dans la problématique des réacteurs d'une part, et d'autre part de se familiariser avec l'environnement contraignant d'un réacteur, tant dans la mise en place des expériences que dans la R&D associée (construction de GENEPI et de détecteurs dédiés). Au fil de ces travaux les équipes technique et de recherche impliquées ont acquis une expérience solide de l'environnement réacteur (à l'échelle de la recherche) et ont produit des résultats tout à fait pertinents aux yeux de la communauté scientifique concernée. Forte de cette reconnaissance l'IN2P3 peut aujourd'hui envisager de prendre part ou de mener des projets plus ambitieux dans ce domaine. Nous allons décrire les points essentiels méritant des études à venir.

## **Thèmes de prospective**

Les thèmes à développer s'organisent autour de trois systèmes de réacteur ayant un rôle potentiel dans la perspective d'un renouvellement ou d'un développement de la production d'énergie nucléaire et ou la réduction des déchets nucléaires induisant une grande radiotoxicité.

### **- Les ADSR (*Accelerator Driven Subcritical Reactor*)**

S'ils ne font pas l'unanimité dans le domaine d'une future production d'énergie (complexité du système pour un exploitant à grande échelle, aspects de sûreté non décisifs...) les ADSR restent cependant de sérieux candidats dans le domaine de l'incinération des actinides mineurs. C'est pourquoi ils font l'objet de plusieurs programmes expérimentaux en préparation.

Les techniques de contrôle de réactivité pour des installations de puissance significative restent un thème majeur d'étude. Le programme MUSE-4 ayant passé en revue les principales techniques et méthodes d'analyse disponibles et proposé de nouvelles méthodes donnant pour certaines d'excellents résultats dans le réacteur de faible puissance MASURCA (quelques watts), il est maintenant intéressant de les confronter à des installations plus puissantes. C'est l'objectif de l'expérience TRADE (TRiga Accelerator Driven Experiment), qui se déroulera auprès du réacteur TRIGA de l'ENEA (Casaccia, Italie), de démontrer le fonctionnement d'un ADS à un niveau de puissance significatif (quelques centaines de kW). Cette expérience représente une étape importante vers la réalisation d'un ETD (European Transmutation Demonstrator) tel qu'il est envisagé dans le programme PDS-XADS du 5<sup>e</sup> PCRD.

Cette expérience permettra de développer une instrumentation, des techniques expérimentales et les modes opératoires destinés à contrôler et maîtriser la réactivité d'un cœur sous-critique couplé à une source externe. A cet effet, les techniques issues des expériences MUSE seront adaptées et testées. La mesure des propriétés statiques et dynamiques des neutrons à l'intérieur du cœur, dans différents états de sous-criticité et avec différentes sources, permettra de caractériser la neutronique d'un système sous-critique thermique et de la comparer avec celle d'un système rapide (MUSE) (2005-2006).

Avec la source de spallation, seront étudiées les transitions entre régimes dominés par la source externe de neutrons et régimes dominés par la contre-réaction du cœur thermique. L'interaction entre la puissance du cœur et l'intensité délivrée par l'accélérateur (300  $\mu$ A, 140 MeV) sera explorée en faisant varier l'intensité du faisceau de protons. Ces études aideront à l'élaboration des procédures de démarrage et d'arrêt d'un ADS, l'utilisation de barres de contrôle avec le réacteur TRIGA facilitant leur mise au point. L'impact des interruptions de faisceau sur le fonctionnement du cœur sera également exploré (2008-2009).

Un certain nombre de ces techniques pourraient naturellement ensuite être testées dans une installation comme MYRRHA (projet IBA et SCK-CEN en collaboration avec d'autres

laboratoires européens) à l'horizon 2012. Ce projet de réacteur hybride de puissance intermédiaire (80 MW) prévoit de coupler un milieu sous-critique rapide refroidi au plomb-bismuth liquide à un accélérateur de protons LINAC de 350 MeV (5 mA) par l'intermédiaire d'une cible de spallation sans fenêtre de Pb-Bi. Les études de conception réalisées à ce jour par le SCK-CEN permettent d'ores et déjà d'engager un travail de simulation neutronique de ce réacteur et de faire des études relatives à la faisabilité des expériences mentionnées ci-dessus (de nombreux autres aspects peuvent faire l'objet d'études prospectives mais nous nous limitons ici à la composante neutronique).

Outre l'opportunité de développer ces techniques dans ces installations plus puissantes, un certain nombre d'autres aspects, comme la caractérisation dynamique de cœur ou la mesure de la fraction de neutrons retardés pour des compositions variables du combustible, pourraient être développés dans un réacteur comme MASURCA dans des configurations qui permettent l'utilisation de la source externe, c'est à dire sous-critiques.

### **- Les GFR (*Gas Fast Reactor*)**

Parmi les différents types de systèmes de réacteur envisagés pour un parc futur à l'horizon 2030-2040 (les réacteurs de génération IV), les réacteurs rapides caloportés au gaz sont prioritairement étudiés par le CEA, entre autres pour leurs qualités régénératrices de combustible (cycle U-Pu) et d'incinérateur d'actinides mineurs. Il est envisagé par la DEN à l'horizon 2014 la construction sur le site de Cadarache du REDT, Réacteur d'Essai et de Développement Technologique d'une puissance limitée à 20-50 MWth, afin d'évaluer et de développer les technologies de base nécessaires à la réalisation d'un prototype de GFR inférieur à 300 MWth. C'est pourquoi un programme expérimental dédié à la filière gaz se met actuellement en place autour du réacteur MASURCA. Etant donné la forte implication de l'IN2P3 dans les études systèmes/scénarios à spectres rapides (entre autres, cf. rapport prospectives scénarios), il est tout à fait pertinent d'y associer une composante expérimentale. Le programme expérimental sur MASURCA actuellement projeté par les services concernés du CEA est destiné à qualifier les outils de simulation sur certains aspects innovants comme par exemple la présence de nombreux canaux vides (pouvant générer des fuites privilégiées de neutrons), l'utilisation de matériaux réfractaires pour le combustible (carbures, nitrures) et les structures (matrices SiC), l'utilisation de nouveaux matériaux réflecteurs (tels que  $Zr_3Si_2$ ). Sur un certain nombre de ces questions, en particulier sur le rôle accru du réflecteur lors d'un caloportage par le gaz, il nous semble intéressant de confronter nos codes de calcul à l'expérience d'une part, et d'autre part de mettre à profit les techniques éprouvées au cours du programme MUSE-4 s'appuyant sur l'excitation neutronique par la source pulsée externe pour caractériser le cœur et l'impact de ces nouveaux matériaux (la source externe étant encore opérationnelle dans un futur proche). Pour cela des configurations sous-critiques du cœur sont nécessaires. Une demande a été formulée dans ce sens auprès de la DEN/DER/SPEX, malheureusement elle n'a pas été retenue pour la première courte phase de ce programme (planifiée pour 2006) en raison de travaux importants sur le réacteur. Il nous semble néanmoins important de soutenir ce programme sous-critique pour la phase expérimentale suivante planifiée vers 2008, ce qui pose la question de la disponibilité opérationnelle de la source GENEPI à cette date (maintenance, survie de l'installation au cours des travaux de jouvence de l'installation). En complément des études sur les propriétés neutroniques des matériaux réflecteurs pourront être réalisées sur la plateforme de recherche PEREN (Plateforme d'Etude et de Recherche pour l'ElectroNucléaire).

### **- La filière thorium**

Dans le cas d'un déploiement massif et/ou durable de l'énergie nucléaire à l'échelle mondiale les filières basées sur l'utilisation de l'uranium enrichi conduiraient à un épuisement inéluctable des ressources. C'est pourquoi les filières envisagées pour une production durable sont basées sur l'utilisation de minerai fertile comme l'uranium 238 ou le thorium 232 dans un mode impliquant la régénération du combustible. Les intérêts majeurs de la filière thorium sont la possibilité d'atteindre la régénération en spectre thermique ainsi que la moindre production d'actinides mineurs en raison de sa masse atomique plus faible.

Ce combustible mérite d'être étudié dans un réacteur de recherche. Il pourrait l'être dans une maquette comme MASURCA où l'on pourrait proposer d'étudier un mélange de MOX et de thorium. Un programme de mesures (statiques et dynamiques) avec un cœur d'une telle composition paraît être une étape incontournable en matière d'innovation sur les combustibles et de validation des calculs et données associées.

L'utilisation de ce combustible, qui permet la régénération en spectre thermique, nécessite cependant l'extraction des poisons neutroniques qui empêcheraient rapidement la régénération : cette opération est rendue possible par le retraitement en ligne d'un combustible liquide sous forme de sels fluorures. Cela est envisagé dans les réacteurs à sels fondus (RSF) qui font l'objet de multiples études depuis quelques années. Le combustible circulant dans une matrice de graphite (cœur du réacteur) ainsi que dans les échangeurs de chaleur, environ un tiers du volume du combustible se situe en permanence hors du cœur. L'étude détaillée du couplage neutronique et thermohydraulique d'un tel réacteur, en particulier pour le pilotage et la sûreté du réacteur, est cruciale. Ce travail de simulation débuté récemment devra se poursuivre. Il pourrait également s'appuyer sur des grandeurs expérimentales tirées d'une installation dédiée aux sels fondus. La réalisation d'une boucle de sels fondus à échelle réduite permettrait aux chimistes et physiciens concernés de tester et quantifier les données des procédés d'extraction et les données thermohydrauliques nécessaires aux codes de calcul utilisés dans les études de scénarios. Une telle boucle pourrait être installée à Grenoble où un laboratoire de pyrochimie dédié à ces recherches est déjà en cours d'équipement dans le cadre de la plateforme PEREN.

## Conclusions

Ayant débuté par la physique expérimentale relative aux ADSR, les activités en matière de physique des réacteurs expérimentale ont déjà apporté un certain nombre de réponses à la problématique posée grâce, entre autres, au programme MUSE-4 réalisé sur un réacteur de recherche. On comprend alors l'importance de participer aux programmes expérimentaux sur des installations plus puissantes en cours de réalisation (TRADE) ou en projet (MYRRHA). Ils permettront non seulement de maîtriser les techniques de contrôle de réactivité, de mieux comprendre le comportement dynamique d'un cœur sous-critique couplé à des sources de spallation ainsi que ses régimes transitoires lors des démarrages et arrêts du faisceau de protons, et de quantifier les contre-réactions thermiques.

Il est important de pouvoir étendre les investigations expérimentales aux particularités (matériaux réflecteurs, modérateurs, caloporteurs) d'autres systèmes envisagés pour le futur comme les réacteurs rapides à gaz, aussi bien qu'aux procédés chimiques entrant en jeu dans le retraitement en ligne du combustible des réacteurs à sels fondus, et en particulier de s'intéresser très fortement aux caractéristiques de la filière thorium.

Toutes ces études apportent non seulement une certaine expertise à notre communauté à la base non spécialiste de la physique des réacteurs, mais permettent aussi d'étayer les études systèmes et scénarios réalisées par simulation. Ces deux domaines doivent rester étroitement liés et en interaction permanente afin de définir les besoins physiques dans les domaines les plus innovants. De plus elles offrent l'opportunité aux personnels aussi bien scientifique que technique

d'acquérir une « culture réacteur » qui permettra au CNRS de garder un rôle concret dans les futurs projets en matière de réacteurs nucléaires, en particulier si la construction d'un démonstrateur voit le jour. Il est donc nécessaire de garder un accès aux moyens expérimentaux à notre portée, et en particulier à un réacteur comme MASURCA dont la modularité et la possibilité de couplage à une source externe en font une installation expérimentale unique en Europe. Pour ce faire, la poursuite d'accords privilégiés entre le CEA et le CNRS est plus que souhaitable. Enfin, la réalisation des objectifs cités ci-dessus nécessitera des moyens humains et financiers plus importants que ce qu'ils étaient jusqu'alors. A ce jour seules les équipes du LPSC et du LPC Caen sont directement impliquées dans les programmes expérimentaux. Il serait profitable que d'autres équipes engagées dans les études scénarios ou les mesures de données nucléaires directement liées aux systèmes, (IPNO, CENBG, SUBATECH...) se joignent à ces programmes.