

# Expériences de physique et technologie des réacteurs

CS de l'IN2P3 du 24/10/2013

A.Billebaud<sup>1</sup>, G. Ban<sup>2</sup>, S. Chabod<sup>1</sup>, P. Dessagne<sup>3</sup>, X. Doligez<sup>4</sup>, V. Ghetta<sup>1</sup>,

M. Kerveno<sup>3</sup>, F.-R. Lecolley<sup>2</sup>, J.-L. Lecouey<sup>2</sup>, G. Lehaut<sup>2</sup>, N. Marie<sup>2</sup>

*Avec le soutien des services techniques et accélérateurs de leurs laboratoires*

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, CNRS-IN2P3/UJF/INPG

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, ENSICAEN/Univ. de Caen/CNRS-IN2P3

<sup>3</sup> Institut de Physique Hubert Curien/DRS/Univ. de Strasbourg/CNRS-IN2P3

<sup>4</sup> Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, CNRS-IN2P3/Univ. Paris Sud

## SOMMAIRE

<b>A. PHYSIQUE DES REACTEURS POUR LES ADS</b> .....	2
1. Introduction .....	2
2. Les objectifs des expériences ADS.....	2
3. Le programme MUSE (1995-2004) .....	3
4. Le projet GUINEVERE (2007-2011) .....	4
4.1. La construction de l'installation (2007-2010) .....	5
4.1.1. L'accélérateur GENEPI-3C .....	5
4.1.2. Le réacteur VENUS-F .....	6
4.2. Le commissioning de l'installation (2010-2012) .....	7
4.3. Premiers travaux expérimentaux.....	8
4.3.1. Moniteurs neutrons.....	8
4.3.2. Du cœur critique au cœur sous-critique .....	9
5. Le projet FREYA (2011-2016) .....	10
5.1. Validation de la méthodologie de suivi de la réactivité .....	11
5.2. Travaux accomplis et en cours .....	13
5.3. Sur le terrain .....	14
6. Perspectives .....	15
7. Les publications .....	16
8. Références.....	18
<b>B. EXPERIENCE POUR LES REACTEURS A SELS FONDUS : FFFER</b> .....	18
1. Le concept de réacteur à sels fondus .....	18
2. Le projet FFFER.....	19
3. Travaux en cours et perspectives.....	20

# A. PHYSIQUE DES REACTEURS POUR LES ADS

## 1. Introduction

Depuis le milieu des années quatre-vingt-dix le concept de réacteur sous-critique piloté par accélérateur (Accelerator Driven System) a refait surface dans un concept revisité par C. Rubbia [1]. Ce dernier a conduit à cette époque deux expériences au CERN afin de renforcer le concept théorique par une approche expérimentale. Les expériences FEAT (First Energy Amplifier Test, 1995 [2]) et TARC (Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing, 1996 [3]) visaient à démontrer le gain en énergie d'un tel système pour l'une (c'est-à-dire à quantifier sa capacité à produire plus d'énergie qu'il n'en consomme) et son aptitude à la transmutation de certains déchets nucléaires pour l'autre.

Vers cette époque (1996-1997) s'est mis en place en France un Groupement de Recherche, appelé GEDEON (Gestion des Déchets par des Options Nouvelles) institué par convention entre le CEA, le CNRS, EDF puis Framatome avec pour objectif de coordonner l'effort de recherche sur la transmutation des isotopes à durée de vie longue, axe I de la loi sur la gestion des déchets radioactifs du 30/12/1991. Cet effort s'est surtout concentré dans un premier temps sur le potentiel en la matière des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur ayant un spectre de neutrons rapide ainsi que sur leur faisabilité. Ainsi plusieurs programmes de recherche ont été soutenus portant sur les différents aspects d'un ADS : l'amélioration des données et des modèles nucléaires liées à la spallation, l'amélioration de la compréhension des phénomènes physico-chimique de corrosion dans la cible de spallation et de la tenue des matériaux associés, l'étude de couplage entre un réacteur et une source externe de neutrons, et l'amélioration des performances des accélérateurs linéaires fournissant les faisceaux pilotant la source de neutrons. A l'échelle internationale, ces sujets ont aussi trouvé soutien dans les programmes cadres européens d'EURATOM lors des appels portant sur la problématique de la gestion des déchets et plus particulièrement sur l'axe séparation & transmutation (FP5, 6 et 7). Lors du 6<sup>ème</sup> programme cadre, ces recherches se sont groupées au sein d'un même projet intégré « EUROTRANS » dédié plus particulièrement au design avancé d'un ADS expérimental de puissance inférieure à 100 MWth afin de faire la démonstration technique de la faisabilité de la transmutation dans un tel système. Elles ont peu à peu conduit les évolutions du projet belge de démonstrateur d'ADS MYRRHA (SCK-CEN) en vue duquel des études sont encore soutenues au sein du 7<sup>ème</sup> PC.

Parmi les programmes expérimentaux engagés sur cette thématique au cours des quinze dernières années, nous sommes impliqués sur ceux réalisés sur des maquettes d'ADS et destinés à valider la physique des réacteurs associée.

## 2. Les objectifs des expériences ADS

La démarche des études menées dans les réacteurs maquettes, c'est-à-dire de très faibles puissances (de quelques Watts à quelques kiloWatts), est de découpler la physique du cœur sous-critique de celle de la source de spallation (envisagée pour les ADS de puissance) en utilisant à sa place des sources de neutrons bien connues et facilement caractérisables comme les sources D-T. Ces études permettent aussi de s'affranchir des effets thermiques et de l'évolution du combustible. Les expériences en soutien aux ADS poursuivent essentiellement deux objectifs : la mise à l'épreuve et

l'adaptation des schémas de calcul jusque-là uniquement utilisés pour des systèmes rapides critiques, et la mesure de la réactivité du cœur, dont la surveillance est nécessaire pour garantir la sûreté du réacteur. En effet, la puissance thermique d'un ADS est gouvernée par une relation de proportionnalité simple avec le nombre de neutrons par unité de temps que l'on injecte dans le cœur et donc avec l'intensité du faisceau envoyé sur la cible source de neutrons. Ainsi, une insertion accidentelle de réactivité, ou l'augmentation de cette dernière du fait de l'évolution du combustible, peuvent toujours être compensées par une diminution de l'intensité du faisceau, à condition toutefois que le cœur soit suffisamment loin de la criticité. Cette garantie ne peut être apportée que par le suivi en ligne du niveau de sous-criticité ou « réactivité » du système (définie comme l'écart à la criticité<sup>1</sup>). Ce point, non trivial d'un point de vue pratique, est crucial pour la sûreté d'un ADS, en particulier si l'on envisage d'y incinérer des actinides mineurs, ce qui explique et justifie qu'il fasse l'objet d'un effort expérimental important depuis plusieurs années. A plus long terme ce travail devra déboucher sur des techniques de suivi en ligne adaptées à des réacteurs de puissance. Par ailleurs, parallèlement à cette surveillance, s'ajoute également la nécessité de disposer d'une mesure de réactivité absolue pendant les opérations de chargement du cœur, lorsque la réactivité est très basse, ce qui ne répond pas forcément aux mêmes exigences et peut faire appel à des techniques différentes.

Les travaux expérimentaux menés dans les programmes MUSE et GUINEVERE sont entièrement tournés vers ces objectifs. Nous allons faire une brève synthèse du premier pour saisir l'enchaînement avec le second qui mobilise actuellement nos forces. L'échelle de temps peut surprendre, mais l'adaptation d'une installation nucléaire, aussi petite soit-elle, à ce type d'expérience requérant la présence d'un accélérateur dans une zone contrôlée contenant un réacteur, est soumise à des contraintes très fortes et des autorisations de sûreté non maitrisables. Il est à souligner que par deux fois les équipes techniques de l'IN2P3 ont réussi cette implantation. Enfin, les réacteurs de recherche obéissant à leurs règles d'exploitation propres et nécessitant un certain nombre de personnels d'astreinte, les plages de fonctionnement sont assez réduites (8h/jour, 5 jours/semaine).

### **3. Le programme MUSE (1995-2004)**

Le programme MUSE ("MULTIplication d'une Source Externe"), réalisé auprès du réacteur maquette de faible puissance MASURCA (MAquette de SURgénérateur à CAdarache), installé au CEA-Cadarache, a débuté en 1995 en collaboration avec le CEA, EDF et FRAMATOME, et après la réalisation de trois phases préparatoires, cette collaboration s'est ouverte à des partenaires européens pour mettre en œuvre l'expérience MUSE-4 au sein du projet « MUSE », financé par le 5ème PCRD d'EURATOM (2000-2004). Ce projet a mis à disposition des expérimentateurs une maquette d'ADS (d'une puissance inférieure à 100 W) constituée du réacteur MASURCA, et d'une source de neutrons créée à l'aide d'un accélérateur. Le cœur était chargé en combustible UO<sub>2</sub> et PuO<sub>2</sub> (MOx) additionné de sodium solide pour représenter le caloporteur d'un système à neutrons rapides, entouré de réflecteurs axiaux et radial constitués d'acier et de sodium. L'ensemble était entouré d'un écran fait de blocs d'acier. Les configurations sous-critiques du cœur ont été établies à partir de la configuration critique en retirant certains assemblages de combustible à la frontière

---

<sup>1</sup>la réactivité  $\rho$  est définie égale à  $(k_{\text{eff}} - 1)/k_{\text{eff}}$  où  $k_{\text{eff}}$  est le facteur de multiplication effectif du cœur qui caractérise son aptitude à maintenir la réaction en chaîne: lorsque le réacteur est critique  $k_{\text{eff}}=1$  et  $\rho=0$ , lorsque le réacteur est sous-critique,  $k_{\text{eff}}<1$  et  $\rho<0$ .

cœur-réflecteur et en les remplaçant par des assemblages « réflecteur ». La source de neutrons était produite par l'interaction d'un faisceau pulsé de deutons de 250 keV avec une cible tritiée (ou deutérée) située au centre du réacteur. Cet accélérateur baptisé « GENEPI » (Générateur de Neutrons Pulsé Intense) a été conçu et construit par le LPSC avant d'être installé auprès du réacteur MASURCA pour la durée des expériences. Les études menées sur cette installation se sont enchaînées selon le schéma suivant : dans un premier temps le réacteur fut étudié dans sa configuration « critique » par des mesures de caractérisation comme des distributions de flux sur les axes radiaux ou verticaux du cœur, destinées à être comparées aux calculs ; le cœur fut ensuite rendu sous-critique par modification du nombre d'assemblages combustible à sa périphérie puis couplé à la source de neutrons pulsée, ce qui a permis la mesure d'évolutions temporelles de l'évolution de la population de neutrons, base des travaux pour accéder à la réactivité du système. Plusieurs configurations sous-critiques ont ainsi été étudiées, et plusieurs modélisations permettant l'extraction de la réactivité testées. Un modèle original, développé au LPSC, s'appuyant en partie sur des simulations, a donné des résultats très prometteurs [4-6].

A l'issue du programme MUSE, et principalement de sa dernière phase (MUSE-4), un pas important avait déjà été franchi [7]:

- il a permis de mettre en œuvre avec succès un réacteur sous-critique à spectre rapide piloté par un accélérateur et son exploitation n'a pas mis au jour de difficultés particulières ; bien que d'un faible niveau (inférieur à 100 W en mode sous-critique) la puissance thermique du réacteur a été pilotée par l'intensité du faisceau délivré par l'accélérateur, vérifiant ainsi la loi liant ces deux paramètres et régissant ces systèmes couplés ;
- les mesures de caractérisation du cœur ont fourni des données qui ont pu être exploitées pour la qualification des outils de calcul, élargissant la base de données expérimentales relative aux réacteurs en configuration sous-critique ;
- aucune méthode de détermination de la réactivité n'ayant clairement montré sa robustesse, une méthodologie générale de suivi en ligne de ce paramètre, s'appuyant sur la combinaison d'une mesure relative et d'une approche absolue, a pu être proposée ; elle n'a toutefois pas pu être validée expérimentalement, à la fois parce que l'expérimentation sur l'installation a dû s'interrompre (fin du permis décennal de l'installation) et parce que les caractéristiques de l'accélérateur ne permettaient pas de réaliser la structure de faisceau adéquate. Les techniques de mesure absolue de la réactivité restaient à affiner et la nécessité de calculer des facteurs correctifs aux biais inhérents à chaque technique (et d'évaluer l'incertitude associée) restait à évaluer.

A la fin du 5<sup>ème</sup> programme cadre d'EURATOM, un nouveau projet en soutien aux ADS a vu le jour dans le cadre du 6<sup>ème</sup>, le projet EUROTRANS. Un nouveau programme expérimental a pu être mis en place dans ce contexte afin de poursuivre et de finaliser ce travail sur le monitoring de la réactivité, le projet GUINEVERE.

#### **4. Le projet GUINEVERE (2007-2011)**

Le projet GUINEVERE (Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus REactor) s'inscrit dans la droite ligne de l'expérience MUSE sur les conclusions de laquelle il a été bâti, avec l'objectif de valider une méthodologie dans son ensemble, dans un cœur plus proche des

caractéristiques prévues pour un ADS de puissance, et ultimement de l'adapter autant que faire se peut aux conditions d'un système de puissance. Il consiste en le couplage d'un réacteur maquette sous-critique (le réacteur VENUS-F du SCK-CEN, Mol, Belgique) à une source de neutrons de 14 MeV générés par l'accélérateur de deutons GENEPI-3C (réactions de fusion T(d,n) à 220 keV). Ce couplage est réalisé lui aussi à puissance quasi nulle dans le même esprit que celui de l'expérience MUSE. Il existe cependant des différences entre les installations de MUSE et GUINEVERE, certaines par nécessité (disponibilité du combustible), d'autres par choix scientifiques:

- le couplage du réacteur VENUS-F avec la source de neutrons GENEPI-3C est réalisé dans le plan vertical et non horizontal ;
- le cœur de GUINEVERE est constitué d'uranium métallique enrichi à 30% et non de MOX ;
- le caloporteur et le réflecteur de GUINEVERE sont faits de plomb et non de sodium ;
- la source de neutrons GENEPI-3C peut fonctionner en mode pulsé mais également en mode continu (jusqu'à 1 mA) et « continu interrompu » (c'est-à-dire avec des interruptions brèves de faisceau).

Le projet GUINEVERE, envisagé techniquement par les principaux partenaires SCK, CNRS/IN2P3 puis CEA/DEN au printemps 2006, a été proposé aux instances du projet EUROTRANS à l'automne 2006 pour intégrer le domaine 2 « ECATS » de ce projet, regroupant les études expérimentales touchant aux cœurs sous-critiques. Son intégration, lui assurant un apport financier notable, a été effective début décembre 2006. Il est à noter que son soutien par la direction de l'IN2P3 a été acquis très tôt, en accord avec les priorités scientifiques redéfinies alors par M. Spiro sur les recherches menées en physique des réacteurs (ADS et réacteurs à sels fondus).

Ce projet peut se décomposer en deux grandes phases : la construction de l'installation expérimentale (suivie de ses tests de mise en service) et la réalisation du programme d'expériences. Si la dernière a fait appel à une douzaine de partenaires européens d'EUROTRANS, la première a en revanche reposé sur les contributions majeures du SCK-CEN et de l'IN2P3, ainsi que sur le prêt du combustible par le CEA/DEN. Fort de l'expérience acquise lors de la conception et construction de l'accélérateur ayant fourni la source de neutrons GENEPI-1 pour l'expérience MUSE-4 (et d'une copie de celui-ci installée plus tard au LPSC), le LPSC, et plus particulièrement son Service Accélérateurs, a pris en charge la maîtrise d'œuvre d'un nouvel accélérateur conçu pour le programme GUINEVERE : l'accélérateur GENEPI-3C. Sa réalisation a été partagée avec trois autres laboratoires de l'IN2P3 : le LPC Caen, l'IPN Orsay, l'IPHC Strasbourg. Le SCK-CEN a pris en charge l'adaptation du réacteur VENUS et du site expérimental de Mol (VENUS-F). La réalisation du programme expérimental se fait sous les noms de GUINEVERE (2011-2012) puis FREYA (2011-2016).

#### **4.1. La construction de l'installation (2007-2010)**

##### **4.1.1. L'accélérateur GENEPI-3C**

La collaboration IN2P3 s'est rapidement mise en place début 2007 pour faire face à l'ampleur du travail et au planning serré découlant de l'intégration au projet EUROTRANS, dont l'échéance à l'époque était mars 2009, prolongée ensuite à mars 2010. Ce sont principalement les services mécaniques et accélérateurs de ces laboratoires qui ont pris part à ce travail. Pour simplifier, l'année 2007 fut essentiellement consacrée à la conception de l'accélérateur GENEPI-3C. Ce nouvel opus des accélérateurs GENEPI a en effet dû être adapté dans sa géométrie au site hébergeant le réacteur

VENUS d'une part, et d'autre part ses caractéristiques en tant que source de neutrons ont également été étendues afin de répondre aux objectifs expérimentaux.

Sur le plan géométrique, le couplage avec le réacteur VENUS s'effectue dans le plan vertical, l'introduction du faisceau se faisant par le haut du réacteur. Le réacteur ayant un diamètre assez petit (diamètre de cuve de 1,6 m) et étant situé dans un bunker assez réduit également, l'aimant courbant le faisceau à 90° est placé au-dessus du réacteur au niveau supérieur, avec un système de refroidissement déporté (pour limiter les risques de fuite de liquide dans le réacteur). Toute la ligne verticale est amovible pour accéder au cœur du réacteur et à la cible, et par conséquent l'aimant est également amovible. La ligne horizontale de faisceau et le terminal à la haute tension contenant la source ne sont pas fondamentalement différents des versions précédentes. Cependant la source elle-même, initialement conçue pour fonctionner en mode pulsé, a été modifiée pour fournir également des faisceaux continus intenses (1 mA), avec possibilité de pratiquer des interruptions brèves de ces derniers pour les besoins du programme expérimental. Enfin, le refroidissement de la cible fait l'objet d'un dispositif particulier étudié pour évacuer les 250 W maximum de faisceau continu sans utiliser de liquide hyrogéné. Toutes ces spécificités ont fait l'objet de développements nouveaux confiés aux différents partenaires : structure amovible ligne verticale : LPC Caen ; aimant 90° et refroidissement déporté : IPNO ; mobilité aimant, design doigt de gant et refroidissement cible : IPHC ; développements source, conception ligne et transport faisceau, intégration, électronique et informatique contrôle&commande : LPSC.

L'année 2008 fut celle des réalisations et de l'adaptation du site grenoblois pour l'installation provisoire de la machine, conduisant rapidement à la construction du premier tronçon de l'accélérateur (source + accélération) au LPSC et aux premiers tests de faisceau en novembre 2008. La construction de la ligne s'est ensuite poursuivie au fur et à mesure des réalisations, avec un commissioning progressif de l'installation. L'assemblage de l'accélérateur et de l'essentiel de son électronique de commande fut achevé à Grenoble en juillet 2009 et son commissioning fin août de la même année (réalisé sur cible inerte, c'est-à-dire sans production de neutrons). L'accélérateur et son câblage furent entièrement démontés et conditionnés pour le transport au cours du mois de septembre : les câbles firent l'objet d'un envoi anticipé pour en débiter la pose mi-septembre et le reste fut acheminé sur le site du SCK-CEN à Mol au 1<sup>er</sup> octobre (prestation Ulisse).

Le réassemblage de l'accélérateur à Mol a mobilisé les équipes de l'IN2P3 durant une douzaine de semaines consécutives, avec environ 3 à 4 personnes en rotation chaque semaine sur le chantier. La disponibilité des personnels pour accomplir cette performance avec compétence et motivation est à saluer. De fait les premiers faisceaux ont été délivrés par la machine dès décembre 2009.

#### **4.1.2. Le réacteur VENUS-F**

Du côté du SCK, les travaux ont porté sur : (i) la modification du réacteur VENUS pour accueillir un cœur à neutrons rapides (ce cœur fonctionnait jusqu'alors en neutrons thermiques avec de l'eau pour modérateur) ; (ii) la modification de la structure du bâtiment pour pouvoir installer l'accélérateur au-dessus du réacteur (construction d'un étage complet de plus de 7 m de hauteur). Les études de conception se sont déroulées au cours de l'année 2007, et après l'obtention du permis de construire en novembre 2007 et les consultations de marchés d'usage, les travaux de structure ont débuté en septembre 2008 (après dénucléarisation complète de la casemate réacteur) pour

s'achever en avril 2009. Les travaux d'aménagement ont ensuite pris la relève et ont été finalisés parallèlement à l'installation de l'accélérateur sur site.

En ce qui concerne le réacteur VENUS lui-même, rien à part la cuve n'a été conservé de l'ancien cœur. Ce dernier a été entièrement redéfini, de même que ses moyens de contrôle car l'utilisation en réacteur thermique précédente disposait d'un système d'arrêt d'urgence par purge de l'eau contenue dans le réacteur. Pour un réacteur à neutrons rapides, un système avec barres de sûreté absorbantes est requis. Toutes les parties constituant le cœur, en particulier les assemblages verticaux de section carrée contenant le combustible, ont fait l'objet d'un nouveau design. Il en est allé de même pour les râteliers destinés au stockage du combustible avant son chargement en cœur. La gestion du combustible dans cette phase intermédiaire (où la zone devait être exempte de matière nucléaire) a nécessité une logistique propre : il a fallu libérer l'espace occupé par le combustible de VENUS en le déplaçant sur la zone de stockage d'un autre réacteur (BR1), accueillir le nouveau combustible prêté par le CEA/DEN (uranium enrichi à 30%) et acheminé depuis Cadarache pour l'occasion (octobre-novembre 2007). La gestion de ce transport nucléaire a mobilisé des moyens importants et une attention particulière afin qu'il ne soit pas une source de retard dans la réalisation du projet. L'utilisation ultérieure de ce combustible (plus de 3 ans après son transport) doit de plus se faire sous le contrôle de l'AIEA.

L'ensemble de l'installation accélérateur et réacteur (vide) a été inauguré par les officiels belges le 4 mars 2010. A la suite de cela elle a pu entrer dans une nouvelle phase « nucléaire » (fermeture sous atmosphère contrôlée, passage en zone contrôlée règlementaire) pour permettre le début des tests susceptibles de produire des rayonnements ionisants et, par conséquent, le « commissioning » du système.

#### **4.2. Le commissioning de l'installation (2010-2012)**

Pour bien comprendre l'échelle de temps du processus de commissioning d'un système nucléaire, il faut savoir qu'il s'agit d'un procédé itératif entre les maîtres d'œuvre, le service de contrôle physique interne au SCK qui met en place des protections et surveillances, questionne, conseille, et contrôle lors de la préparation des dossiers, et BEL-V, l'organisme qui réalise les expertises techniques des installations nucléaires pour le compte du FANC (Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire), l'organisme de sûreté nucléaire belge (équivalent de l'ASN). Les délais des expertises ne sont hélas pas maîtrisables, et dépendent pour beaucoup de la disponibilité des experts, sollicités par ailleurs largement par les autres installations nucléaires belges, en particulier après l'accident de Fukushima. La stratégie suivie ici a été le commissioning de l'accélérateur puis du réacteur de façon indépendante.

Après l'isolement de l'installation VENUS (entendre par là le bâtiment réacteur et son nouvel étage) et son classement en « zone contrôlée » courant mars 2010, nous avons débuté les tests sur accélérateur. Ce travail fut découpé en étapes à l'issue de chacune desquelles des points étaient à valider tant sur le plan des spécifications de la machine que sur celui des dispositifs de sécurité. La rédaction d'un rapport des essais et son acceptation par le service de contrôle physique conditionne le passage à l'étape suivante. Une première phase de tests des faisceaux s'est déroulée sur cible inerte (mars à juillet 2010) et, après l'obtention du permis de produire des neutrons, une deuxième phase sur cible tritiée a permis de caractériser les productions de neutrons (septembre 2010).

Une partie des travaux réacteur et de son commissioning s'est déroulée parallèlement : en particulier le remplissage des assemblages de combustible (réalisé manuellement sous contrôle de l'AIEA en mai

2010), et les tests des barres de sûreté et de contrôle. L'arrêt des tests accélérateur en septembre 2010, et le retrait de la ligne verticale, a permis aux équipes belges de retrouver pleinement accès au réacteur pour finaliser à leur tour son commissioning. Une grande partie de cette phase concerne des tests dits « non nucléaires » dans le sens où ils ne nécessitent pas la mise en œuvre du réacteur. Il s'agissait ici de valider tous les systèmes assurant la sécurité des personnes et de l'installation (contrôle des rayonnements, évacuation des rejets tritiés, systèmes d'arrêt d'urgence du réacteur, électronique de gestion et contrôle des accès,...). Les résultats de ces tests ont fait l'objet d'un rapport remis à BEL-V en novembre 2010 en vue de l'obtention de permis de chargement du cœur. Ce permis a finalement été délivré en janvier 2011.

Le chargement d'un cœur suit une procédure dédiée. Les barres de sûreté sont chargées en premier, puis vient la moitié du cœur (au centre), puis les assemblages sont ajoutés en périphérie par paquets en nombre décroissant (8, puis 6, 5, 4, 3, 2, 1) jusqu'à ce que la criticité soit atteinte. Des mesures sont réalisées au fur et à mesure à l'aide d'une source de neutrons insérée dans le réflecteur (source Am-Be). Ceci constitue l'approche sous-critique. Le cœur critique fut atteint le 4 février 2011 avec une quantité de combustible supérieure aux prévisions. Cet écart par rapport aux prédictions des codes de calcul est toujours en cours d'investigation même s'il est partiellement expliqué aujourd'hui. Après la divergence de la configuration critique le cœur fut réarrangé (dans de moindres proportions) afin de le symétriser autant que possible et d'optimiser le positionnement des barres de contrôle. A l'issue de cette étape, un certain nombre de mesures de caractérisation du cœur critique ont été effectuées pour réaliser le « certificat de cœur », document requis par l'autorité de sûreté pour la suite de l'exploitation. Ces mesures s'inscrivent également dans le programme expérimental GUINEVERE dont l'étude du cœur critique constitue un point de référence.

Dans l'intervalle, le système de ventilation qui assure également l'évacuation des rejets tritiés (dégazage de la cible sous faisceau) a posé quelques soucis : le permis autorisant l'évacuation de ces rejets dans l'atmosphère fixe également une limite annuelle, à la fois sur la quantité de tritium gazeux et sur celle de son composé aqueux HTO, cette dernière étant bien plus basse que la précédente. A la suite des tests réalisés avec la cible de tritium en septembre 2010, les rejets gazeux se sont poursuivis assez lentement mais ont induit des rejets aqueux (à partir de H<sub>2</sub>O et HT) laissant prévoir par extrapolation l'atteinte rapide de la limite autorisée (et ce sans remettre la cible sous faisceau). Il a fallu dès lors y remédier avant de prévoir une nouvelle utilisation du faisceau sur cible. L'installation a été modifiée notamment pour limiter les volumes stagnants propices à la formation de HTO. Un nouveau dossier a été constitué et une nouvelle demande de permis pour une limite annuelle supérieure a été déposée. Ce dossier a été accepté mais a requis un nouveau décret royal dont la signature par le Service Public Fédéral de l'Intérieur (= Ministère de l'Intérieur) belge a été obtenue fin septembre 2011, simultanément avec l'autorisation de procéder au couplage du système. Ce premier couplage fut réalisé le 12 octobre 2011, et jusqu'à mars 2012 ce mode de fonctionnement a fait l'objet d'une dernière phase de commissioning.

### **4.3. Premiers travaux expérimentaux**

#### **4.3.1. Moniteurs neutrons**

Parallèlement au développement de l'installation expérimentale, le travail de préparation des expériences (calculs neutroniques, mesures préparatoires, choix et caractérisation des détecteurs...) a été effectué. Pour une source D-T, la problématique est assez différente de celle rencontrée avec

une cible de spallation : l'usure de la cible tritiée (essentiellement due au dégazage du tritium sous faisceau) et la position du faisceau sur la cible sont ici des paramètres à prendre en compte et donc à monitorer. C'est pourquoi la mesure de la production de neutrons doit être réalisée soigneusement. Les équipes de l'IN2P3 ont en particulier eu la charge des moniteurs de neutrons mais également de la réalisation du système d'acquisition de données pour l'ensemble du programme expérimental (GANDDALF). Deux systèmes monitorent la quantité de neutrons générés par la cible. L'un consiste en la détection directe des neutrons de 14 MeV émis à 180° de la cible par un télescope à protons de recul développé par le LPC Caen, l'autre consiste en la détection des particules alpha associées à la réaction nucléaire T(d,n) par un détecteur silicium situé en amont de la cible dans la ligne de faisceau dont la conception et a été prise en charge par le LPSC. Les équipes du LPSC et du LPCC ont également mené en mai 2010 une campagne d'irradiation neutronique de ces détecteurs siliciums de 65 µm d'épaisseur dans le réacteur BR1 (également au SCK-CEN). En effet le positionnement de ce détecteur dans la partie terminale de la ligne de faisceau l'expose particulièrement aux neutrons rapides issus à la fois de la cible et du réacteur. Or, la détection des alphas de monitoring conduisant souvent à des empilements, on doit s'assurer que l'on conserve une résolution suffisante pour discriminer les pics de multiplicité. Comme la résolution se dégrade avec la fluence en neutrons rapides reçus par le détecteur, l'objectif de cette campagne d'irradiation était d'évaluer la durée d'exploitation des siliciums utilisés pour le monitoring et d'estimer la fréquence de remplacement (contraignant car requérant le retrait de la ligne verticale). Ce travail a montré une détérioration de la résolution de détection des particules alpha de l'ordre de 10% pour une fluence neutronique correspondant à environ 134 jours d'exploitation dans VENUS, ce qui a permis de conclure que l'échelle de temps était tout à fait gérable dans le planning expérimental. Ce moniteur ainsi que le télescope à protons de recul ont pu être testés en conditions réelles lors des essais de faisceau sur cible de septembre 2010 et les productions de neutrons caractérisées en faisceau pulsé et continu. Réalisées avec une cible tritiée neuve (cible de 12 Ci) elles ont montré un excellent accord avec les taux attendus en fonction de l'intensité des faisceaux de deutons, répondant ainsi au cahier des charges du projet.

#### **4.3.2. Du cœur critique au cœur sous-critique**

Le chargement du cœur et les premières mesures en configuration critique se sont déroulées, pour des raisons de sécurité inhérentes au règlement de l'installation, en présence d'un nombre restreint de personnes, par conséquent uniquement du SCK-CEN. Ces premières données sont primordiales car elles permettent déjà la confrontation avec les modèles numériques du réacteur. Les mesures en cœur critique constituent par ailleurs l'étape préliminaire du programme sous-critique. Ce dernier étant principalement dédié aux méthodes permettant de déterminer la réactivité (ou niveau de sous-criticité), il est nécessaire, pour apprécier l'acuité de ces méthodes, de préalablement déterminer la réactivité de la configuration expérimentale sous-critique étudiée. Ceci se fait en comparant les taux de comptage de mêmes détecteurs pour différentes configurations sous-critiques, en référence au niveau critique, moyennant des facteurs de correction (« facteurs MSM ») estimés par le calcul. Il s'agit, en cœur critique, de faire chuter une barre de faible poids réactif (« rod drop »), de déterminer ce poids (via l'enregistrement des taux de comptage pendant la chute), puis d'effectuer un comptage statique dans ce cœur légèrement sous-critique à l'aide d'une source insérée dans le cœur (Am-Be). On répète ensuite ce comptage statique avec le(s) même(s) détecteur(s) pour le cœur sous-critique à étudier (le premier d'entre eux est appelé SC1 et a été obtenu en retirant les quatre assemblages centraux du cœur) et on déduit la réactivité de ce nouveau cœur par la relation :

$$\rho_{SC1} = f_{MSM} \frac{C_{rod}}{C_{SC1}} \rho_{rod}$$

où  $\rho$  représente les réactivités et  $C$  les taux de comptage.

Un soin particulier a été apporté par nos équipes de physique à la réalisation de ces mesures de référence (qui ont également permis de tester et finaliser notre acquisition de données), ainsi qu'à l'analyse des données. Elles ont permis de déterminer la réactivité de la configuration « SC1 » et l'erreur associée à cette mesure, et ce travail à présent finalisé sera soumis pour publication très prochainement [8]. A l'issue de cette étape, en juin 2011, la ligne verticale de l'accélérateur a pu être insérée dans le cœur, dans l'espace laissé par les quatre assemblages retirés. Cependant, pour faire fonctionner ce système sous-critique via l'accélérateur il a fallu attendre la réception du nouveau permis d'émission de tritium (notamment pour reprendre les pompages de la ligne contenant la cible), et la validation du commissioning du réacteur, tous deux obtenus fin septembre 2011 (cf. 4.2).

Le premier fonctionnement du réacteur sous-critique en mode couplé en octobre 2011 a ouvert une période de commissioning de l'ensemble couplé durant laquelle il s'agissait de faire fonctionner l'accélérateur dans ses différents modes de faisceau et de s'assurer de sa bonne cohabitation avec les procédures de démarrage et de fonctionnement du réacteur. Elle nous a également permis de réaliser les premières prises de données dans chacun de ces modes (pulsé, continu, continu interrompu), d'affiner les réglages de l'acquisition de données GANDDALF, de nous confronter aux taux de comptages réels, d'ajuster le choix des détecteurs et leur emplacement dans le réacteur, et de tester les méthodes d'analyse des données. Les données acquises en mode pulsé pendant cette dernière période de commissioning ont fait l'objet d'un premier test d'extraction de la réactivité à partir d'une méthode classique (« méthode des aires ») et d'une adaptation de la méthode développée à l'IN2P3 lors des expériences MUSE. Les résultats préliminaires ont été présentés à la conférence ICAPP (Int. Congress on the Advances in Nuclear Power Plants) en juin 2012 [9].

Courant mars 2012 nous avons remanié le plan de répartition des détecteurs dans le réacteur. En effet, dans certaines conditions (premières microsecondes après l'injection d'un pulse de neutrons, ou en faisceau continu), les taux de comptage se sont révélés trop élevés dans certaines chambres à fission (celles contenant 1 gramme d'U5), induisant un important temps mort de détection. Ces chambres ont pu être déplacés ou remplacés par d'autres contenant moins de matière fissile. Une fois la configuration optimisée, l'installation et ses moyens de mesure ont pu être mis à disposition de la collaboration européenne : achevé en 2010 le projet EUROTRANS a été remplacé par un nouveau projet européen au sein du FP7, le projet FREYA.

## 5. Le projet FREYA (2011-2016)

A l'issue du projet intégré EUROTRANS, les recherches se sont à nouveau organisées dans le FP7 d'EURATOM pour répondre aux besoins des études dédiées à la réalisation d'un démonstrateur d'ADS. Porteur d'un tel projet depuis les années 90, le projet MYRRHA, le SCK-CEN a reçu l'aval du gouvernement belge en 2010 avec le financement de la réalisation d'une phase de pré-projet (le « Front End Engineering Design », FEED, ainsi que la procédure de licensing) qui sera expertisé en 2014. Le réacteur du projet MYRRHA va bien au-delà d'un réacteur sous-critique piloté par accélérateur puisqu'il a pour objectif de constituer une installation flexible d'irradiation pour remplacer à terme le réacteur belge BR2. Il pourra fonctionner en configuration critique ou sous-

critique, sera alimenté dans ce dernier cas par un accélérateur de protons de 600 MeV et une cible de spallation, aura un combustible de type MOX et un caloporteur plomb-bismuth liquide.

Les études menées pour ce projet sont soutenues par plusieurs projets européens du FP7 (CDT, MAX,...). Pour des raisons de calendrier GUINEVERE n'a pu atteindre ses objectifs expérimentaux dans le cadre temporel d'EUROTRANS, aussi un nouveau projet a-t-il été soumis dans le FP7 pour poursuivre et étendre le programme initial de GUINEVERE auquel se sont ajoutés des objectifs associés à la configuration critique de MYRRHA: il s'agit du projet FREYA (Fast Reactor Experiments for hYbrid Applications), porté par le SCK-CEN, accepté en 2010 (2.8 M€ sur 4 ans) et qui a officiellement débuté le 1<sup>er</sup> mars 2011. Le CNRS/IN2P3 en est le deuxième partenaire en termes d'investissements humain et financier (ce projet compte 16 partenaires en tout). Il se découpe en cinq Work Packages qui répondent chacun à des objectifs dédiés:

- WP1: ADS on-line reactivity monitoring methodologies
- WP2: Subcritical configurations for design and licensing of MYRRHA/FASTEF
- WP3: Critical configurations for design and licensing of MYRRHA/FASTEF
- WP4: Critical configurations for Lead Fast Reactor
- WP5: Training and Education

Le CNRS/IN2P3 a en charge la coordination du WP1 qui englobe les objectifs de GUINEVERE et ses extensions, mais restera impliqué également dans le WP2, et WP3 (dans une moindre mesure). Les expériences pour le WP1 ont débuté en avril 2012, trois campagnes de mesures se sont déjà succédé auprès du réacteur VENUS-F et nous sommes sur le point de débiter la quatrième. De nombreuses données sont donc déjà disponibles. Cependant la fin d'exécution du WP1, et a fortiori les travaux suivants, sont pour le moment retardés : depuis près de deux ans nous attendons l'obtention de la licence d'exploitation de l'installation, et en son absence nous ne pouvons procéder à des modifications physiques du cœur. Ainsi les deux autres niveaux de sous-criticité que nous avons prévu d'étudier (appelées SC2 et SC3) ainsi que les configurations très sous-critiques, et autres tests impliquant des modifications du réflecteur n'ont pu être accomplis. A ce jour tous les dossiers de sûreté ont été acceptés par BEL-V, et le processus d'émission et signature de la licence (décret royal) suit son cours.

### **5.1. Validation de la méthodologie de suivi de la réactivité**

Comme nous l'avons souligné, les objectifs du WP1 reprennent ceux de l'initial projet GUINEVERE : ces travaux portent sur la validation d'une procédure de suivi de la réactivité pouvant être appliquée pendant le fonctionnement en puissance du réacteur sous-critique. Or ce fonctionnement « statique », alimenté par un faisceau continu de particules, n'offre que peu de paramètres à la mesure. La procédure proposée à l'issue de l'expérience MUSE repose sur la combinaison de deux approches : la première s'appuie sur ce fonctionnement statique avec la mesure continue de l'intensité du faisceau  $I$  et de la puissance thermique du réacteur (par l'intermédiaire d'une mesure de flux neutronique) qui sont liés par une relation de proportionnalité (au premier ordre) qu'on peut écrire :

$$-\rho = \frac{\varphi * E_f}{P_{th} v} \times \frac{I}{e} N_{n\ spall/p} = C \times \frac{I}{P_{th}}$$

(où  $\varphi *$  représente l'importance de la source de neutrons,  $E_f$  l'énergie moyenne de fission,  $v$  le nombre moyen de neutrons émis par fission,  $e$  la charge électrique élémentaire, et  $N_{n\ spall/n}$  le nombre moyen de neutrons de spallation émis par proton), ainsi la réactivité relative peut-être suivie dans le temps ; la seconde approche consiste à régulièrement faire une mesure de « calibration » de ce coefficient de proportionnalité via une mesure « absolue » de la réactivité : pour ce faire on a besoin d'une mesure dynamique, c'est pourquoi elle va être réalisée à la faveur de brèves interruptions de faisceau programmées cycliques. Lors de ces interruptions, suffisamment longues pour réaliser une mesure mais suffisamment courtes pour ne pas diminuer significativement la puissance d'une part et générer des stress thermiques d'autre part, on procède à un enregistrement de la décroissance temporelle de la population de neutrons. C'est à partir de l'analyse de cette décroissance que l'on prévoit d'extraire la réactivité du système. Initialement envisagées d'une durée de l'ordre de 200  $\mu$ s, ces interruptions pourront atteindre jusqu'à quelques millisecondes. C'est la nécessité de mettre en œuvre ces deux approches qui a guidé le cahier des charges de l'accélérateur couplé au réacteur VENUS-F.

La stratégie de validation de cette méthodologie est la suivante : tout d'abord on procède à des mesures dynamiques avec la source de neutrons en mode pulsé. A partir de ces mesures, appelées aussi « PNS » (pour Pulsed Neutron Source), on applique les modèles d'interprétation existants ou nouvellement développés (sur la base des travaux antérieurs de MUSE par exemple) pour extraire la réactivité et on confronte les résultats avec la valeur de réactivité déterminée par la méthode de référence (cf. 4.3.2). On évalue également la nécessité d'appliquer des facteurs correctifs prenant en compte les caractéristiques et la localisation des détecteurs. On réalise ensuite des mesures identiques en mode « continu interrompu », qui permet lui aussi l'accès à la décroissance temporelle de la population de neutrons, mais faisant suite à l'interruption d'une source continue et non plus impulsionnelle. On adapte alors (quand cela est possible) les modèles afin d'extraire la réactivité dans ce nouveau cas de figure. On compare à nouveau la qualité des résultats afin de déterminer les méthodes les plus fiables et introduisant le moins de biais à corriger. La robustesse des méthodes d'analyse sera ensuite éprouvée à partir du même type de mesures répétées pour des niveaux de sous-criticité différents, obtenus soit par modifications de l'arrangement du cœur, soit par déplacement des barres de contrôle absorbantes. Le déplacement de la source de neutrons (obtenu grâce à un doigt de gant plus court) ainsi que le remplacement de certains assemblages de plomb par d'autres matériaux dans le réflecteur permettront également d'apprécier la sensibilité des méthodes étudiées à la composition du cœur.

Des mesures axées sur la proportionnalité dite « courant-flux » sont également réalisées en faisceau continu, en introduisant des variations plus ou moins lentes de l'intensité, de façon à déterminer l'aptitude de ce type de mesures continues à rendre un suivi fidèle du fonctionnement du cœur.

Idéalement, une fois ces investigations menées, les méthodes ayant donné satisfaction devraient être éprouvées avec une mesure « en aveugle », au cours de laquelle une modification du cœur serait pratiquée sans qu'elle soit révélée aux équipes en charge de l'analyse. Ceci permettrait de se rapprocher d'une situation où la réactivité évolue sans qu'on en connaisse précisément la cause au moment du monitoring, et de démontrer notre aptitude à la détecter. Enfin, il restera à franchir le pas non négligeable de la transposition de la méthode vers un système de puissance.

Ce programme expérimental représente concrètement de très nombreuses heures de faisceau. Nous estimons en avoir accompli aujourd'hui 50%, et sommes en retard sur le calendrier d'exécution du projet FREYA. Néanmoins une grande partie de notre retard est imputable aux aspects de sûreté et autorisations légales de fonctionnement. Ceci a motivé notre demande d'extension du contrat d'une année (de 2015 vers 2016), ce qui nous a été accordé sans difficulté par la Commission Européenne, consciente des échelles de temps du traitement des dossiers des installations nucléaires.

## 5.2. Travaux accomplis et en cours

Depuis que nous disposons de données « en source pulsée » nous avons travaillé sur plusieurs méthodes d'interprétation des mesures dynamiques. Le LPCC s'est concentré sur la méthode des aires et le LPSC, avec l'aide de l'IPNO, sur la méthode dite «  $k_p$  » initialement développée lors de l'expérience MUSE.

La méthode des aires exploite l'intégrale (i.e. l'aire) située de la courbe de décroissance temporelle de la population de neutrons, en distinguant la contribution due aux neutrons prompts de celle due à la décroissance des précurseurs des neutrons retardés. En cinétique ponctuelle le rapport de l'aire prompte sur l'aire totale donne directement accès à la réactivité en dollars (c'est-à-dire  $\rho/\beta_{\text{eff}}$ ). Cette méthode, simple à mettre en œuvre, requiert cependant de déterminer soigneusement l'aire prompte par soustraction de la composante retardée. L'aire prompte s'étend sur quelques microsecondes après le pulse, alors que la contribution retardée s'étend sur plusieurs millisecondes. La fréquence de la source pulsée doit donc être adaptée à ces échelles de temps. Les évolutions temporelles des taux de comptage de 10 détecteurs obtenues pour plusieurs configurations de réactivités voisines de la configuration SC1 (obtenues par variation de la hauteur des barres de contrôle) ont été mesurées. L'analyse brute de ces mesures donne des valeurs de réactivités en ordre dispersé, par ailleurs inférieures aux valeurs de référence. Ce biais et cette dispersion sont en fait corrélés à la position des détecteurs dans le réacteur. Le détecteur situé à proximité de la cible tritiée donne ainsi d'emblée un résultat correct. Ces effets spatiaux peuvent être corrigés en deuxième analyse. Le travail correspondant a été présenté au workshop TCADS-2 (International Workshop on Technology and Components of Accelerator Driven Systems) [10].

La méthode «  $k_p$  » permet d'extraire la valeur du coefficient de multiplication prompt,  $k_p$ , d'un ADS en analysant la décroissance de sa population de neutrons consécutive à l'injection d'un pulse de neutrons source ou à l'interruption programmée du faisceau. Le coefficient  $k_p$  étant relié au  $k_{\text{eff}}$  du réacteur, sa mesure permet ensuite de remonter à la valeur de la réactivité. Concrètement, l'extraction de la valeur  $k_p$  s'effectue en comparant les taux de comptage des dix chambres à fission positionnées dans le réacteur VENUS avec des prédictions théoriques obtenues en résolvant une équation intégrale faisant intervenir la densité de probabilité,  $P(\tau)$ , qu'un neutron, créé dans le réacteur au temps  $t$ , a d'induire une fission au temps  $t + \tau$ , et la distribution  $D(\tau)$  des temps écoulés entre la création d'un neutron au temps  $t$  dans le réacteur et le moment,  $t + \tau$ , où il induit une fission dans le dépôt d'un détecteur. Les données théoriques et expérimentales doivent ensuite être comparées en utilisant un estimateur auto-normalisé, car leurs normalisations ne sont pas identiques. Dans la version initiale de la méthode  $k_p$ , proposée par Perdu et al. en 2003, le problème de normalisation est contourné en comparant les dérivées logarithmiques des taux de comptage. Ceci présente deux inconvénients majeurs : (i) une sensibilité excessive aux fluctuations statistiques (qui peuvent être grandes lorsque le détecteur est hors cœur ou contient un dépôt fissile de faible masse), (ii) l'erreur sur la valeur  $k_p$  extraite est difficile à obtenir. Nous avons donc proposé un

nouvel estimateur auto-normalisé, dont l'expression repose sur l'utilisation d'intégrales au lieu de dérivées. Nous avons testé l'estimateur intégral sur des configurations pour lesquelles il existe une expression analytique des taux de comptage théoriques des détecteurs et ainsi vérifié que notre estimateur conserve en présence de fluctuations statistiques importantes un pouvoir de résolution suffisant pour distinguer deux configurations de réacteurs dont les réactivités diffèrent de 5 pcm. Les résultats obtenus avec notre nouvelle approche sont en accord avec la valeur MSM dans ses barres d'erreur pour 8 détecteurs sur 10. Le biais observé pour 2 des 10 détecteurs est probablement lié à leur position dans le réacteur : ils sont situés dans la région la plus éloignée du réacteur, où les structures entourant la cuve ont un effet perturbateur. Ce travail a également été présenté au workshop TCADS-2 [11]. Des améliorations, nécessaires pour appliquer la méthode à des configurations très sous-critiques, sont en cours pour prendre en compte le poids des premières générations de neutrons dans la réaction en chaîne. La méthode sera également utilisée pour analyser les mesures effectuées lors des interruptions programmées de faisceau continu.

Par ailleurs, le LPCC s'est également intéressé au calcul de facteurs de correction des données brutes des détecteurs, utiles pour s'affranchir des effets spatiaux et spectraux ne manquant pas de survenir lors des expériences dynamiques, que la source externe de neutrons soit pulsée (méthode des aires) ou continue-interrompue (analyse de la décroissance de la population neutronique lors d'interruption faisceau). La stratégie est double : d'une part, améliorer la description des expériences réalisées, notamment du point de vue de la structure temporelle de la source de neutrons, dans les simulations numériques Monte Carlo employées traditionnellement ; d'autre part, étudier les effets spatiaux et spectraux les plus pertinents à l'œuvre, en développant un code de calcul déterministe basé sur la théorie de la diffusion, simple et rapide, avec lequel les principaux effets physiques pourront être identifiés. Cette double approche vise à identifier les paramètres pertinents ou non (sensibilité) dans la description d'une expérience dynamique, afin, à terme, de maîtriser les incertitudes associées aux coefficients de correction indispensables à une estimation fiable de la réactivité d'un ADS.

Enfin, le LPCC accueille un nouveau doctorant qui vient de débiter son travail sur le développement d'une méthodologie de mesure de la réactivité en ligne d'un ADS. Il étudiera en particulier les techniques de mesure de réactivité applicables lorsque l'accélérateur fonctionne en mode « continu avec de courtes interruptions ». Il devra en particulier évaluer la robustesse des méthodes existantes et développer des méthodes innovantes basées sur l'analyse de la décroissance de la population neutronique mesurée lors d'interruptions faisceau. Enfin, il travaillera à la transposition des résultats obtenus au cas d'un ADS de puissance tel qu'envisagé par le projet MYRRHA.

### **5.3. Sur le terrain**

Les équipes de physique de l'IN2P3 assurent une grande présence sur le terrain depuis mai 2011 : nous assurons une grande partie de la prise de données, la tenue du cahier d'expériences électronique, et veillons à l'aspect qualité du suivi des mesures et de leur cohérence. Nous sommes par ailleurs largement impliqués dans le travail de simulation permettant d'interpréter les expériences et dans l'analyse des mesures. Le service des accélérateurs du LPSC assure le pilotage et la maintenance de l'accélérateur à Mol. Un transfert des compétences vers l'équipe belge est en cours. Mais les plages de fonctionnement de « routine » de l'accélérateur sont encore hélas trop peu nombreuses pour déléguer entièrement la conduite de la machine. Le temps utile auprès du réacteur est très variable. Dans ses périodes stables l'accélérateur permet plusieurs semaines de prises de

données consécutives interrompues seulement par les semaines de relâche (4 personnes seulement au LPSC aptes à la conduite). Près des périodes estivales, les conditions d'humidité et de température semblent à l'origine des nombreux claquages de la haute tension qui entraînent régulièrement des avaries plus ou moins faciles à réparer. En décembre et en juillet nous sommes également astreints à l'arrêt de l'accélérateur (pompages et chauffage du filament de la source) ce qui soumet les reprises à des aléas supplémentaires. Les tâches de maintenance, diagnostique et traitement des pannes sont évidemment plus difficiles à traiter sur un site distant. Trois personnes (dont deux pilotes) seulement assurent les interventions sur le hardware, deux autres maintiennent les parties softwares et peuvent intervenir à distance.

Sur place, si nous déplorons de nombreuses interruptions lors de l'exécution des expériences (tests de sécurité, visites de l'AIEA, visites de BEL-V, interventions techniques, visites officielles pour le consortium MYRRHA, ...) et les faibles effectifs dédiés au réacteur (il suffit parfois d'un congé maladie pour ne plus atteindre le quorum permettant de fonctionner), nous saluons l'aide sans faille et l'investissement de nos collègues belges.

Après bientôt deux ans d'exploitation du système couplé, nous essayons de tirer profit au mieux de notre retour d'expérience et de mettre en place des maintenances aussi préventives que possible afin d'augmenter le temps de disponibilité du faisceau. Mais nous rencontrons encore quelques fois des impasses.

## **6. Perspectives**

Les expériences de couplage accélérateur/réacteur sous-critique sur des installations de puissance quasi-nulle ont permis aux équipes du CNRS/IN2P3 de faire leurs armes dans la physique des réacteurs expérimentale (discipline jusqu'alors pratiquée uniquement au CEA/DEN) tout en apportant leur expérience de la physique expérimentale basse énergie (travail avec des faisceaux accélérés) ; cet investissement permet aujourd'hui à ces équipes d'être des acteurs moteurs dans cette discipline et de contribuer à la production scientifique de cette thématique (cœur de nos métiers) . Par ailleurs l'approche pratique des réacteurs, au travers des expériences sous-critiques, vient indéniablement consolider l'enseignement de la discipline (universités, écoles d'ingénieurs, rappelons que la demande professionnelle reste forte dans ce domaine).

Compte tenu de l'avancement du projet FREYA il est plus que probable qu'à la fin de ce projet européen (mars 2016) un certain nombre de points resteront à approfondir, en particulier parce que les cœurs étudiés dans le cadre de FREYA ne représentent que partiellement la configuration de celui de MYRRHA (toujours en cours de définition). Etant donné notre investissement, tant humain que financier, dans l'installation expérimentale GUINEVERE, et notre implication scientifique dans les travaux qui y sont associés, nous souhaitons avoir la possibilité de poursuivre nos travaux au-delà du projet FREYA et ce, dans un cadre à définir. Dans cette perspective, nous avons engagé une réflexion, avec les équipes de l'IN2P3 actuellement engagées sur les études systèmes. Il nous semble opportun d'initier dès à présent des discussions avec nos collègues belges afin d'être partie prenante et force de proposition dans l'élaboration des projets futurs, en soutien au projet MYRRHA et davantage, qui pourraient trouver cadre dans Horizon 2020. Par ailleurs il existe une demande de données intégrales provenant de réacteurs nucléaires expérimentaux, notamment de la part de l'IRSN, à destination de la validation des codes de simulation neutronique. Cette demande mérite d'être étudiée et pourrait être l'objet d'une collaboration entre nos deux instituts.

Pour conclure il faut souligner que la poursuite d'expériences dans ce domaine de la physique des réacteurs nous contraint *de facto* à nous associer avec un partenaire nous permettant l'accès à un réacteur de recherche, si possible à spectre rapide (réacteurs innovants), ce qui limite le choix au CEA/DEN (réacteur MASURCA) en France, et au SCK-CEN (réacteur VENUS) dans le reste de l'Europe.

## **7. Les publications**

La période de construction de cette installation fut une période un peu ingrate sur le plan des publications scientifiques, les premières prises de données ayant débuté en 2011. Cependant tout au long de la réalisation de l'installation pour GUINEVERE le projet et ses travaux préparatoires ont été présentés aux rendez-vous habituels de la physique des réacteurs et les premiers articles dans des revues à comité de lecture seront soumis au cours de l'année qui vient:

### **GLOBAL 2007:**

"ECATS: an international experimental program on the reactivity monitoring of Accelerator Driven Systems - Status and progress", G. Granget et al., GLOBAL Int. Conf., Boise, Idaho, USA, 9-13 septembre 2007.

### **PHYSOR 2008:**

"The GUINEVERE project at the VENUS facility", P. Baeten et al., PHYSOR Int. Conf., Interlaken, Suisse, 14-19 septembre 2008.

### **ANIMMA 2009:**

"Monitoring Fast Neutron Sources For Accelerator Driven Subcritical Reactor Experiments", J.-L. Lecouey et al., Int. Conf. on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications: ANIMMA 2009, Marseille, France, 7-10 juin 2009.

### **GLOBAL 2009:**

"The GUINEVERE Project for Accelerator Driven System Physics", A. Billebaud et al., GLOBAL 2009 Int. Conf., Paris, France, 6-11 septembre 2009.

### **ENC 2010:**

"The guinevere project at the VENUS-f facility", P. Baeten et al., European Nuclear Conference, Barcelone, Espagne, 30 mai – 2 juin 2010.

### **ANIMMA 2011:**

"Experimental Results from the VENUS-F Critical Reference State for the GUINEVERE Accelerator Driven System Project", W. Uyttenhove et al., Int. Conf. on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications: ANIMMA, Ghent, Belgique, 6-9 juin 2011.

### **ICAPP 2012 :**

H.-E. Thyébault et al., "The GUINEVERE Experiment: first PNS measurements in a lead moderated sub-critical fast core", Int. Congress on the Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP'12 Chicago, USA, 24-28 juin 2012.

**TCADS-2 2013:**

N. Marie et al., "Reactivity monitoring using the area method for the subcritical VENUS-F core within the framework of the FREYA project", Second Int. Workshop on Technology and Components for Accelerator Driven Systems, Nantes, France, 21-23 mai 2013.

S. Chabod et al., "Analysis of prompt decay experiments for ADS reactivity monitoring at VENUS-F facility", Second Int. Workshop on Technology and Components for Accelerator Driven Systems, Nantes, France, 21-23 mai 2013.

A. Kochetkov et al., "Current progress and future plans of the FREYA project", Second Int. Workshop on Technology and Components for Accelerator Driven Systems, Nantes, France, 21-23 mai 2013.

J.-L. Lecouey et al., "Estimate of the reactivity of the VENUS-F SC1 configuration using the MSM method", *à soumettre Nuclear Science and Engineering* (2013).

Les travaux sur l'accélérateur ont également été présentés régulièrement aux rendez-vous dédiés:

**Workshop Int. HPPA 2007:**

J.-M. De Conto et al., "The GENEPI neutron sources at Grenoble. Perspectives for the GUINEVERE programme", Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, Mol, Belgique, 6-9 mai 2007.

**Meeting Int. AccApp 2007:**

M. Baylac et al., "The GENEPI-3C accelerator for the GUINEVERE project", International topical meeting on Nuclear Applications and Utilisation of Accelerators, Pocatello, Idaho, USA, 29 juillet- 2 août 2007.

**Meeting Int. AccApp 2009:**

M. Baylac et al., "The GENEPI-3C accelerator for the GUINEVERE project", International topical meeting on Nuclear Applications and Utilisation of Accelerators, Vienne, Autriche, 4-8 mai 2009.

**Meeting Int. AccApp 2011:**

M. Baylac et al., "A versatile neutron source for the low power ADS GUINEVERE", International topical meeting on Nuclear Applications of Accelerators, Knoxville, TN, USA, 3-7 avril 2011.

**TCADS-2 2013:**

M. Baylac et al., "The GENEPI-3C accelerator as a versatile neutron source for the low power ADS experiment GUINEVERE", Second Int. Workshop on Technology and Components for Accelerator Driven Systems, Nantes, France, 21-23 mai 2013.

**Meeting Int. AccApp 2013:**

E. Froidefond et al., "Operation of the GENEPI-3C accelerator for the ADS mock-up GUINEVERE", International topical meeting on Nuclear Applications of Accelerators, Bruges, Belgique, 5-8 août 2013.

## 8. Références

- 1 C. Rubbia, J.A. Rubio, S. Buono, F. Carminati, F. Fiétier, J. Galvez, C. Gelès, Y. Kadi, R. Klapisch, P. Mandrillon, J.P. Revol, C. Roche, Rapport CERN, CERN-AT-95-44-ET (1995).
- 2 S. Andriamonje et al., Physics Letters B, 398 (1995) 697.
- 3 H. Arnould et al., Rapport CERN, CERN-SL-99-036 EET (1999).
- 4 F. Perdu et al., Progress in Nuclear Energy, **42** (2003) 107.
- 5 F. Perdu, « Contributions aux études de sûreté pour des filières innovantes de réacteurs nucléaires », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I (2003).
- 6 J. Vollaire, « L'expérience MUSE-4 : mesure des paramètres cinétiques d'un système sous-critique », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (2004).
- 7 Collaboration MUSE : EURATOM FP5, MUSE-Contract #FIKW-CT-2000-00063, Deliverable #8 : Final report (2005).
- 8 J.-L. Lecouey et al., "Estimate of the reactivity of the VENUS-F SC1 configuration using the MSM method", à soumettre Nuclear Science and Engineering (2013).
- 9 H.-E. Thyébault et al., "The GUINEVERE Experiment: first PNS measurements in a lead moderated sub-critical fast core", Proceedings of Int. Congress on the Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP'12 Chicago, USA, 24-28 juin 2012.
- 10 N. Marie et al., "Reactivity monitoring using the area method for the subcritical VENUS-F core within the framework of the FREYA project", Proceedings of Second Int. Workshop on Technology and Components for Accelerator Driven Systems, NEA/OCDE, Nantes, France, 21-23 mai 2013.
- 11 S. Chabod et al., "Analysis of prompt decay experiments for ADS reactivity monitoring at VENUS-F facility", Proceedings of Second Int. Workshop on Technology and Components for Accelerator Driven Systems, NEA/OCDE, Nantes, France, 21-23 mai 2013.

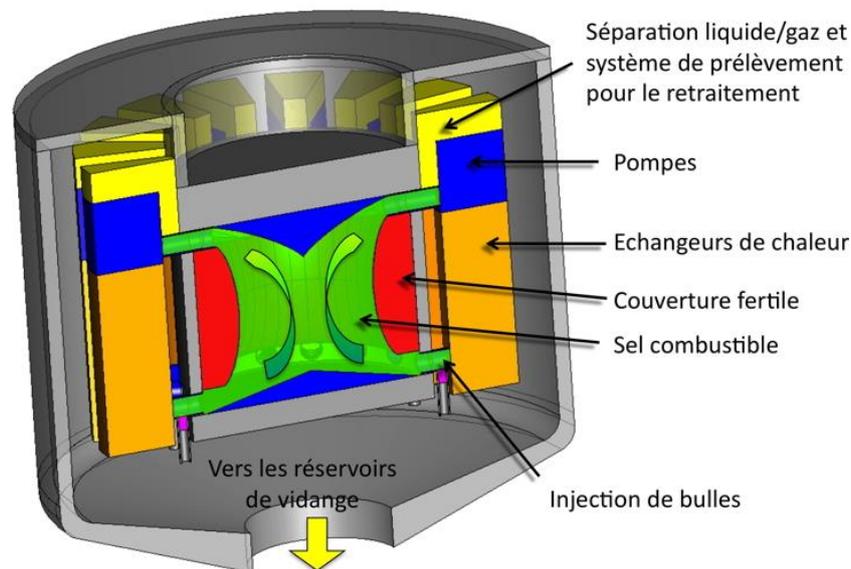
## B. EXPERIENCE POUR LES REACTEURS A SELS FONDUS : FFFER

### 1. Le concept de réacteur à sels fondus

Depuis 1998 le Groupe Physique des Réacteurs du LPSC s'intéresse aux Réacteurs à Sels Fondus (RSF) en cycle thorium. Après avoir revisité les études antérieures et démontré l'inefficacité de ce type de réacteur en spectre thermique du fait de coefficients de contre réaction défavorables, d'une gestion du graphite trop pénalisante et d'une corrélation trop forte entre l'unité de retraitement et la neutronique, le concept a évolué vers un spectre neutronique rapide. La nouvelle configuration proposée semble satisfaire l'ensemble des critères édictés pour le développement d'un nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération. En conséquence, le forum international GEN-IV a adopté en 2008 ce nouveau

concept, nommé « MSFR » (Molten Salt Fast Reactor), comme représentant de la filière rapide à sel fondu.

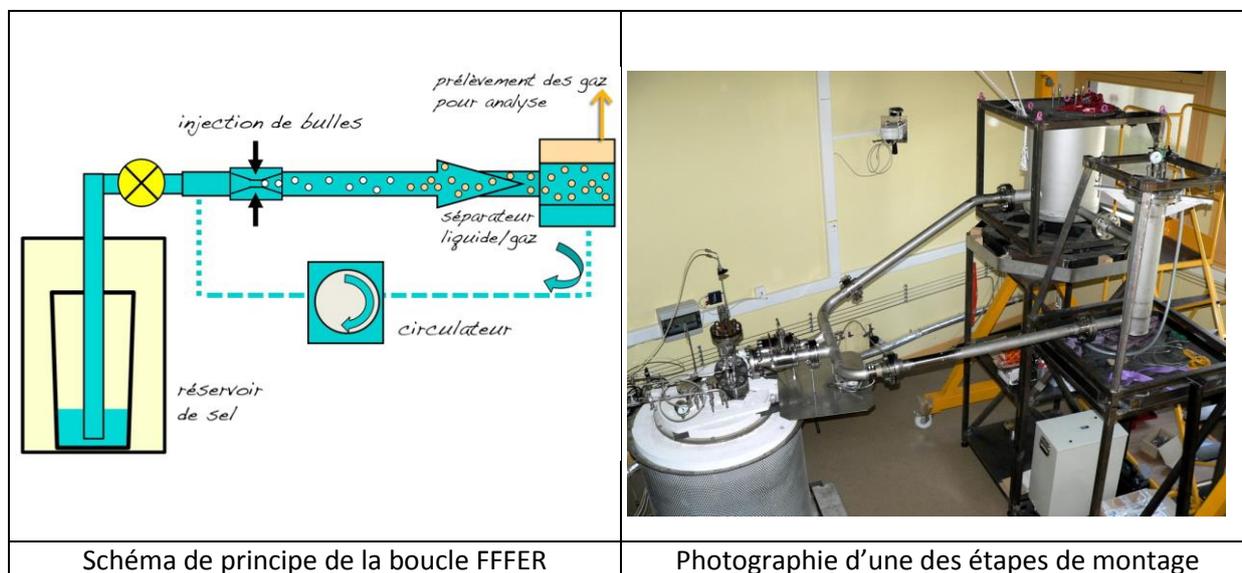
A l'état actuel du concept, le cœur du MSFR, est une cavité de 9 m<sup>3</sup> (environ 2,5m de haut par 2,5m de diamètre). De cylindrique pour les premières simulations, il évolue maintenant vers une forme plus adaptée aux écoulements, comme le montre la figure ci-dessous. Cette cavité est parcourue de bas en haut par le sel combustible (LiF-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>). Ce volume est bordé en haut et en bas par des réflecteurs neutroniques épais et latéralement par une couverture fertile favorisant la régénération. Lors de la traversée du cœur le sel combustible s'échauffe de 150°C via des réactions de fission. La recirculation de haut en bas se fait via 16 circuits composés chacun, d'une pompe, d'un échangeur de chaleur, et d'un système de nettoyage du sel. Ce système est séparé en deux parties, l'une située à l'arrivée en bas du cœur où se fait une injection de bulles de gaz, l'autre en sortie de cœur où doit se faire une séparation liquide/gaz efficace avant la traversée des échangeurs. En partie basse, un système redondant de vannes passives et actives permet de vidanger le sel combustible par gravité vers des réservoirs de vidanges dimensionnés pour assurer l'évacuation de la chaleur résiduelle à long terme sans risque de criticité.



## 2. Le projet FFER

Le Molten Salt Fast Reactor (MSFR) est un réacteur homogène dont le fonctionnement est basé sur les caractéristiques et les techniques de gestion de son combustible, un fluorure liquide. Les avantages de ce type de réacteur sont nombreux : la possibilité d'ajustement de la composition du combustible sans arrêt du réacteur, la diversité des modes de fonctionnement possible, le passage d'une configuration critique à sous critique par vidange ... mais tous ces avantages supposent de maîtriser sur le long terme les risques menant à la détérioration des circuits, des composants ou de la qualité du sel. Un des processus de préservation du système est de nettoyer de manière continue le combustible d'un point de vue « physique ». On ne cherche pas là à contrôler la composition globale du fluorure (cas du traitement chimique effectué par ailleurs sur des prélèvements) mais à extraire un certain nombre de produits de fission présents à l'état de gaz, de particules ou d'agrégats.

Même si cela peut paraître contradictoire à première vue, le processus le plus efficace, pour contrôler les gaz dissous et les particules en suspension dans un liquide, consiste à produire volontairement un flux de bulles correctement dispersées qui vont piéger les éléments à extraire. Les mécanismes mis en jeu sont basés sur des effets capillaires et les équilibres thermodynamiques naturels entre les phases gazeuses et liquides. Techniquement, l'étude approfondie de ces processus dans des conditions pertinentes par rapport au contexte des réacteurs à sels fondus demande la construction d'une boucle de sel fondu en régime de convection forcée. Dès lors qu'on aborde les aspects techniques, un objectif secondaire apparaît qui concerne la réhabilitation et le développement du savoir-faire expérimental dans le domaine des sels fondus, des liquides « hautes températures » et de l'instrumentation associée. Le projet FFER (Forced Flow for Experimental Research) intègre des travaux de type « étude de procédé » et des développements techniques. Il est centré sur la construction d'une boucle de sel (eutectique LiF-NaF-KF dont la température de fusion est 452°C) qui fonctionnera entre 550° et 700°.



### 3. Travaux en cours et perspectives

Les travaux, très interdisciplinaires, couvrent tous les champs allant de la conception des différents composants et du circuit, à la mise au point sur des maquettes hydrauliques en passant par la création d'instrumentation de contrôle et la caractérisation de certains matériaux après utilisation. Un effort supplémentaire est fait actuellement en direction des simulations thermo-hydrauliques pour lesquelles la boucle et ses versions maquettes sont directement l'instrument de validation. La mise en service se fera fin 2013 – début 2014, et ouvrira une période d'un an environ d'acquisition de résultats, sur le comportement des composants et sur le processus de bullage.

Toute l'équipe de travail depuis la conception jusqu'à la mise en œuvre est située au LPSC. L'émergence de ce projet, qui se voulait être un noyau initiateur et coordinateur d'actions expérimentales autour des concepts de Génération IV à caloporteur sels fondus a été le fruit d'un gros effort en terme d'intensité car reposant sur peu de personnes. A moyen terme, l'élan impulsé, malgré toutes ses potentialités, ne pourra se prolonger sans des marques d'intérêt nettes de la part d'organismes clefs dans le domaine de l'énergie tels le CEA, EDF ou AREVA.