

# HADRONS & NOYAUX, PHYSIQUE DES RÉACTEURS

Les hadrons sont des objets composites constitués de particules élémentaires, les quarks et les gluons. L'ensemble des hadrons inclut de nombreuses particules classées en baryons (proton et neutron entre autres) et mésons, les baryons étant composés de trois quarks et les mésons de paires quark-antiquark. Les interactions entre quarks et gluons au sein des hadrons sont décrites par la chromodynamique quantique (QCD) qui est la théorie de l'interaction forte.

Les propriétés des noyaux, constitués de protons et de neutrons, sont également régies par l'interaction forte. Cependant, il est difficile de décrire de tels systèmes complexes à partir des interactions entre les composants élémentaires des nucléons. Il est préférable de considérer des forces effectives pour prendre en compte l'influence du milieu nucléaire ambiant.

## La physique hadronique

La physique hadronique a pour objectif la compréhension de la structure des nucléons et des noyaux légers en termes de quarks et gluons et l'étude de la nature du confinement de ces derniers au sein des hadrons.

Pour les études expérimentales, la diffusion d'électrons polarisés d'énergie supérieure au GeV est un outil privilégié car elle permet d'explorer la structure interne des nucléons avec des résolutions inférieures aux dimensions de ceux-ci. Un grand nombre d'observables, en particulier celles qui font intervenir la polarisation des particules, peut ainsi être mesuré en fonction de la valeur de

la quadri-impulsion transférée, laquelle caractérise le pouvoir de résolution spatiale de la sonde.

Depuis près de 12 ans une équipe du LPSC travaille dans un programme de recherche en physique hadronique principalement auprès de l'accélérateur d'électrons du Thomas Jefferson National Laboratory en Virginie. Elle mesure des asymétries en diffusion élastique d'électrons polarisés sur des protons (expérience GØ). Des faisceaux de photons polarisés sont également utilisés pour les études expérimentales de la structure interne du nucléon. L'ensemble expérimental GRAAL qui était installé auprès de l'ESRF à Grenoble, était destiné à l'étude des propriétés des états excités du nucléon (résonances baryoniques) par l'intermédiaire de la mesure d'observables associées à la photoproduction de mésons sur le nucléon. Avec l'ouverture prochaine du LHC, un nouvel axe s'est ouvert dans le laboratoire, il consiste à étudier un plasma de quarks et gluons obtenu dans des collisions de noyaux lourds accélérés à de très grandes énergies. L'activité se focalisera sur l'étude de l'interaction des quarks avec ce plasma.

## La structure nucléaire

L'objectif de la physique nucléaire est la compréhension de la structure des noyaux à partir des interactions entre les nucléons. La thématique actuelle de la physique nucléaire est l'exploration d'états extrêmes du noyau que ce soit en asymétrie neutrons/protons (noyaux exotiques), en charge (noyaux super

lourds), en vitesse de rotation (noyaux super déformés) ou en énergie d'excitation (noyaux chauds), pour mieux comprendre l'interaction nucléon-nucléon. Pour explorer ces différents phénomènes nucléaires il faut disposer d'accélérateurs d'ions lourds, qui produisent des faisceaux d'énergie pouvant aller de quelques MeV à quelques centaines de MeV par nucléon (GANIL, GSI-FAIR), de faisceaux de protons accélérés à des énergies de l'ordre du GeV (ISOLDE/CERN), de faisceaux de neutrons thermiques produits par réacteur (ILL) et bientôt des faisceaux intenses d'ions radioactifs accélérés à quelques MeV par nucléon (SPIRAL-2). Les stations expérimentales sont composées de systèmes de détection de particules et/ou de rayonnements gamma très performants et/ou, plus rarement, d'électrons de conversion, les produits de réaction pouvant être sélectionnés avant détection à l'aide d'un spectromètre de masse ou d'un séparateur d'isotopes. Une équipe du LPSC travaille sur l'étude des noyaux exotiques riches en neutrons proches du noyau doublement magique  $^{132}\text{Sn}$  et dans la région de masse  $A \sim 100$  où des coexistences de forme ont été observées. De nouveaux isomères de durée de vie de l'ordre de la microseconde, ont été identifiés. Ces isomères ont été produits par fission induite par les neutrons thermiques du réacteur à haut flux de l'ILL de Grenoble. D'autres mesures à EUROGAM 2 concernent les noyaux de la région de masse  $A \sim 100$ .

### La physique des réacteurs

Le groupe de physique des réacteurs poursuit son travail sur les questions de développement de réacteurs innovants pour le nucléaire du futur. En ce qui concerne la mesure de données nucléaires, le spectromètre à temps de ralentissement de la plateforme PEREN, qui a été mis en service en 2004, a permis

de réaliser une étude de faisabilité de la mesure du rapport des sections efficaces de capture sur celle de fission de  $^{233}\text{U}$ . Cette étude a montré l'extrême difficulté de la mesure mais aussi sa nécessité pour valider les études par simulations numériques sur le cycle Thorium. La mise en place de la partie chimie de la plateforme PEREN s'est achevée en 2005 et a permis de réaliser la fabrication de lingots de  $^7\text{LiF}$  dans le but de mesurer la section efficace de diffusion élastique des neutrons sur le  $^7\text{Li}$ . Cette partie chimie est le lieu privilégié des études qui sont faites sur le bullage dans les réacteurs à sels fondus (RSF), technique qui permet au réacteur de rester régénérateur par l'extraction rapide des principaux poisons neutroniques du cœur du réacteur. Ce cœur de réacteur a encore fait l'objet de nombreuses simulations numériques qui ont permis de définir, pour la filière Thorium, des modes de démarrage basés sur l'utilisation des transuraniens issus des REP actuels. Ces scénarios de démarrages permettent d'utiliser les RSF comme brûleur des déchets de la filière actuelle tout en réalisant une transition vers le cycle Thorium. D'autres voies d'utilisation du cycle Thorium dans des réacteurs à eau sont aussi en cours d'étude dans le but de préserver les ressources en uranium naturel. Concernant les ADS, qui offrent de bonnes perspectives d'efficacité et de sûreté pour la transmutation des déchets nucléaires à haute activité et à vie longue, la mesure et le contrôle en ligne de la réactivité doivent être bien maîtrisés. C'était un des objectifs du programme MUSE maintenant achevé, réalisé auprès du réacteur MASURCA couplé à la source de neutrons pulsée GENEPI construite par le LPSC, et sera aussi l'objectif du projet GUINEVERE à Mol en Belgique auquel le groupe participe très activement mais qui sera décrit dans la partie concernant le service accélérateurs du LPSC.

## Structure des Nucléons et des Noyaux Légers

Jean-Sébastien Réal, Jonathan Dumas, Ahmed El Alaoui, Christophe Furget, Sébastien Gadrat, Rachid Guernane, Serge Kox, Malek Mazouz, Jean Mougey, Javier Rodriguez Vignote, Maud Versteegen (th), Éric Voutier

*Since 1995, our group has been working in hadronic physics using electron scattering reactions which probe nuclear target via the electromagnetic and weak forces. The goal is to explore and understand the internal structure of the nucleons (proton and neutron). The group is presently involved in the two phases of a parity violation experiment, GØ, which measure Parity Violation asymmetries in polarized elastic electron proton scattering. These asymmetries are sensitive to the strange quark content of the nucleon. We are also involved in a large experimental program which focus on the quark correlations in the nucleon (Generalized Parton Distribution). They can be measured in deep virtual Compton scattering experiment on proton and neutron. Finally, we are now involved in the study of a specific state of the nuclear matter, the quark-gluon plasma, which will be accessible in the ALICE experiment taking place at the LHC in Geneva.*

### Contenu Étrange du Nucléon: GØ

*Collaboration: Caltech, College of William and Mary, IPN Orsay, Jlab, TRIUMF, Virginia Tech, Yerevan Physics Institute, Universités de Carnegie-Mellon, Connecticut, Hampton, Illinois, Kentucky, Manitoba, Maryland, Massachusetts, New Mexico State, Northern British Columbia*

Dans les années 70, des expériences de diffusion d'électrons ont montré que le proton était formé de 3 quarks de valence (u, u, d). Toutefois, la structure interne des nucléons reste encore mal connue du fait de l'aspect non perturbatif de QCD dans le régime des basses énergies, conséquence des propriétés de l'interaction forte aux grandes distances entre quarks. Les hadrons sont constitués de quarks de valence – trois quarks de saveurs u et d pour les nucléons –, mais aussi de paires quark-antiquark  $q\bar{q}$  générées par les gluons, médiateurs échangés lors de l'interaction forte. Cet ensemble de gluons et de quarks virtuels forme une mer qui peut sensiblement influencer sur les propriétés globales des hadrons. Cette mer est indifféremment formée de quarks de saveurs u, d, s (étranges), c, b, t. Le quark étrange joue un rôle particulier puisque c'est le quark le plus léger de la mer, avec une masse proche de l'échelle d'énergie de QCD, qui ne possède pas de contribution de valence. Des expériences ont ainsi mis en évidence que les quarks étranges (s) de la mer contribuent à la structure – spin, masse... – du nucléon, mais avec de fortes incertitudes expérimentales ou théoriques. L'expérience GØ se propose de quantifier la contribution des quarks étranges cette fois-ci aux distributions de charge et de magnétisation (courant/spin) du nucléon, avec un minimum d'hypothèses physiques. Elle se situe dans un vaste programme international, conduit depuis une quinzaine d'années dans différents laboratoires.

Pour déterminer expérimentalement cette contribution, les facteurs de forme faibles du proton sont mesurés en diffusion élastique d'électrons polarisés longitudinalement sur des cibles cryogéniques d'hydrogène et de deutérium liquides. Dans ce processus, deux types d'interaction interviennent. L'interaction électro-

magnétique (échange de photons virtuels) qui domine dans notre domaine d'énergie, mais aussi l'interaction faible neutre (échange de bosons Z). La propriété de non-conservation de la parité de cette dernière induit une asymétrie de taux de comptage en fonction de la polarisation des électrons incidents. L'asymétrie est toutefois très petite ( $A \sim 2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}$ ), et l'expérience demande un contrôle soigneux des biais expérimentaux car une précision absolue meilleure que  $10^{-6}$  sera requise. Une série de mesures d'asymétrie, à différents angles de diffusion (cinématiques avant et arrière) et pour différentes cibles (hydrogène et deutérium) permet d'accéder aux distributions spatiales de charge et de magnétisation *faibles* dans le proton. En combinant les mesures des facteurs de forme électromagnétique (EM) sur le proton et le neutron, et des facteurs de forme faibles mesurés sur le proton, il est possible d'isoler la contribution individuelle de chacune des saveurs de quarks (pour cela il faut faire l'hypothèse de la symétrie d'isospin, et négliger les saveurs des trois quarks les plus lourds). Les facteurs de forme faibles et EM procurent en effet chacun des combinaisons différentes (en étant sensibles soit à leur charge faible ou à leur charge électrique) des mêmes distributions spatiales des quarks dans le nucléon.

L'expérience GØ permettra pour la première fois la séparation des facteurs de forme étrange électrique et magnétique et du facteur de forme axial du proton sur une gamme étendue de quadri-moments transférés ( $Q^2$ ). Cette séparation se déroulera en deux étapes. Dans une première phase, le choix a été fait de détecter les protons de recul aux angles avant lors de la diffusion sur une cible d'hydrogène, et dans la seconde phase les électrons diffusés aux angles arrière sur des cibles d'hydrogène et de deutérium.

Le dispositif expérimental utilisé est constitué d'un aimant supraconducteur à symétrie toroïdale et d'une cible cryogénique. Aux angles avant, la détection des protons était faite par un ensemble de 128 scintillateurs plastiques répartis sur huit secteurs et couplés à des photomultiplicateurs par des guides de lumière. Le LPSC et l'IPN Orsay ont collaboré depuis 1998 pour la construction de quatre des huit secteurs de détec-

tion ainsi que de l'électronique associée. Aux angles arrière, la détection des électrons est faite en rajoutant aux détecteurs existants 72 scintillateurs plastiques et 8 compteurs Cherenkov à aérogel répartis sur les huit secteurs. Le LPSC est impliqué depuis 2001 pour la construction de quatre des huit Cherenkov ainsi que d'une nouvelle électronique associée d'une part aux Cherenkov et aussi aux scintillateurs plastiques. La figure 1 montre l'ensemble du dispositif expérimental dans la phase angles arrière, qui a été installé fin 2005 dans le hall C du Jefferson Laboratory.

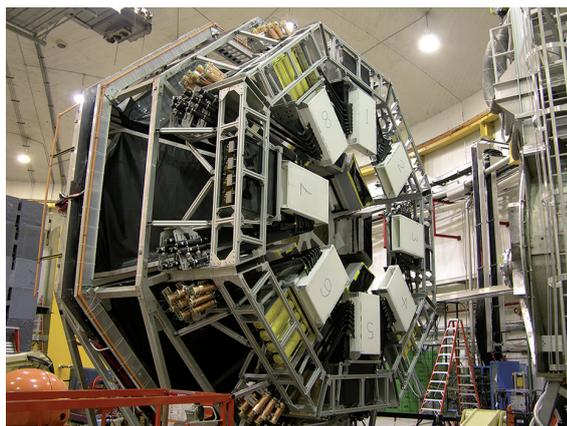


Figure 1 : Dispositif expérimental G0 dans le Hall C de JLab.

### Phase I

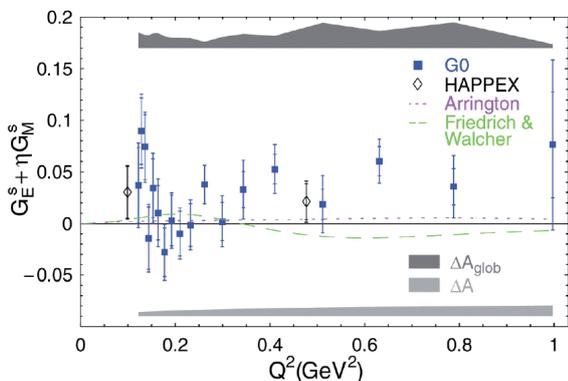


Figure 2 : Résultats de l'expérience G0 phase I.

L'analyse est maintenant terminée et a nécessité une forte implication de notre groupe. Les résultats des angles avant ont été publiés et ils accréditent une contribution non nulle des quarks étranges à 90 % de niveau de confiance. Une étude plus spéculative indiquerait que la variation en fonction du quadri-moment transféré  $Q^2$  observée sur la figure 2 pourrait être associée à la somme de deux facteurs de forme d'amplitude significative – la courbe verte de la figure 3 indique ce que serait une contribution de 10 % des quarks étranges aux distributions de charge du neutron et de magnétisation du proton – et de signe opposé. Les résultats de la phase II permettront de corroborer cette hypothèse.

### Phase II

Quatre séries de mesure ont eu lieu entre 2006 et 2007, deux énergies faisceaux avec à chaque fois deux cibles, pour un total de neuf mois d'expérience. Ces nouvelles mesures vont permettre de séparer les deux facteurs de forme dont la combinaison est représentée figure 2, et cela à deux cinématiques ( $Q^2=0,6$  et  $Q^2=0,25$ ). L'analyse est toujours en cours et devrait être terminée fin 2008. Nous sommes très impliqués dans tous les aspects de cette analyse qui fera l'objet de la thèse de M. Vertseegen en 2008. Les résultats permettront de connaître précisément la contribution du quark étrange dans le nucléon et sans doute de confirmer l'ordre de grandeur de 10 % observé avec les mesures aux angles avant.

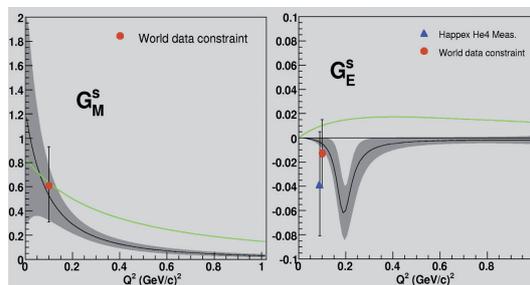


Figure 3 : Un des schémas possibles pour les deux contributions électrique et magnétique. La phase II de G0 permettra de contraindre ces contributions.

### Pour en savoir plus

- D.H. Beck et B.R. Holstein, Nucleon structure and parity-violating electron scattering, Int. Jo. Mod. Phys. E, 10 (2001)
- D. Armstrong et al., Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 092001
- B. Guillon, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, LPSC-0589 (2005)
- <http://www.jlab.org/>
- <http://lpsc.in2p3.fr/hadrons/hadrons.html>
- <http://www.npl.uiuc.edu/exp/G0/G0Main.html>

### Structure en quarks et gluons du nucléon

Collaboration : CEA Saclay, JLab et hall A, LPC Clermont, Old Dominion University

De la même façon que la diffusion de la lumière par un cristal procure des informations sur sa structure, la diffusion par un nucléon d'une lumière de longueur d'onde appropriée permet d'étudier sa structure interne en quarks et gluons, les partons. Dans ces expériences, dites de diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS), la source de lumière est constituée d'un faisceau de photons virtuels  $\gamma^*$  produit par un accélérateur d'électrons ultra-relativistes. La longueur d'onde associée à cette lumière est suffisamment petite

pour permettre de résoudre la structure interne du nucléon. À ces échelles, le processus DVCS se caractérise par l'absorption du  $\gamma^*$  par un parton suivi de l'émission quasi-instantanée d'un photon réel  $\gamma$  alors que le nucléon reste finalement intact. La distribution en énergie et en angle des  $\gamma$  émis permet de reconstituer la distribution des partons à l'intérieur du nucléon, en particulier dans le plan transverse à la direction du  $\gamma^*$ , dimension jusqu'alors inaccessible aux expériences.

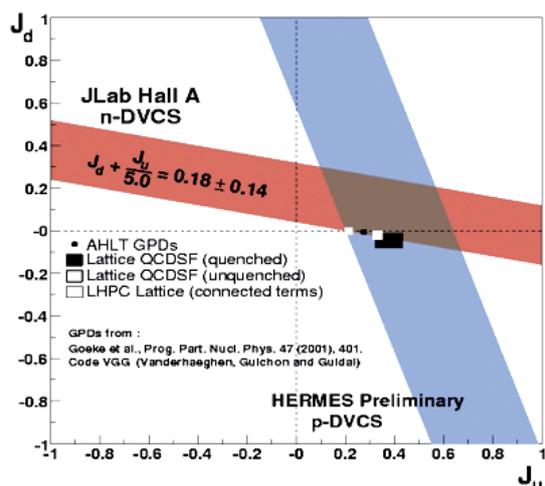


Figure 4 : Contraintes expérimentales sur la contribution des quarks  $u$  et  $d$  au moment angulaire du nucléon, déduites dans le cadre du modèle VGG des GPDs.

Au cours des deux dernières années, notre équipe a poursuivi son investissement dans le programme DVCS expérimental du Jefferson Laboratory (JLab). La première campagne de prises de données dans les Hall A et B de JLab a récemment délivré des résultats majeurs pour la poursuite de ce programme à JLab 6 GeV puis JLab 12 GeV et d'une manière plus générale pour l'étude des distributions généralisées de partons (GPDs) dans les réactions exclusives profondément inélastiques. La réaction de production de  $\gamma$  par un électron est décrite par deux mécanismes élémentaires indiscernables : le processus DVCS et le processus Bethe-Heitler (BH) dans lequel le  $\gamma$  est émis par l'électron incident ou diffusé. Le BH est cependant exactement calculable et parfaitement connu à partir des facteurs de forme électromagnétique du nucléon. Il est de plus, contrairement au DVCS, insensible à la polarisation du faisceau d'électrons. La différence entre les sections efficaces pour deux états d'hélicité opposée d'un faisceau d'électrons polarisé longitudinalement permet alors de déterminer la partie imaginaire de l'amplitude DVCS et la somme de ces mêmes sections efficaces permet d'atteindre sa partie réelle. Ces deux grandeurs recèlent l'information précieuse sur la structure en partons du nucléon codée sous forme de GPDs. Les mesures sur une cible de proton ont établi l'indépendance de la section efficace en fonction de la longueur d'onde du  $\gamma^*$  aux énergies de JLab, un pré-requis obligatoire avant toute étude

systématique ; indiqué une importance insoupçonnée de l'amplitude DVCS dans cette gamme d'énergie. Les mesures sur une cible de deutérium ont permis d'extraire pour la première fois la partie imaginaire des amplitudes DVCS sur le deuteron et le neutron. La sensibilité du canal neutron à la contribution du quark  $d$  au moment angulaire du nucléon a été démontrée et des contraintes sur sa valeur (figure 4) ont été déduites dans le cadre d'un modèle de GPDs. Dès lors, les expériences sur le neutron apparaissent comme une étape obligatoire dans la chasse au moment orbital des quarks, qui constituerait la brique ultime du puzzle du spin du nucléon.

## Facteurs de forme électromagnétique

Collaboration : JLab et hall A, MIT, Universités de California State et Rutgers

L'influence du milieu nucléaire sur les propriétés de la matière hadronique est une réalité qui a été observée dans de nombreuses expériences : en diffusion profondément inélastique, les distributions de partons dans un noyau ont été trouvées différentes des distributions d'un nucléon libre ; dans les expériences  $(e,e'p)$  d'expulsion d'un proton du noyau, des indications existent soutenant d'éventuelles modifications des propriétés électromagnétiques des nucléons.

Notre groupe a poursuivi ces études dans ce domaine dans le contexte d'une séparation des réponses longitudinale et transverse dans la réaction  ${}^3\text{He}(e,e'p)$  pour des photons virtuels de grande résolution ( $Q^2 = 4 \text{ GeV}^2$ ). Dans cette gamme d'énergie, l'ampleur des effets attendus pourraient permettre d'identifier sans ambiguïté la nature et l'origine des mécanismes nucléaires mis en cause. Les résultats définitifs seront bientôt disponibles.

### Pour en savoir plus

C. Muñoz Camacho et al., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 262002

M. Mazouz, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 2006

M. Mazouz et al., Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 242501

## Étude du plasma de quarks et de gluons auprès de l'expérience ALICE au CERN

Collaboration : ALICE

L'expérience ALICE « A Large Ion Collider Experiment », qui est en cours d'installation au CERN, sera la seule des quatre grandes expériences auprès du collisionneur LHC « Large Hadron Collider » dédiée à la physique des ions lourds ultra-relativistes. Son objectif scientifique est d'explorer la structure de la matière

nucléaire à haute densité d'énergie dans un domaine où la Chromodynamique Quantique (QCD) prédit le déconfinement des quarks et des gluons, avec l'étude du **Plasma de Quarks et de Gluons (QGP)**. Celle-ci permettra d'apporter un éclairage unique sur l'application de la QCD à un système complexe de dimension finie, dans des conditions extrêmes de pression et de température semblables à celles qui ont prévalu aux premiers instants de l'Univers. À ce jour les expériences les plus en pointe, qui se déroulent aux États-Unis (RHIC au BNL), semblent indiquer la formation d'un état proche du QGP initialement prédit bien que présentant des propriétés inattendues. La nouvelle montée en énergie permise avec la mise en service du LHC, prévue pour 2007, permettra d'explorer un terrain vierge pour caractériser les propriétés de ce nouvel état de la matière, avec des températures, pressions et temps de vie de la phase déconfinée beaucoup plus élevés qu'au RHIC.

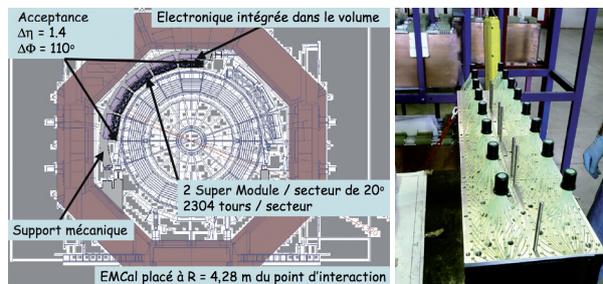
Parmi les nombreuses observables expérimentales, l'étude de la perte d'énergie de partons produits dans les collisions les plus violentes sera particulièrement intéressante pour l'étude du QGP. En effet, ces partons interagissent avec le milieu dense produit au cours de la collision et perdent une partie de leur énergie par rayonnement de gluons ou par chocs élastiques. Ensuite les partons fragmentent pour donner un jet de particules dont les distributions spatiales et en énergie dépendent de la perte d'énergie du parton initial (**phénomène de jet-quenching**). Ainsi, la mesure détaillée de la structure des jets permet d'étudier la nature du milieu traversé (QGP ou matière nucléaire) et d'en mesurer ses propriétés.

L'IN2P3-CNRS et le DAPNIA-CEA sont fortement impliqués dans le projet ALICE, avec la responsabilité de la construction et de la mise en œuvre d'éléments clef de l'expérience. Notre groupe a déjà contribué en 2005-2006 au sein de l'expérience ALICE à une réalisation technique importante sur le bras di-muons, en étroite collaboration avec l'IPN-Lyon, ce qui nous a déjà permis de prendre pied dans la collaboration.

Depuis 2006, nous nous sommes impliqués dans l'étude du jet-quenching, en participant à la construction d'un nouveau **calorimètre électromagnétique EMCal** dans le cadre d'une collaboration française (Nantes, Strasbourg et Grenoble), italienne (Catane et Frascati) et américaine (Wayne State Univ., Berkeley, Oak Ridge, Yale...). L'adjonction de ce calorimètre va permettre d'accroître les performances de déclenchement des jets d'énergie élevée (jusqu'à des énergies de 250 GeV) et d'améliorer leur mesure en énergie. De plus, ce calorimètre étendra de façon importante les capacités de la mesure des photons de grandes énergies produits en corrélation avec un jet. Ces performances ajoutées à celles, uniques, offertes par ALICE pour la trajectographie et l'identification des particules à partir de très petites impulsions, permettront d'étudier les distributions spatiales et en énergie des hadrons dans les jets pour l'étude du jet quenching.

EMCal, qui est placé à une distance de 450 cm du point d'interaction, couvre un quart de l'acceptance totale du tonneau central d'ALICE avec 11 SuperModules. Chaque SuperModule comprend 1152 tours, pointant dans la direction du vertex, les tours étant constituées d'une succession de couches de plomb (1,44 mm) et scintillateur (1,76 mm). La lumière de scintillation est collectée par 36 fibres optiques à décalage de longueur sur un détecteur APD. L'analyse préliminaire de test sous faisceau indique une résolution en énergie de l'ordre de  $10\%/\sqrt{E} \oplus 2\%$  pour des électrons d'énergies comprises entre 3 et 35 GeV/c.

Notre groupe a pris la responsabilité d'activités techniques importantes. Le service d'instrumentation (SDI) a pris en charge l'assemblage et les tests de 6-7 SuperModules, qui seront réalisés dans le hall ARIANE. Des mesures de calibration seront réalisées en collaboration avec les physiciens du groupe. Le service d'électronique est également impliqué dans la fabrication d'une carte de déclenchement de jets de niveau L1. Les échéances de construction s'étalent entre 2008 et 2011. En 2007, nous avons participé de septembre à novembre à des tests des prototypes sous faisceau au CERN, avec la mise en service de MWPCs et la participation à l'analyse des données. Celles-ci seront utilisées pour définir les procédures de calibration en cosmiques qui sera réalisée au laboratoire. Un travail de simulation a été également initié en 2007 au laboratoire, effort qui sera poursuivi en 2008.



Figures 5 et 6 : À gauche, vue d'ensemble de EMCal sur son support de structure. À droite, plusieurs tours sont assemblées. Les sorties des fibres optiques sont visibles, convergeant vers les APD (parties supérieures).

## Spectroscopie baryonique à GRAAL

Dominique Rebreyend, Jean-Paul Bocquet, Annick Lleres

Collaboration : IPN Orsay, INFN Italie, INR Moscou, KIAE Moscou

*During the two last years, our activity has been mostly devoted to the analysis of photoproduction reactions on proton and neutron and their publication. Results were published for  $\pi^0 p$  and  $\eta p$  (beam asymmetries  $\Sigma$  and differential cross sections) as well as for  $K^+ \Lambda$  and  $K^+ \Sigma^0$  ( $\Sigma$  and recoil polarizations  $P$ ) final states. Results for the  $\eta n$  channel were also extracted (beam asymmetry  $\Sigma$  and preliminary differential cross section). The  $\eta n$  cross section exhibits an interesting resonant structure not seen in  $\eta p$  whereas the beam asymmetries are rather similar. The interpretation of the structure observed in the cross section is not yet clear.*

L'ensemble expérimental GRAAL est constitué d'un faisceau de photons polarisés d'énergie maximale 1,5 GeV, obtenu par diffusion Compton d'un faisceau laser sur les électrons circulant dans l'anneau de l'ESRF de Grenoble, associé à un dispositif de détection  $4\pi$  de particules chargées et neutres. Cet appareillage est destiné à la mesure d'observables liées à la photoproduction de mésons ( $\pi, \eta, \omega$  et  $K$ ) sur le proton et le neutron. Le but de cette expérience est l'étude des propriétés des états excités (résonances baryoniques) du nucléon.

Les asymétries faisceau  $\Sigma$  et les sections efficaces différentielles associées à la photoproduction de mésons  $\pi^0$  et  $\eta$  sur le proton ont été mesurées. Pour les réactions de photoproduction de  $K^+$  sur le proton, l'asymétrie faisceau  $\Sigma$ , de même que la polarisation  $P$  du baryon de recul ( $\Lambda$  et  $\Sigma^0$ ), ont été extraites. L'ensemble de ces résultats a été publié récemment [1,2,3]. La mesure originale de l'asymétrie faisceau pour les réactions  $K\Lambda$  et  $K\Sigma$  a permis d'étendre la base de données relative à la photoproduction d'étrangeté et son exploitation théorique a montré la nécessité d'introduire un nouvel état  $D_{13}$  autour de 1900 MeV. Des valeurs préliminaires pour les observables de double polarisation  $O_x$  et  $O_z$  et pour l'asymétrie cible  $T$  ont été extraites pour le canal  $K\Lambda$ . Ces données sont en cours de finalisation et feront l'objet d'un article courant 2008.

Des mesures sur la photoproduction de  $\eta$  sur le neutron ont également été effectuées. Les sections efficaces différentielles obtenues présentent une structure résonnante aux alentours de 1670 MeV [4], totalement absente sur le proton. Différentes analyses théoriques de ces données préliminaires et de celles obtenues par d'autres dispositifs expérimentaux (CB-ELSA/TAPS et LNS-GeV- $\gamma$ ) ont été faites. Elles montrent que cette structure pourrait en particulier être interprétée par une interférence de résonances ou par un état étroit de type pentaquark. Les asymétries faisceau  $\Sigma$  mesurées par GRAAL pour le canal  $\eta n$  [5] ne présentent pas de différences marquantes par rapport à celles mesurées pour le canal  $\eta p$  et ne permettent pas de privilégier une interprétation particulière.

Dans un tout autre domaine de physique, l'expérience GRAAL a permis d'améliorer de manière importante la limite supérieure de l'isotropie de la vitesse de la lu-

mière (collaboration avec des physiciens de Yerevan). La stabilité du front Compton mesuré par le système d'étiquetage au cours des prises de données 1997-2002 a été étudiée en fonction de l'angle entre la direction des électrons de l'ESRF et l'apex du dipôle du rayonnement CMB. Les résultats ont ainsi permis d'obtenir une contrainte conservative sur l'anisotropie des variations de la vitesse de la lumière  $\Delta c/c < 3.10^{-12}$  [6], qui améliore de deux ordres de grandeur la précédente limite. De nouvelles mesures, spécifiquement dédiées à cette problématique, sont prévues fin 2007 dans le but d'améliorer cette limite. Une nouvelle électronique et un nouveau système d'acquisition ont été installés, permettant la mesure du spectre Compton avec une très grande statistique sur des temps très courts.

- 1 O. Bartalini et al., Eur. Phys. J. A26 (2005) 399
- 2 A. Lleres et al., Eur. Phys. J. A31 (2007) 79
- 3 O. Bartalini et al., Eur. Phys. J. A33 (2007) 169
- 4 D. Rebreyend et al., Int. J. Mod. Phys. A20 (2005) 1554
- 5 A. Fantini et al., article soumis à Phys. Rev. C
- 6 V.G. Gurzadyan et al., Mod. Phys. Lett. A20 (2005) 19

# Structure nucléaire

Gary Simpson, Jean-Claude Angélique, Janine Genevey, Jean-Alain Pinston

## Déformations Triaxiales dans $^{105,107}\text{Mo}$ , $^{107}\text{Tc}$

Collaboration : ILL, Argonne National Laboratory, Universités de Varsovie et de Manchester

The neutron-rich mass 100 region of the nuclear landscape is known to be plentiful in nuclear shape phenomena. Studies here can give insights in the mechanisms and origins of deformation. Molybdenum nuclei with 60 to 66 neutrons are known to exhibit triaxial deformation, however different theories exist regarding the onset of this deformation. To clarify this situation the nuclear structures of  $^{105,107}\text{Mo}$  and  $^{107}\text{Tc}$  have been investigated using prompt-fission gamma-ray spectroscopy with EUROGAM-2 and isomer spectroscopy at the Lohengrin spectrometer, ILL. The experimental level energies and decay patterns of these three nuclei are well reproduced by simple particle-rotor calculations, assuming that these nuclei have a triaxial deformation of  $\gamma \sim 18^\circ$  and a quadrupole deformation of  $\varepsilon_2 \sim 0.3$ . The energy-level staggering observed in these nuclei is close to that of the neighboring even-mass nuclei, showing that these parameters represent the deformation of the core.

Une grande variété de formes est observée dans les noyaux de Sr et de Zr dans la région de la masse 100, entre 58 et 64 neutrons. Les noyaux avec  $N \leq 58$  sont plutôt sphériques. Pour les noyaux avec  $N=59$ , il est bien établi que trois formes différentes coexistent [1]. L'état fondamental et les états de bas spin sont sphériques, des bandes avec une déformation ( $\beta_2 \sim 0,3$ ) et des spins intermédiaires apparaissent autour d'une énergie de 600 keV et la déformation maximale de la région est obtenue pour la bande 9/2[404] avec une énergie d'excitation de  $\sim 1$  MeV. Ces trois formes différentes sont aussi présentes dans  $^{101}\text{Zr}$ . Pour les noyaux avec  $N > 59$  des bandes avec des déformations axiales importantes sont observées dans les isotopes de Sr et Zr bien que des phénomènes de coexistence de formes soient toujours présents dans les noyaux pair-pair avec  $N=60$ . Nous avons montré [1] que les orbites de parité uni-

que jouent un rôle très important pour expliquer les coexistences de forme et l'origine de la déformation. Dans les noyaux de  $^{104-108}\text{Mo}$  la situation est différente. Ces noyaux sont fortement déformés ( $\beta_2 \sim 0,4$ ) mais en même temps, l'énergie des niveaux de la bande gamma  $K_\pi=2^+$  diminue lorsque le nombre de neutrons augmente, ce qui suggère que le degré de liberté triaxial joue un rôle important dans ces noyaux. La nature de la déformation triaxiale dans ces noyaux n'était pas bien comprise. Les calculs de Skalski [2] prédisent des déformations triaxiales ( $\gamma=19-21^\circ$ ) pour ces noyaux. Par contre, l'article de Smith [3] suggère que la déformation est dynamique: avec  $\gamma=0^\circ$  à bas spins et un changement dans la déformation triaxiale, à cause de la rotation, à des spins moyens. Ce dernier effet s'explique par l'observation d'une réduction du moment quadrupolaire vers les spins 10-12  $\hbar^3$ .

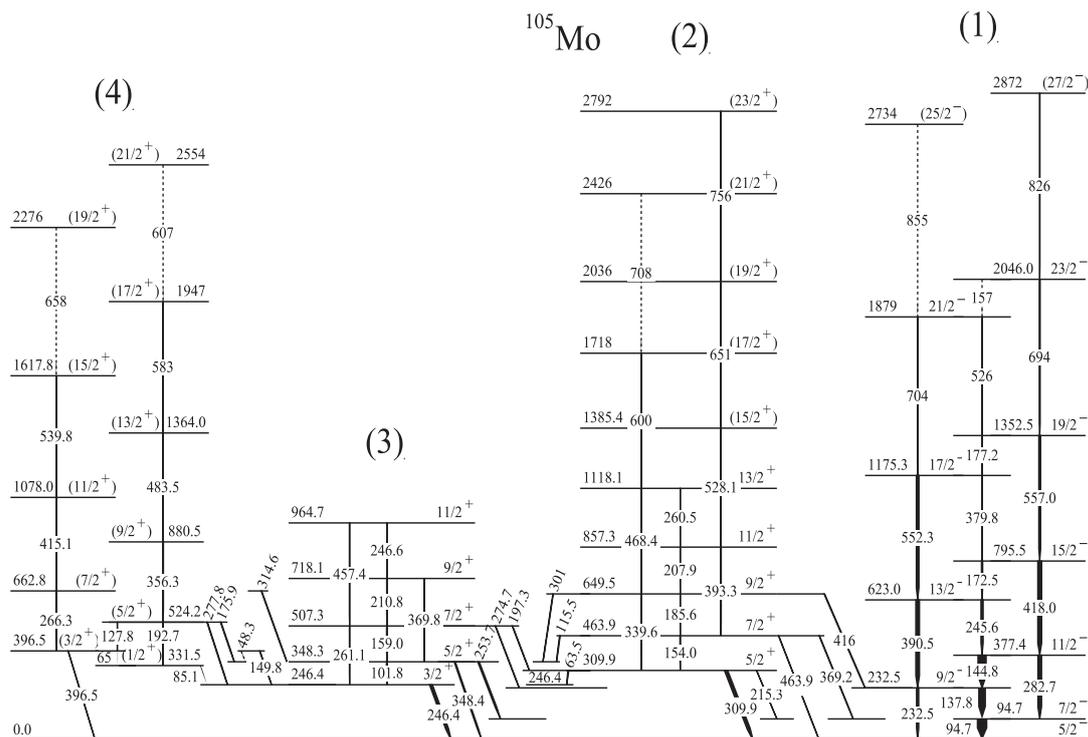


Figure 7

L'étude expérimentale de la déformation triaxiale dans des noyaux de Mo impairs est beaucoup moins avancée. Pour cette raison nous avons étudié les noyaux de  $^{105,107}\text{Mo}$  avec d'une part, le spectromètre de masse de l'ILL, ce qui a nous permis d'observer des gammas retardés, et, d'autre part, en utilisant les données d'une expérience de fission spontanée de manière à avoir des informations sur les gammas prompts [4]. Le schéma de  $^{105}\text{Mo}$  est présenté dans la figure 7.

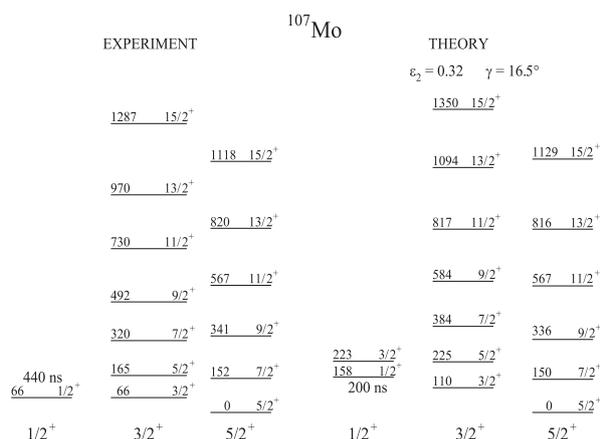


Figure 8

En utilisant un modèle quasiparticule + rotor nous sommes capable de reproduire très bien dans ce noyau, les énergies des états, les rapports de branchement, les durées de vie et les moments magnétiques en considérant une déformation  $\gamma \sim 17^\circ$ , les résultats expérimentaux sont mal reproduits avec  $\gamma=0$ . Le cas de  $^{107}\text{Mo}$  est similaire, une déformation  $\gamma$  de  $16,5^\circ$  est utilisée pour ce noyau. Pour les états de parité négative, l'énergie de l'état  $5/2^-$  n'est pas parfaitement reproduit dans les

calculs de  $^{105}\text{Mo}$ . Cet état a comme composante principale l'orbite  $h_{11/2}$ , issue de la couche  $N=5$ , et il est peut-être possible que les paramètres du modèle changent.

Il est instructif d'essayer de calculer les noyaux voisins de Mo pair-pair avec la même méthode. Les calculs peuvent reproduire les niveaux expérimentaux en utilisant une déformation  $\gamma \sim 20^\circ$ . Les autres paramètres, comme la déformation quadrupolaire sont similaires à ceux utilisés pour les noyaux impair de Mo. En conclusion, dans la région  $N=62-66$  la déformation quadrupolaire et la déformation gamma sont comparables pour les noyaux pairs-pairs et impairs, ce qui suggère que tous ces noyaux ont un cœur comparable. L'hypothèse d'une déformation triaxiale stable à bas spins pour la bande fondamentale de  $^{104-108}\text{Mo}$  est en accord avec les calculs de Skalski *et al.*

Pour examiner l'influence du couplage d'un proton impair dans ces noyaux, nous avons aussi étudié le noyau  $^{107}\text{Tc}$  avec le spectromètre Lohengrin [5]. Ces mesures nous ont aussi permis de tester nos calculs. Nous avons été capable de reproduire les niveaux expérimentaux avec des paramètres très similaires à ceux utilisés pour le calcul des Mo ( $\gamma \sim 20^\circ$ , déformation  $\epsilon_2 \geq 0,35$ ).

Nos expériences et calculs ont montré un panorama cohérent des propriétés de ces noyaux. Ils ont une déformation triaxiale dès le niveau fondamental, avec  $\gamma \sim 17-20^\circ$ .

- 1 W. Urban, J.A. Pinston, *et al.*, Eur. Phys. J. A **22** (2004) 241
- 2 J. Skalski, *et al.* Nucl. Phys. A **617** (1997) 282
- 3 A.G. Smith *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77** (1997) 1711
- 4 J.A. Pinston *et al.*, Phys. Rev. C **74** (2006) 064304
- 5 G. Simpson *et al.*, Phys. Rev. C **75** (2007) 027310

## Nouvelles données sur l'isomère dans $^{136}\text{Sb}$

Collaboration : ILL, Université de Naples, Laboratoire National de Legnaro, Laboratoire Rutherford Appleton

*New information has been obtained on the isomeric cascade of  $^{136}\text{Sb}$  from gamma-ray and conversion-electron spectroscopy performed at the Lohengrin spectrometer of the ILL. This very neutron-rich nucleus, which is close to the doubly magic  $^{132}\text{Sn}$  allows the ingredients of shell-model calculations to be tested.  $^{136}\text{Sb}$  is the most neutron-rich Sb nucleus for which spectroscopic information exists. State-of-the art shell-model calculations were able to correctly reproduce the experimental level scheme, showing that no shell-structure modifications are necessary to explain presently existing data beyond  $^{132}\text{Sn}$ .*

L'étude des noyaux très riches en neutrons proches du noyau doublement magique  $^{132}\text{Sn}$  permet de tester les interactions nucléon-nucléon utilisées dans les calculs de modèle en couches, dans une région située très loin de la ligne de stabilité. Dans ce contexte, les isotopes de l'Antimoine (Sb) avec un seul proton au-dessus de la couche pleine, sont particulièrement intéressants pour tester les éléments de matrice de l'interaction neutron-proton, entre nucléons de valence situés dans deux couches différentes. Récemment, la spectroscopie gamma des noyaux  $^{134,135}\text{Sb}$ , peuplés par décroissance bêta des Sn, a été mesurée au CERN [1]. Ces mesures ont montré que les niveaux contenant l'orbite

de proton  $vd_{5/2}$  sont trop bas en énergie par rapport aux prédictions théoriques du modèle en couches. Cet effet a été interprété comme une possible diminution des effets de couches. Ces résultats ont motivé de nouveaux efforts théoriques et expérimentaux. Le groupe de Naples a recalculé l'interaction nucléon-nucléon dans cette région en utilisant une technique différente: le « Q-box folded diagrammes ». Ces calculs [2] reproduisent très bien les énergies des états excités dans les noyaux  $^{134,135}\text{Sb}$ . Pour mieux tester ces calculs nous avons étudié le noyau  $^{136}\text{Sb}$ .

Le noyau  $^{136}\text{Sb}$  (avec  $N/Z=1,67$ ) est le noyau le plus riche en neutrons, proche de  $^{132}\text{Sn}$  avec  $N>82$ , pour lequel

il existe des informations de spectroscopie. Ce noyau a été étudié à GSI<sup>3</sup>, mais un seul rayon gamma retardé de 173 keV a été observé. Ce seul résultat ne peut pas expliquer l'origine de l'isomère microseconde mesuré. Avec le spectromètre de produits de fission Lohengrin de l'ILL, nous avons mesuré des rayons gamma, des rayons X et des électrons de conversion retardés en coïncidence avec les ions de A=136. Ces mesures nous ont permis d'identifier les énergies et multipolarités de deux nouvelles transitions dans <sup>136</sup>Sb, une transition E2 de 51,4 keV et une transition M1 de 53,4 keV.

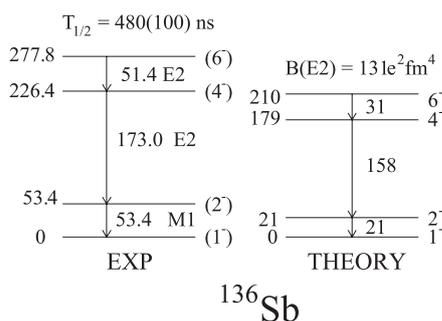


Figure 9

Des calculs théoriques de modèle en couches, utilisant des interactions effectives réalistes, ont été effectués par le groupe de Naples. Ces calculs, illustrés dans la figure 9, sont en bon accord avec les mesures expérimentales. La configuration dominante de ces états correspond au multiplet  $\pi g_{7/2} \nu (f_{7/2})$  [3]. La comparaison de ces mesures avec les calculs du groupe de Naples montre que des modifications de l'interaction nucléon-nucléon ne sont pas nécessaires dans cette région, située loin de la stabilité.

Nous avons aussi mesuré des états excités dans <sup>138</sup>I à partir d'une expérience à Lohengrin et d'une expérience de fission spontanée [4]. Les calculs, fait avec des in-

teractions nucléon-nucléon conventionnelles prédisent une énergie trop élevée pour les états qui contiennent l'orbite de proton  $d_{5/2}$ , ce qui a déjà été observé pour <sup>134,135</sup>Sb. Une diminution de l'énergie de cette orbite permet de reproduire les niveaux d'énergie de ces noyaux. Compte tenu du fait que le noyau de <sup>138</sup>I est relativement proche de la ligne de stabilité, il est difficile d'attendre des effets d'affaiblissement de la couche pour <sup>138</sup>I. En conclusion, nous pensons que les problèmes liés aux énergies des états contenant l'orbite de proton  $d_{5/2}$  proviennent de calculs incorrects d'éléments de matrice, réalisés avec des interactions conventionnelles.

En plus de ces tests du modèle en couches, ces mesures sont aussi intéressantes pour l'astrophysique nucléaire parce que la connaissance des propriétés des noyaux très riches en neutrons est nécessaire pour modéliser correctement le processus-r. On pense que le processus-r se produit pendant des explosions de supernovae de type II. Il est responsable de la production d'environ la moitié des noyaux plus lourds que le fer présents dans l'univers. Donc, il est très important d'avoir des informations théoriques et expérimentales fiables sur les propriétés nucléaires loin de la stabilité. Ceci est particulièrement vrai pour les masses A=120-130, où les calculs sont incapables de reproduire les abondances trouvées sur terre. Une explication de cet effet est une possible diminution des effets de couches, pour un grand excès de neutrons. Cependant, nos résultats sur <sup>136</sup>Sb et quelques autres noyaux comme les mesures de <sup>130</sup>Cd à GSI [5], ont montré que les calculs de modèles en couches sont corrects dans la région proche de <sup>132</sup>Sn.

- 1 J. Shergur, *et al.* Phys. Rev. C 65 (2002) 034313
- 2 L. Coraggio, *et al.* Phys. Rev. C 73, (2006) 031302(R)
- 3 M. Mineva *et al.* Eur. Phys. J. A 11 (2001) 9
- 4 T. Rzaca-Urban *et al.* Phys. Rev. C 75 (2007) 054319
- 5 A. Jungclaus *et al.* Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 132501

## Étude des noyaux de tellure déficient en neutrons

Collaboration : CERN, IPN Orsay, Laboratoire Aimé Cotton, TANDAR/CNEA Buenos Aires, Université de Mc Gill, Mayence et New York

*Laser spectroscopy measurements have been carried out on the neutron deficient <sup>116-118</sup>Te isotopes with the COMPLIS experimental setup. The hyperfine spectra were recorded. In spite of the weak production rates, the variation of the mean square charge radius  $\delta \langle r^2 \rangle$  between these nuclei was obtained from the isotope shift and compared to theoretical calculations.*

Les études de spectroscopie laser donnent accès aux moments nucléaires (magnétique et quadrupolaire) et à la variation de rayon carré moyen de charge ( $\delta \langle r^2 \rangle$ ) et apportent donc des informations directes sur la déformation des noyaux. Ainsi, dans les séries isotopiques d'étain (Z=50), d'indium (Z=49) et de cadmium (Z=48) [1,2,3], la courbe de  $\delta \langle r^2 \rangle$ , parabolique, traduit l'existence d'effets dynamiques importants alors que, pour les séries isotopiques de Z≥54, la forme de cette courbe indique la prépondérance des déformations quadrupolaires. L'étude des noyaux de tellure

déficients en neutrons avait pour but de déterminer lequel de ces deux phénomènes (déformations quadrupolaires ou effets dynamiques) est prédominant dans cette série isotopique.

L'expérience a été effectuée à ISOLDE. Les noyaux de tellure déficients en neutrons ont été produits en bombardant par le faisceau de protons du PS-booster une cible d'oxyde de cérium associée à une source d'ions à plasma chaud. C'était la première fois qu'un tel ensemble cible-source d'ions était utilisé et nous avons

donc également effectué un test de cible. Pour différentes températures de la cible, les productions ont été mesurées pour la masse 117 (correspondant au maximum de section efficace pour les isotopes de tellure) et trouvées 700 fois inférieures aux valeurs attendues. Nous avons recherché, sans succès, si les noyaux de tellure sortaient sous forme de composés moléculaires comme  $\text{TeO}$ ,  $\text{TeO}_2$  ou  $\text{TeCO}$ . Malgré les faibles taux de productions obtenus ( $\sim 106$  atomes/ $\mu\text{C}$  pour  $^{117}\text{Te}$ ), nous avons réussi à mesurer le déplacement isotopique de deux isotopes de tellure déficitaires en neutrons,  $^{118}_{52}\text{Te}_{66}$  et  $^{116}_{52}\text{Te}_{64}$ , atteignant ainsi un isotope de tellure en deçà du milieu de couche neutron  $N=66$ . Les mesures de spectroscopie laser ont été réalisées par l'ionisation résonnante en trois étapes des atomes de tellure désorbés par laser en utilisant le dispositif COMPLIS. Le déplacement isotopique a été obtenu en balayant en fréquence la première étape d'excitation atomique (transition  $5p4\ 3P2 \rightarrow 5p3\ 6s\ 3S1$  à  $214,35\ \text{nm}$ ). La courbe des rayons de tellure, incluant les points déduits de cette mesure, est présentée sur la figure 10 et comparée aux résultats de calculs théoriques prenant ou non en compte les effets dynamiques [4]. Il ressort clairement de cette figure que, dans la série isotopique des tellures, les effets dynamiques sont prépondérants, en particulier en milieu de couche neutron.

1 J. Eberz et al., Z. Phys. A326 (1987) 121

2 H.J. Kluge and W. Nörtershäuser, Spectrochimica Acta B58 (2003) 1031

3 F. Le Blanc et al., Phys. Rev. C72 (2005) 03430

4 J. Libert, B. Roussière, J. Sauvage, Nucl. Phys. A786 (2007) 47

5 G. Fricke et al., At. Data Nucl. Data Tables 60 (1995) 177

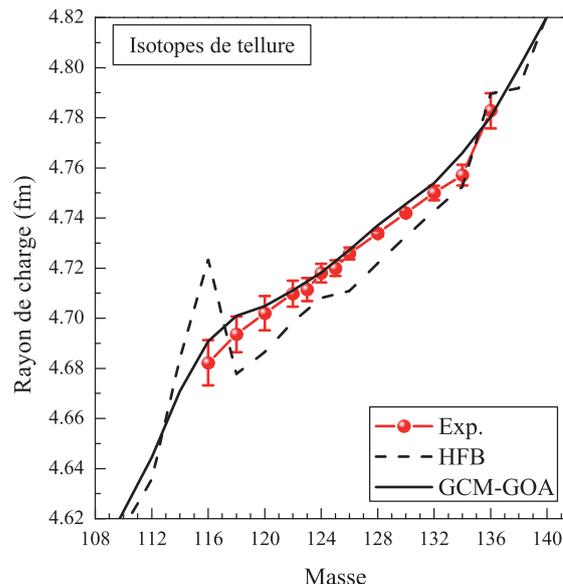


Figure 10: Rayons de charges expérimentaux et calculés pour les isotopes de tellure. Les valeurs expérimentales ont été obtenues en calibrant les valeurs de déplacement isotopique mesurés pour les isotopes stables avec les mesures de rayons obtenues dans les expériences d'atomes muoniques [5]. Les valeurs théoriques correspondent aux résultats statiques (HFB) et dynamiques (GCM-GOA) obtenus dans le cadre d'un modèle microscopique de mélange de configurations [4].

## Physique des Réacteurs

Daniel Heuer, Annick Billebaud, Roger Brissot, Marie-Anne Cognet (th), Véronique Ghetta, Perrine Guillemain (th), Christian Le Brun, Éric Liatard, Olivier Méplan, Elsa Merle-Lucotte, Alexis Nuttin

The research activities of the Reactor Physics Group are being related to the development of innovative electro-nuclear systems. Concerning the measurement of nuclear data, the slowing time spectrometer of the PEREN platform, operated since 2004, has been used to evaluate the feasibility of the measurement of the alpha ratio (capture cross-section over fission cross-section) of  $^{233}\text{U}$  on such an experimental setup. This study has pointed out the extreme difficulties of this measurement but has also demonstrated its necessity to validate the numerical simulations based on the Thorium fuel cycle. The chemical part of the PEREN platform has been completed in 2005, allowing the fabrication of  $^7\text{LiF}$  ingots for latter measurements of the neutrons elastic cross-section of  $^7\text{Li}$ . These chemical facilities have mainly been designed for current studies on Helium bubbling in molten salt reactors (MSR), technique which will allow a quick extraction of the main neutronic poisons out of the fuel salt of such reactors. The concept of such reactors called Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) and developed in the group for some years have been further studied via numerical simulations. This has resulted, for the reactors operated in the Thorium fuel cycle, in the definition of launching modes using the transuranian elements produced in the current PWRs. In such launching scenarios, molten salt reactors are used as burner systems in order to close the current fuel cycle, while operating the transition to the Thorium fuel cycle. Other possible uses of the Thorium fuel cycle in water reactors are also under study for a sustainable management of the natural resources. Finally, research activities of the group deal with Accelerator Driven Systems (ADS), which may allow a high level of efficiency and safety for the transmutation of nuclear waste with high radioactivity and long lifetime. In such reactors, the measurement and the on-line monitoring of the reactivity have to be controlled. This was one of the purposes of the now completed MUSE4 program, which has been carried out on the MASURCA reactor coupled with the pulsed neutrons source GENEPI designed and built at LPSC. This reactivity control will also be the purpose of the GUINEVERE project at MOL in Belgium, project in which the group is very active and which will be described in the section of the Accelerator service.

### Mesure du rapport $\alpha$ de $^{233}\text{U}$

La filière  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  peut atteindre la régénération de son combustible en réacteur en spectre rapide comme en spectre thermique. Le paramètre clé pour calculer le pouvoir de régénération est le rapport  $\alpha$  de la section efficace moyenne de capture de  $^{233}\text{U}$  sur celle de fission. Les valeurs actuelles pour le rapport  $\alpha$  de  $^{233}\text{U}$  proviennent de mesures effectuées dans les années 1960 et présentent une dispersion de 25 %. La figure 11 montre, par exemple, l'effet de l'incertitude sur les connaissances des sections efficaces de capture et de fission de  $^{233}\text{U}$  sur la connaissance du taux de régénération à l'équilibre d'un Réacteur à Sels Fondus. Ici, le taux de régénération est calculé avec deux bases de données différentes (JENDL-3 et ENDF-B6) pour  $^{233}\text{U}$  et en fonction du temps de retraitement du volume total de sel dans le cœur. Pour obtenir un réacteur juste régénérateur il faudrait un temps de retraitement de 13 ou 18 ans selon la base de données utilisée.

Une étude de la faisabilité de la mesure du rapport  $\alpha$  de  $^{233}\text{U}$  sur la plateforme PEREN ainsi que des expériences tests préliminaires ont été réalisées en 2004-2005 à l'aide du spectromètre à temps de ralentissement en plomb. Ces dernières nous ont conduit à la réalisation de chambres d'ionisation parallélépipédiques contenant deux cibles planes d' $^{233}\text{U}$  et d' $^{235}\text{U}$  (pour une mesure de référence) positionnées de façon symétrique par rapport à une anode plane centrale. Cette géométrie permet de maximiser l'angle solide de détection des

produits de fission issus des deux cibles. Les photons gamma signant les captures lorsqu'ils ne sont pas en coïncidence avec des produits de fission, sont détectés par un ensemble de huit scintillateurs  $\text{YAPo}_3$  (YAP).

Les mesures réalisées avec ce système expérimental avec des cibles d' $^{235}\text{U}$  ont permis de valider l'ensemble des détecteurs, mais ont mis en évidence un bruit de fond venant du plomb et des détecteurs eux-mêmes bien plus important que prévu. L'utilisation de scintillateurs YAP plus fins (2 mm au lieu de 10 mm) a permis d'améliorer de près d'un facteur 2 le rapport signal sur bruit, ce qui reste insuffisant pour obtenir une mesure avec la précision demandée. Nous avons alors étudié précisément les différentes sources d'erreurs affectant l'évaluation de  $\alpha$  de  $^{233}\text{U}$  qui proviennent :

- Des efficacités de détection des gammas de capture et de fission.
- De l'efficacité de détection des événements de fission par la chambre à fission.
- Du rapport signal sur bruit.

Des expériences complémentaires ont permis de quantifier chacune de ces erreurs et de montrer que le rapport signal sur bruit dominait largement. L'analyse des résultats a permis de montrer que le bruit provenait à plus de 80 % des gammas émis par le bloc de plomb et que ces gammas étaient détectés à plus de 95 % en diaphonie, c'est-à-dire un seul gamma vu simultanément par deux ou plus de YAP.

Ces conclusions ont permis, dans le cadre de la thèse

de M.-A. Cognet, de proposer des améliorations au dispositif expérimental qu'il reste à évaluer avant de proposer, éventuellement, une prolongation de cette expérience.

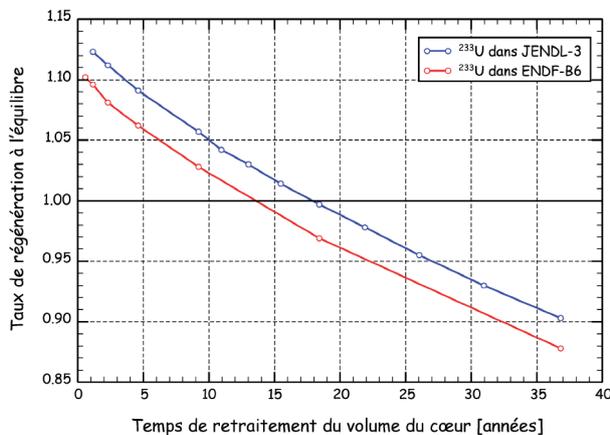


Figure 11 : Évaluation de l'incertitude sur la taille de l'unité de retraitement due à l'incertitude sur le rapport  $\alpha$  de  $^{233}\text{U}$ .

## Physicochimie des sels fondus

### Réalisation de blocs de $\text{Li}^7\text{F}$

La mise en place de la partie chimie de la plateforme PEREN s'est achevée en 2005. À partir de ce moment, la mise au point du protocole d'élaboration des lingots de fluorure de lithium 7 a débuté. Durant fin 2005 et toute l'année 2006, différents essais ont été conduits à partir de poudres de  $\text{LiF}$  standard, avec l'appui d'un chercheur CRI (section Chimie), en mutation interne au LPSC à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2006.



Figure 12 : Ensemble des trois boîtes à gants associées de la plateforme PEREN Chimie.

La fabrication des lingots de bonne qualité (sans porosité interne) a posé de nombreux problèmes et en particulier celle du lingot creux destiné à recevoir le détecteur pour les mesures de neutronique. Le bloc (21,5 cm de hauteur) a été réalisé en deux parties obtenues par croissance en moule en graphite.



Figure 13 : Lingot creux en  $\text{Li}^7\text{F}$  en deux parties réalisées successivement en moule en graphite.

### Bullage d'hélium en sel fondu

Pour des raisons liées au contrôle de la criticité du cœur d'un réacteur à sel fondu, il est nécessaire que le sel circulant soit traité « en ligne » par bullage d'hélium pour extraire les produits de fission gazeux dissous (Krypton, Xénon). Ce processus conduit à extraire aussi partiellement les produits de fission métalliques qui ne forment pas de composé fluoré (« métaux nobles »). Parallèlement au travail de synthèse des lingots de  $\text{Li}^7\text{F}$ , plusieurs démarches ont été entreprises dans le but de développer les études concernant le bullage en milieu sel fondu. Deux types d'approches complémentaires sont nécessaires :

Une étude de type industrielle, proche des conditions réelles d'exploitation qui met donc en jeu les phénomènes hydrodynamiques et une étude de compréhension des phénomènes purement physico-chimiques. Le premier type d'étude, qui est une étape incontournable dans le développement du concept de réacteur à sel fondu, nécessite l'utilisation d'une boucle de sel en circulation rapide. L'ampleur des moyens nécessaires à la construction d'une telle boucle nous a fait, courant 2005, 2006 et 2007, rechercher activement des partenaires pouvant participer au montage d'un tel projet. Après deux demandes ANR, déposées en 2005 et 2006 refusées toutes deux, nous nous dirigeons maintenant vers l'élaboration d'un projet simplifié ne nécessitant plus l'ouverture vers les besoins techniques spécifiques de chacun des partenaires, qui alourdissaient considérablement l'ensemble. Les cibles de ce projet restreint sont le bullage et l'intérêt de prouver concrètement, à une échelle raisonnable, la faisabilité d'une boucle en circulation forcée. Ce second objectif, qui à première vue ne semble pas relever directement de la recherche scientifique, constitue en fait un verrou important pour la suite des études des réacteurs à sels fondus dans l'ensemble de la communauté (CNRS, CEA, EDF...).

Le second type d'étude se limitant à l'étude de compréhension des phénomènes physico-chimiques qui ne sont pas directement liés à l'hydrodynamique, peut être traité dans un premier temps en milieu statique. Une installation de ce type (MIMOSA, pour Microscale Interactions in Molten Salt) a été construite au LPSC. Le but est de quantifier les phénomènes de transport et coalescence de particules de molybdène (simulant des produits de fission métalliques non fluorés et non solubles) lors du bullage d'hélium en bain de fluorure. Les essais se dérouleront à partir de la fin 2007 et en 2008. Le montage est constitué par une co-

lonne de sel en graphite, maintenue dans un tube en graphite de diamètre interne 34 mm et de 45 cm de hauteur, à la base de laquelle des bulles d'hélium sont produites à l'aide d'un injecteur. Le tout est situé dans une enceinte étanche comportant des alimentations en gaz (Hélium et Hydrogène). Le mélange salin choisi pour les expériences est LiF- 40 % NaF ( $T_f$  652° C). La fabrication de portions de sel chargées en particules de Molybdène de taille micrométrique se fait en collaboration avec le LEPMI (Grenoble). Par ailleurs d'autres études sont en développement actuellement avec ce laboratoire, concernant les capteurs potentiométriques en milieu fluorure (électrodes de références) et en milieu Plomb Bismuth (mesures simultanées de l'oxygène et hydrogène dissous).

## Étude de réacteurs à eau évolués pour des taux de conversion élevés

### Contexte

Les réacteurs nucléaires dits de 4<sup>e</sup> génération, encore à l'étude, sont envisagés pour une production durable d'énergie. De tels réacteurs sont en général conçus pour démarrer directement avec un combustible  $U^{239}Pu$  ou  $Th^{233}U$ ,  $U^{233}U$  étant produit en amont par capture de neutrons sur le  $^{232}Th$  dans un autre réacteur.

Dans les études de scénarios classiques, la transition entre les réacteurs actuels (ou leurs successeurs en cours de construction) et ceux dits de génération IV est assez directe. Mais les choix réalisés pour opérer cette transition auront un large impact sur les stocks de combustible disponibles et sur les quantités de déchets produits. Afin d'adoucir cette transition, des réacteurs à eau légèrement modifiés peuvent être envisagés. Ils permettraient d'obtenir de meilleurs taux de conversion (la conversion étant la régénération du fissile à partir du fertile, ramenée au nombre de fissions), en produisant par exemple  $U^{233}U$  nécessaire pour démarrer d'hypothétiques réacteurs de génération IV.

Le REP (Réacteur à Eau Pressurisée) et le CANDU (CANadian Deuterium Uranium) semblent de bons candidats pour subir de légères modifications technologiques (sous-modération, changement de composition du modérateur...) destinées à améliorer la conversion, mais également pour tester les potentialités immédiates du combustible thorium. Ils sont étudiés sous cet angle au sein du groupe de Physique des Réacteurs depuis début 2006, dans le cadre d'un stage de Master 2 puis d'une thèse (P. Guillemin) cofinancée par le CNRS et EDF.

### Les codes de calcul

Pour valider les résultats tout en palliant le manque de données expérimentales sur le sujet, deux outils de simulation sont utilisés: d'une part MCNP/MURE (MCNP Utility for Reactor Evolution, développé en collaboration avec l'IPN d'Orsay) et d'autre part les codes déterministes DRAGON (calcul de transport

en cellule) et DONJON (calcul de diffusion en cœur). Ces derniers sont mis au point à l'Institut de Génie Nucléaire (IGN) de l'École Polytechnique de Montréal depuis une vingtaine d'années. Ces codes déterministes généralistes bien validés permettent d'identifier rapidement les configurations optimales, alors que les codes probabilistes plus gourmands en temps de calcul fournissent des valeurs de référence. L'utilisation de ces codes déterministes a nécessité un effort de formation important, facilité par une collaboration privilégiée avec l'IGN (avec notamment la venue de Richard Chambon en post-doc pour un an, après sa thèse à l'IGN). L'outil déterministe fait maintenant pleinement partie de la panoplie logicielle du groupe utilisée pour les études de systèmes.

### L'équivalence cœur-cellule

Pour évaluer l'efficacité des modifications apportées aux réacteurs existants à eau (légère ou lourde), il est nécessaire de définir entre autres la fréquence des rechargements du combustible en cours de fonctionnement. Une première étape consiste alors à estimer le burnup (rendement énergétique par unité de masse) moyen de sortie du combustible pour le cœur étudié. Les concentrations isotopiques du combustible associées à ce burnup (fin d'irradiation) permettent de calculer le taux de conversion et d'autres grandeurs globales représentatives, et donc finalement d'évaluer l'efficacité du cycle complet.

Afin de diminuer les temps de calcul qui peuvent être considérables pour simuler un cœur au complet et surtout afin de prendre en compte les différents rechargements du cœur dans le calcul en transport, une simplification cœur-cellule est requise. La figure ci-dessous récapitule l'ensemble du schéma de calcul utilisé pour un REP.

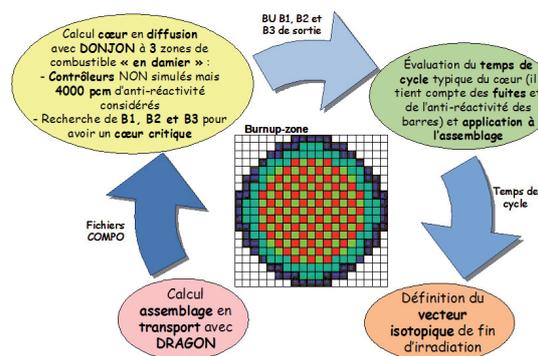


Figure 14 : Schéma de calcul pour les études REP.

Pourquoi des modifications supplémentaires ?

Après analyse, force est de constater que les gains en conversion de systèmes légèrement évolués (c'est-à-dire dont le rapport de modération a été modifié) semblent assez limités par rapport aux réacteurs de génération II dits « classiques ». Un travail exploratoire sur ces systèmes a en effet permis de déterminer

les taux de conversion potentiellement accessibles avec différents types de combustible (cf. figure page suivante provenant de l'article GLOBAL 2007).

Sur cette figure sont illustrées les capacités de conversion de systèmes REP Th/Pu plus ou moins modérés. Le Pu, issu de REP classiques, est ainsi utilisé pour produire  $^{233}\text{U}$  nécessaire au démarrage de certains réacteurs de génération IV voire de certains réacteurs à eau proches de la régénération. Les courbes ici présentées montrent que les taux de conversion obtenus sont insuffisants pour permettre une réelle économie globale d'uranium naturel. Outre le taux de conversion, il faut également considérer la valeur du burnup de sortie. En effet, un burnup trop faible sera synonyme d'une cadence de retraitement du combustible soutenue et donc d'un coup de cycle du combustible trop élevé.

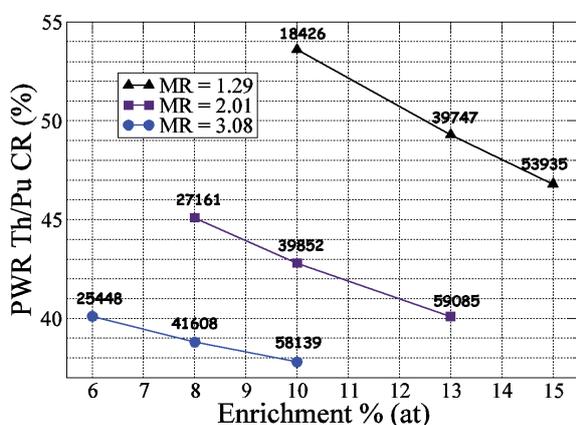


Figure 15: Taux de conversion (CR) accessibles pour un REP Th/Pu légèrement modifié (MR = rapport de modération). (Les nombres indiqués au-dessus des points correspondent au burnup moyen de sortie en MWj/t).

Pour améliorer ces gains en conversion, il semble indispensable de complexifier un peu plus les changements apportés aux réacteurs à eau. Deux types de modifications ont été retenus : l'optimisation de l'hétérogénéité du cœur et la technique de variation de spectre, dont le principe est de compenser la perte de réactivité due au burnup par le retrait de barres fertiles. Des techniques comparables ont été utilisées dans le réacteur LWBR (Light Water Breeder Reactor) de Shippingport (le cœur était mobile dans une couverture fixe), et envisagées dans le projet RCVS (Réacteur Convertible à Variation de Spectre) de Framatome (mouvement de grappes de barres fertiles au sein d'assemblages). Ce faisant, le réacteur américain LWBR, avait légèrement surgénéré de  $^{233}\text{U}$  à partir de thorium dans un cœur sous-modéré à l'eau légère, pendant 5 ans et à une puissance thermique totale de 200 MW environ.

### Les études de scénarios

Les données obtenues en sortie de cœur sont intégrées à des études de scénarios, études gérées par le code de scénarios OSCAR (Optimized Scenario Code for Ad-

vanced Reactors). Ce code C++ développé au LPSC par R. Chambon et en relation étroite avec MURE a permis d'illustrer les résultats obtenus lors de notre étude exploratoire de systèmes légèrement évolués. L'idée principale est de laisser le code optimiser chaque scénario en fonction de contraintes préalablement définies par l'utilisateur. Il est employé en parallèle et en soutien d'études scénarios simplifiées faites « à la main » à partir des principaux résultats des études systèmes.

## Étude des réacteurs à sels fondus

### Description générale du TMSR sans modérateur en cœur

Le concept général de Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) sans modérateur en cœur consiste en un réacteur de 1 GWe basé sur le cycle du combustible  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ . Sa température de fonctionnement est de  $630^\circ\text{C}$  ce qui correspond à un rendement thermodynamique de 40 %. Le cœur est un simple canal orthorhombique de 2,6 m de haut rempli de sel combustible comme présenté sur la figure.

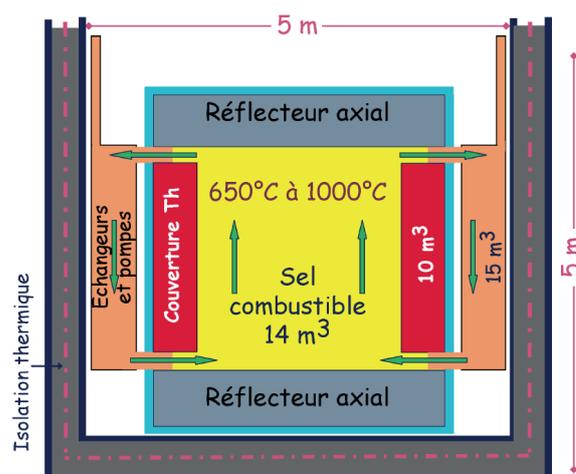


Figure 16: Coupe verticale de la configuration de TMSR dite « sans modérateur en cœur ».

Ce canal est entouré d'une couverture fertile radiale ainsi que de deux réflecteurs axiaux. Le sel combustible est un fluorure de lithium, de thorium et d'uranium. Un tiers des 20 m<sup>3</sup> de sel circule dans les circuits externes au cœur et est donc hors du flux de neutrons. La couverture fertile radiale contient un sel fluorure  $\text{LiF} - (^{232}\text{Th})\text{F}_4$  avec 28 % molaire de Th (deuxième eutectique dont la température de fusion est aussi de  $565^\circ\text{C}$ ) et a pour rôle d'améliorer les capacités de régénération du système.

Une des caractéristiques importantes des RSF est la possibilité de retraiter le combustible pendant le fonctionnement du réacteur ce qui permet, d'une part, de limiter les captures parasites sur les produits de fission et, d'autre part, d'éviter d'avoir une réserve de réactivité pour assurer la criticité au cours du temps.

### Optimisation de l'inventaire fissile initial

L<sup>233</sup>U n'étant pas disponible dans la nature, les TMSR devront être démarrés, soit avec de l<sup>233</sup>U produit dans d'autres réacteurs, soit avec d'autres matières fissiles qui, de fait, ne pourront être que de l'uranium enrichi ou des transuraniens provenant des réacteurs actuels. Il apparaît donc indispensable de réduire autant que possible l'inventaire fissile nécessaire pour démarrer un TMSR. Ceci est réalisé en réduisant la proportion de noyaux lourds dans le sel sans diminuer le volume total de sel.

Pour chaque proportion de noyaux lourds allant de 6 % à 27,5 % molaire, nous avons étudié le taux de régénération obtenu en fonction de la quantité de noyaux lourds retraitée par jour. En effet, lors du retraitement, la quantité de produits de fission à retirer ne dépend que de la puissance thermique du réacteur et la difficulté de ce retraitement sera vraisemblablement liée à la quantité de noyaux lourds en solution avec ces produits de fission. La figure 17 présente la quantité de noyaux lourds transitant par jour dans l'unité de retraitement en fonction de l'inventaire initial nécessaire pour obtenir soit la régénération, soit la production d'un inventaire initial en 100 ans, soit encore la production d'un inventaire initial en 50 ans. Cette représentation permet de visualiser simultanément trois paramètres essentiels dans la définition d'un TMSR sans modérateur en cœur, à savoir le dimensionnement du retraitement, la capacité de déploiement de la filière et la régénération obtenue.

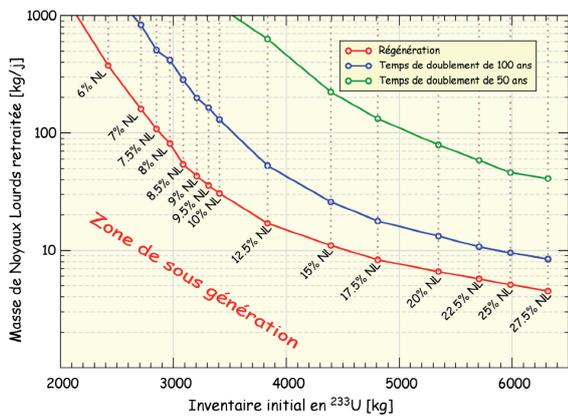


Figure 17 : Masse de noyaux lourds transitant dans l'unité de retraitement par jour en fonction de l'inventaire initial d<sup>233</sup>U pour obtenir la régénération (courbe rouge), un temps de doublement de 100 ans ou un temps de doublement de 50 ans (courbes bleue et verte respectivement) pour des proportions de noyaux lourds allant de 6 % à 27,5 % molaire.

La zone située sous la ligne rouge indique la région de sous-génération à éviter pour un concept de 4<sup>e</sup> génération qui doit être au moins régénérateur de son propre combustible. L'inventaire initial en <sup>233</sup>U va de 2400 kg pour une proportion de noyaux lourds de 6 % molaire dans le sel à 6300 kg pour une proportion de noyaux lourds de 27,5 % molaire correspondant au deuxième eutectique de fusion du sel binaire LiF-ThF<sub>4</sub>. Cela met en évidence une forte variation du spectre neutronique de relativement thermalisé à rapide.

### Démarrage d'un TMSR avec les transuraniens produits dans les réacteurs actuels

Dans le cas où l<sup>233</sup>U ne serait pas disponible, il faudrait utiliser un autre combustible fissile pour démarrer la filière. Les deux seules possibilités sont l'uranium enrichi et le plutonium provenant des réacteurs actuels. Nous n'envisagerons ici que le cas du plutonium issu des REP. Nous avons ainsi considéré le TMSR présenté précédemment mais démarré avec du Thorium (17,5 % molaire) et les actinides mineurs (ou transuraniens) produits dans le combustible UOX les réacteurs REP actuels, soit 0,33 % de Np, 4,59 % de Pu, 0,28 % d'Am et 0,05 % de Cm.

Cette étude a permis de montrer que le TMSR sans modérateur en cœur est, non seulement un excellent producteur d'énergie, mais peut aussi être très utile pour incinérer les transuraniens issus des réacteurs actuels.

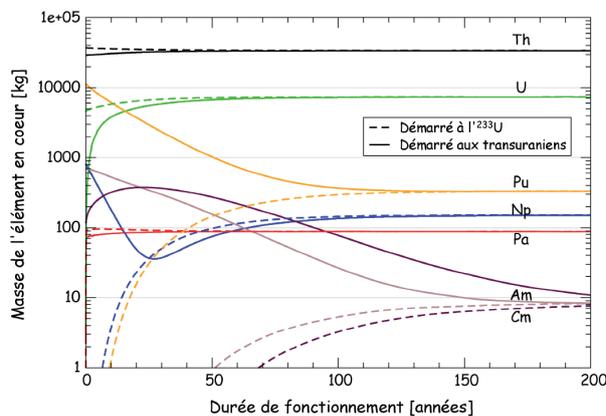


Figure 18 : Comparaison de l'évolution des actinides dans le cœur pour un TMSR démarré à l<sup>233</sup>U (traits pointillés), et un TMSR démarré aux transuraniens (traits pleins) dans le cas d'un sel contenant 17,5 % de noyaux lourds.