

# LA STRUCTURE NUCLEAIRE POUR LA PHYSIQUE DES REACTEURS ET DES NEUTRINOS

Auteur : M. Fallot (Subatech)

**Ce document porte sur les activités françaises de physique nucléaire utilisant la méthode ISOL pour la physique des réacteurs et des neutrinos.**

## Résumé (une page)

Les propriétés de désintégration bêta des noyaux riches en neutrons, en particulier des produits de fission, jouent un rôle majeur dans l'estimation d'observables importantes pour la sûreté des réacteurs nucléaires ainsi que la physique des neutrinos, qu'elle soit fondamentale ou appliquée. Récemment, l'anomalie des réacteurs - un déficit significatif entre les prédictions réalisées à partir d'estimations récentes des spectres en énergie des antineutrinos et les flux mesurés par les expériences de neutrino à moins de 100m d'un cœur de réacteur - a attiré l'attention des communautés de physique des particules et de physique nucléaire. Cette problématique est à l'origine de nombreuses nouvelles expériences de physique des neutrinos proches de réacteurs de recherche dans le monde. Une meilleure connaissance du spectre des antineutrinos des réacteurs est requise et pour cela, la maîtrise de la physique nucléaire sous-jacente est incontournable. La physique nucléaire sous-jacente joue un rôle dans les deux méthodes de calcul des spectres à l'étude actuellement. Différents axes d'amélioration des prédictions peuvent être considérés, on peut citer notamment la correction, par des mesures calorimétriques, de l'effet Pandemonium qui affecte les données de certains produits de fission importants contributeurs (une sous-estimation des désintégrations vers les états excités à plus haute énergie), ou encore l'étude de la forme des spectres d'électrons issus de désintégrations premières interdites non-unique. Pour prédire la partie la plus haute en énergie du spectre des antineutrinos ( $>7-8$  MeV), les modèles théoriques sont indispensables car les noyaux impliqués sont très riches en neutrons et mal connus. La communauté française a contribué activement ces dernières années aux avancées de la recherche sur les spectres des antineutrinos des réacteurs. Elle a également mis en évidence une problématique commune avec l'étude des produits de fission à l'origine de la puissance résiduelle des réacteurs après leur arrêt. Cette puissance résiduelle représente environ 7% de la puissance nominale d'un réacteur et doit être évacuée sous peine de faire fondre les gaines de combustible (cf. accident de Fukushima en 2011). A ce jour des différences importantes subsistent entre les mesures intégrales faites dans des expériences au sein de réacteurs, et les calculs qui utilisent les données nucléaires, même pour les puissances résiduelles associées aux noyaux fissiles les plus courants comme  $^{235}\text{U}$  et le  $^{239}\text{Pu}$ . Dans ces conditions, il est difficile de fournir des prédictions fiables pour les réacteurs du futur utilisant des combustibles innovants ou des neutrons rapides. Ces différences peuvent être expliquées à la fois par l'effet Pandemonium, et par le manque de mesures concernant les produits de fission les plus riches en neutrons. Dans ce dernier cas, selon les bases de données, différents modèles sont utilisés dont les performances prédictives pourraient être sensiblement améliorées grâce à de nouvelles contraintes expérimentales. Enfin les études concernant les produits de fission émetteurs de neutrons retardés sont également importantes car peu d'informations se trouvent dans les bases de données nucléaires. Or la fraction de neutrons retardés d'un réacteur est un paramètre qui influence directement son pilotage et là encore les prédictions pour les réacteurs innovants reposent notamment sur les propriétés de désintégration bêta des produits de fission ( $P_n, P_\gamma$  au-dessus du seuil d'émission neutron). Nous présentons dans ce document

les activités de la communauté française relatives à une meilleure détermination de ces observables.

## 1. Enjeux scientifiques

Les études des neutrinos menées auprès des réacteurs dans le monde ces dernières années ont permis de s'intéresser à des questions :

- de surveillance du nucléaire : quelle est la sensibilité maximale que la détection des antineutrinos des réacteurs permet d'atteindre sur la composition du combustible nucléaire ? Il s'agit ici de répondre à la question de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) à ses états membres ;

- de physique des particules : quels sont les paramètres de la matrice de mélange des neutrinos ? L'angle de mélange  $\theta_{13}$  était le dernier paramètre des oscillations de neutrinos inconnu jusqu'en 2011. La valeur de ce paramètre a une implication importante sur la violation de la symétrie CP dans le secteur leptonique.

En 2005, nous avons rejoint la collaboration internationale Double-Chooz avec l'ambition de répondre à ces deux questions, en y apportant notre savoir-faire dans la simulation des cœurs de réacteurs nucléaires ainsi que dans la structure nucléaire et en particulier la désintégration bêta des produits de fission, à l'origine de l'émission des antineutrinos des réacteurs.

Sur la période de l'évaluation, ces travaux ont permis de fournir la prédiction du spectre en énergie des antineutrinos émis par les deux réacteurs de la centrale de Chooz qui a servi à déduire la première indication de l'angle de mélange  $\theta_{13}$  publiée par une expérience de neutrinos des réacteurs.

La maîtrise des spectres des antineutrinos réacteurs repose sur la bonne connaissance des propriétés de désintégration bêta des produits de fission. Nous avons revisité une méthode de calcul des spectres des antineutrinos, la méthode de sommation, qui repose sur la somme des contributions des branches bêta des produits de fission. Cette méthode repose essentiellement sur les bases de données nucléaires, et permet également d'être couplée à des simulations complexes de cœurs de réacteurs. Nos développements ont participé également à la ré-investigation de la méthode de conversion des spectres intégraux d'électrons mesurés à l'ILL dans les années 1980 [1], menée par une équipe du CEA/SPhN, qui a abouti à de nouvelles prédictions des spectres des antineutrinos en 2011 [2] et donnant lieu à l'« anomalie des réacteurs » [3]. Il s'agit d'un déficit observé par les expériences de neutrinos des réacteurs à courte distance (moins de 100m) des cœurs de réacteur, lorsque l'on les compare aux prédictions réalisées avec les spectres convertis revisités [2, 4]. Ce déficit a suscité de nouvelles recherches de neutrinos stériles de faible masse, dans le secteur [ $Dm^2 \sim 1eV^2$ ] [5]. Une explication alternative serait que les spectres calculés à partir des mesures intégrales faites par l'équipe de Schreckenbach et al. pourraient ne pas être totalement fiables. La seule autre méthode possible de calcul des spectres en l'absence de nouvelles mesures intégrales est la méthode de sommation. Elle est en outre la seule à être prédictive pour des réacteurs dont le combustible et l'énergie des neutrons ne seraient pas les mêmes que dans les mesures intégrales (intérêt pour la non prolifération). Elle permet également de calculer la correction au spectre nécessaire due à l'évolution temporelle de la population des produits de fission dans le cœur de réacteur (pris en compte dans l'anomalie des réacteurs [2]), ainsi que la prédiction des spectres dans des gammes d'énergie hors d'atteinte des mesures intégrales (inférieure à 2 MeV et au-delà de 7-8 MeV).

Afin d'obtenir des prédictions fiables avec la méthode de sommation, nous avons montré que de nouvelles mesures étaient nécessaires. En effet, les propriétés de désintégration bêta de certains noyaux dans les bases de données nucléaires étaient biaisées par un effet appelé l'effet Pandemonium [6,7]. Cet effet provient de l'utilisation de détecteurs au germanium qui peuvent donner dans certains cas une image distordue de l'intensité bêta. La technique de mesure par absorption totale (Total Absorption Gamma-ray Spectroscopy, TAGS) permet d'obtenir une représentation fidèle de l'émission bêta du noyau étudié. En 2009, nous avons établi la liste des noyaux nécessitant de nouvelles mesures afin d'améliorer notre connaissance des spectres des antineutrinos et nous nous sommes associés à nos collègues de Valencia (Espagne) afin de proposer une campagne expérimentale auprès de l'accélérateur de l'université de Jyväskylä (Finlande). Nos premiers résultats expérimentaux ont déjà permis d'améliorer la compréhension des spectres dans une région en énergie, entre 4 et 8 MeV, où une distorsion des spectres d'antineutrinos par rapport aux spectres convertis a été observée par les expériences de physique des neutrinos [8].

Depuis 2011, la meilleure détermination des spectres en énergie des antineutrinos des réacteurs a suscité une émulation internationale intense avec beaucoup de publications sur le sujet, et beaucoup de rebondissements également. Le lecteur très motivé peut notamment consulter les références [9] à [30]... **Pour un résumé bref de la situation, le lecteur peut consulter la référence [37] valable jusque 2016 (une mise à jour est nécessaire notamment à la lumière des références [25] et [25bis]).** Les faits marquants sont les suivants :

- la remise en question des spectres convertis en raison de l'impact potentiel des désintégrations bêta interdites non uniques (30% des décroissances dans les PF), dont la forme des spectres est mal connue et peut varier beaucoup de la forme permise selon le spin gouvernant la transition [9,14, 21, 22] ;
- l'impact potentiel sur les spectres convertis d'une valeur très différente du terme de magnétisme faible dont la valeur est mal maîtrisée pour les produits de fission [4, 9, 21, 22];
- la découverte de la fameuse distorsion entre 4 et 8 MeV des spectres des antineutrinos mesurés avec les détecteurs proches de Daya Bay, Double Chooz et Reno, en comparaison des spectres convertis [8,24] ;
- la récente mesure de Daya Bay qui tend à mettre en évidence que l'anomalie des réacteurs proviendrait d'une mauvaise détermination du spectre en énergie des antineutrinos émanant des fissions de l'<sup>235</sup>U [25, 25bis] ;
- les mesures TAGS des premiers contributeurs au spectre en énergie des antineutrinos dans la région 4 à 8 MeV [7,10-12].

Ces études sont tout à fait d'actualité (on note encore plusieurs publications supplémentaires sur la problématique en septembre [27-29]).

Les mesures des propriétés de décroissance bêta des produits de fission touchent deux autres observables d'intérêt pour les réacteurs actuels et du futur : la puissance résiduelle des réacteurs (enjeu pour la sûreté et l'économie) et l'émission des neutrons retardés (pilotage et sûreté des réacteurs).

L'état de l'art concernant la puissance résiduelle des réacteurs, est qu'il subsiste encore des différences importantes entre les calculs de sommation réalisés avec les bases de données évaluées les plus récentes (JEFF3.1.1, JENDL, ENDFB-VII.1, GEF, cf. [31,32] que ce soit du point de vue des données de décroissances et des rendements de fission qui sont les deux ingrédients de ces calculs. Les calculs de propagation d'incertitude font état d'une dominance des incertitudes par les données de décroissance [33] lorsque le manque de données expérimentales est pris en compte. En

effet, de nombreux noyaux entrant dans ces calculs n'ont pas fait l'objet de mesures (noyaux exotiques) et les calculs doivent reposer sur des prédictions théoriques faites selon les bases avec des modèles phénoménologiques (Gross Theory, base JENDL) ou microscopique (ENDFBVII), ou pas de prédiction du tout (choix de JEFF 3.1.1). Les résultats diffèrent également notablement en fonction de la prise en compte ou non des corrélations des produits de fission. Les effets systématiques sur les données tels que l'effet Pandemonium qui affecte nombre de noyaux importants contributeurs à la puissance résiduelle ne sont pas pris en compte non plus dans les propagation d'incertitude jusqu'à présent. Des listes de noyaux prioritaires pour les mesures TAGS ont été mises à jour par l'AIEA récemment [34]. Plus récemment encore [12] les données de Rudstam et al. qui touchent de nombreux contributeurs à la puissance résiduelle semblent souffrir d'incertitudes systématiques. L'évaluation de l'impact de ces erreurs sur la puissance résiduelle reste à faire pour estimer le nombre de noyaux qui mériteront de nouvelles mesures.

Enfin de nombreuses données nucléaires concernant les neutrons retardés manquent dans les bases de données. La dernière compilation de données date de 2002, et une nouvelle base est en train d'être constituée par l'AIEA. Les efforts expérimentaux à réaliser sont importants, malgré les progrès réalisés ces dernières années avec de nouvelles mesures, qui restent à inclure dans les bases de données évaluées. L'étude des propriétés de décroissance bêta des noyaux émetteurs de neutrons retardés est importante car elle permet de vérifier la cohérence des données concernant la branche neutron, et a montré récemment que les modèles statistiques prédisant la compétition gamma/neutron au-dessus du seuil d'émission neutron ne parvenaient pas à reproduire un certain nombre de mesures dans lesquelles l'émission gamma est bien supérieure à l'attendu [11,35, 36] (cf. également document astrophysique nucléaire).

Enfin derrière ces problématiques appliquées, la compréhension de la structure du noyau joue un rôle primordial. La technique TAGS est la méthode privilégiée pour accéder expérimentalement à la distribution en énergie de la force bêta (Gamow-Teller), observable microscopique qui permet de mieux contraindre les modèles théoriques. Nous avons débuté des études de structure et d'astrophysique nucléaires dans le cadre de nos mesures. Ces dernières consistent souvent en des campagnes expérimentales (en termes de nombres de noyaux mesurés) couvrant les différentes motivations exposées et ne se résument pas à un seul objectif. Les développements instrumentaux et techniques sont donc communs aux différentes problématiques abordées (cf. les fiches de structure nucléaire et d'astrophysique nucléaires), ainsi que les collaborations avec les théoriciens. En effet, les prédictions théoriques sont indispensables pour les calculs de nucléosynthèse du (des) processus-r, mais restent encore un ingrédient important des calculs des antineutrinos et de la puissance résiduelle des réacteurs. Dans les problématiques appliquées il est également important de maintenir un contact régulier avec les évaluateurs des bases de données nucléaires, ce que nous faisons avec les 3 bases ENDF, JEFF et JENDL.

Un autre sujet de physique des neutrinos à l'interface avec la structure nucléaire est l'étude de la nature du neutrino (de Dirac ou de Majorana ?) via les mesures du processus de décroissance double bêta. Ce processus figure parmi les formes les plus rares de radioactivité et son occurrence a des implications sur le Modèle Standard des interactions fondamentales. La désintégration double bêta, transition entre un noyau  $(Z,N)$  et le fils  $(Z+2, N-2)$ , peut être observée dans des noyaux dans lesquels le noyau  $(Z+1, N-1)$  a une énergie de liaison plus faible, interdisant de ce fait la désintégration bêta simple et si le noyau  $(Z+2, N-2)$  est plus lié. Ce processus n'a jusqu'ici été observé

qu'accompagné de l'émission de deux neutrinos. Le même processus sans émission de neutrinos fait l'objet d'intenses recherches, car il apporterait des informations sur la nature du neutrino (Dirac ou Majorana) et sur l'échelle des masses des neutrinos. Mais pour extraire cette information il s'agit de mesurer la demi-vie associée à ce processus, et d'estimer théoriquement les facteurs d'espace de phase et les éléments de matrice nucléaires implicites au processus. Leur détermination nécessite la connaissance des fonctions d'ondes des états nucléaires impliqués. Il a été suggéré que l'on pouvait tester la prédictivité des modèles théoriques pour la désintégration double bêta sans neutrino en comparant leurs prédictions aux mesures pour le processus de désintégration bêta avec émission de deux neutrinos. Dans le cadre du modèle de QRPA, on peut aussi contraindre des paramètres du modèle en utilisant la désintégration bêta simple du noyau intermédiaire, avec l'objectif de fixer la valeur de la constante de couplage  $g_A$ , et celle de l'interaction particule-particule  $g_{pp}$ . C'est dans ce cadre que nous avons réalisé récemment des mesures de propriétés de désintégration bêta du  $^{100}\text{Tc}$  (noyau intermédiaire du système  $^{100}\text{Mo}$ - $^{100}\text{Ru}$ ) [38] auprès du dispositif IGISOL. D'autres mesures de ce type pourraient être réalisées dans les prochaines années. Ce sujet, contrairement aux précédents, est pour l'instant porté par l'équipe de l'IFIC de Valencia (Espagne) et non les groupes français, aussi nous ne l'incluons pas dans le projet Antineutrinos et Puissance Résiduelle des Réacteurs plus détaillé ci-dessous, même s'il pourrait s'insérer dans un projet plus vaste visant à mieux contraindre les modèles théoriques microscopiques de la désintégration bêta qui serait d'intérêt pour tous les domaines cités dans ce document.

## 2. Projet

Notre projet consiste à améliorer l'état des connaissances sur les propriétés de désintégration bêta des produits de fission afin d'obtenir des prédictions fiables des spectres des antineutrinos, la puissance résiduelle des réacteurs et des émissions de neutrons retardés. Les mesures nécessaires reposent principalement sur la technique TAGS, ainsi que la mesure des spectres en énergie des électrons.

Nous avons proposé et réalisé deux campagnes TAGS auprès de l'installation IGISOL de Jyväskylä qui ont permis de mesurer 8 des 11 premiers contributeurs au spectre des antineutrinos des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Les analyses sont en cours de finalisation et notre objectif est de publier un bilan en 2018, en fournissant de nouvelles prédictions avec la méthode de sommation accompagnées de leurs incertitudes. L'objectif ultime est d'obtenir, grâce aux nouvelles mesures, des spectres de sommation dont les incertitudes sont inférieures à celles des spectres convertis sur plusieurs bins d'énergie. Nous pourrions alors étudier l'anomalie des réacteurs à la lumière de ces nouvelles prédictions et obtenir des résultats dans une échelle temporelle comparative aux résultats des expériences de neutrinos des réacteurs qui prennent des données actuellement, comme par ex. STEREO, SoLid,...

En 2014, nous avons également proposé une campagne expérimentale TAGS auprès de l'installation ALTO, avec en particulier une liste de noyaux qui contribuent à la partie haute énergie du spectre des antineutrinos; une région où seules les données nucléaires peuvent permettre une prédiction. Cependant les performances actuelles de la source laser d'ALTO ne nous permettent pas d'envisager ces expériences à court terme pour la problématique neutrino. D'autres expériences reposant sur la technique TAGS sont prévues, motivées par la structure et l'astrophysique nucléaires autour de  $^{132}\text{Sn}$  (proposal ALTO N-I-6) et du  $^{78}\text{Ni}$  (ALTO LoI-N-I-6). Le laboratoire Subatech réalise actuellement les développements mécaniques nécessaires à l'installation d'un TAGS sur ALTO, utiles pour toutes motivations de physique confondues. Subatech

fournira également le détecteur bêta adapté à la ligne de faisceau ALTO (pour réaliser les mesures en coïncidences bêta-gamma).

Afin d'apporter une réponse à la question soulevée par les décroissances bêta interdites non uniques, nous avons initié le projet E-Shape en collaboration avec l'IFIC de Valencia (Espagne) et Surrey (UK), dont l'objectif est de mesurer l'énergie des électrons émis lors de décroissances bêta interdites non-unes de produits de fission essentiels aux antineutrinos des réacteurs. Une expérience est prévue à Jyväskylä en 2018-2019. Nous finalisons actuellement la conception du détecteur et de la mécanique associée (chambre à vide). Suivront la construction et la caractérisation de l'ensemble de détection puis les mesures qui permettront d'apporter une réponse quant à la fiabilité de la méthode de conversion des spectres de l'ILL.

Nos expériences TAS portent également sur des noyaux d'intérêt pour l'estimation plus précise de la puissance résiduelle ainsi que sur des noyaux émetteurs de neutrons retardés, qui représentent un enjeu pour la sûreté des réacteurs nucléaires. Nous développons en parallèle des expériences le volet de simulations associées à ces thématiques qui permettra de déduire de nouvelles listes de noyaux impactant dont les propriétés radioactives sont mal connues. La mesure des formes des spectres bêta de transition interdites non uniques des produits de fission permettra également de vérifier que ces dernières n'ont pas une influence sur les calculs de sommation de la puissance résiduelle des réacteurs, ceux-ci étant toujours réalisés en supposant des formes de spectres électroniques de transitions permises.

L'analyse conjointe de la première campagne TAGS à Jyväskylä a donné lieu à 4 thèses (V.M. Bui et Z. Issoufou à Nantes, et E. Valencia et S. Rice à Valencia et Surrey).

Deux thèses sont associées à la seconde campagne TAGS : L. Le Meur (Nantes, fin en septembre 2018) et V. Guadilla (fin en septembre 2017). La thèse de L. Le Meur comporte une partie théorique encadrée par M. Martini et S. Péru (CEA DAM).

La liste de nos publications communes est fournie à la fin de ce document (cf. « Publications de la collaboration TAGS »).

### 3. Genèse et calendrier

#### **Projet Antineutrinos et Puissance Résiduelle des réacteurs :**

La genèse des propositions d'expériences TAGS par le groupe nantais a débuté en 2009 avec l'élaboration des listes de noyaux potentiellement importants à mesurer, et le début de la collaboration avec l'équipe de l'IFIC de Valencia qui a développé les détecteurs TAGS en Europe ces dernières années. Notre premier proposal auprès de Jyväskylä date de 2009 et a été accepté cette même année. Les premières mesures issues du proposal français ont eu lieu en novembre 2009 à Jyväskylä.

Le reste des mesures prévues dans notre proposition d'expérience a dû attendre 2014 que l'accélérateur de Jyväskylä ait été remplacé et déménagé pour pouvoir être réalisées, nous exposant potentiellement à la concurrence américaine d'Oak Ridge.

En 2014 nous avons utilisé le nouveau détecteur TAGS mis au point par l'IFIC pour DESPEC, qui consiste en 18 cristaux de NaI. Nous avons également utilisé le nouvel IGISOL et utilisé pour la première fois le double piège de Penning depuis les travaux sur l'installation. Cette expérience a permis de mesurer pas moins de 23 noyaux, dont l'analyse est répartie entre l'IFIC et le laboratoire Subatech et devrait toucher à sa fin en 2018 avec les thèses de V. Guadilla (IFIC) et L. Le Meur (Nantes).

**Notre objectif en 2018** est de publier le bilan de ces campagnes expérimentales, en calculant l'impact cumulé de toutes les mesures sur les observables d'intérêt (antineutrinos et puissance résiduelle) et en fournissant de nouvelles prédictions accompagnées d'incertitudes. Ces nouvelles prédictions devraient trouver leur place dans des publications à fort facteur d'impact compte-tenu de l'effervescence de ces dernières années sur ces thématiques. La récente publication de la collaboration Daya Bay montrant que l'origine de l'anomalie des réacteurs proviendrait essentiellement du calcul de spectre en énergie des antineutrinos de l' $^{235}\text{U}$  utilisé nous conforte encore plus dans notre projet. Ce résultat, qui doit être confirmé par d'autres expériences, exclut l'existence des neutrinos stériles et signifie que soit la mesure du spectre intégral des électrons de Schreckenbach et al. souffre d'incertitudes supplémentaires, soit le modèle de conversion en antineutrinos introduit un biais incompris. **Les mesures de physique nucléaire peuvent apporter plusieurs réponses à la problématique soit en terme de prédiction alternative à ce calcul, soit en termes de compréhension des ingrédients nucléaires entrant dans le calcul.**

**Les données obtenues lors de nos expériences seront fournies aux évaluateurs des bases de données nucléaires. Notre collaboration avec les théoriciens du CEA (QRPA) devrait également déboucher sur de nouvelles comparaisons mesures/prédictions théoriques avec la fin de la thèse de Loïc Le Meur et apporter des contraintes aux modèles qui pourront être utiles pour les données nucléaires, ainsi que pour la structure et l'astrophysique nucléaires.**

Voici un tableau de faits observables pour le projet Antineutrinos et Puissance Résiduelle des Réacteurs :

Faits observables	Indices de qualité
Th. Mueller et al. Phys. Rev. C 2011 M. Fallot et al. Phys. Rev. Lett. 2012 Z. Issoufou et al. Phys. Rev. Lett. 2015 Viewpoint dans Phys. Rev. Lett. Sur l'article de Daya Bay Phys. Rev. Lett. 2017	>200 citations WoK Publication(s) dans revue de grand impact. Expertise reconnue sur les spectres (sollicitations DChooz, Daya Bay, IAEA...)
Expériences proposées par les laboratoires de l'in2p3 acceptées sur des installations internationales	2 à Jyväskylä, 1 à ALTO, 1 Letter of Intent à ALTO
Invitations à des Workshops et Conférences internationaux (hors IAEA, AAP et ESARDA)	De 2010 à 2017 : 15 dont 4 conférences internationales en session plénière (dont 1 déclinée pour raisons personnelles)
Projet National NEEDS/NACRE	Coordinateurs des actions 2.2 et 2.3.2
Projet Européen CHANDA	Membres du groupe sur les propriétés de désintégration bêta des produits de fission
2 experts mandatés par le Member Support Program français pour l'AIEA sur les anti-ν pour la non-prolifération	Thématiques: Simulation de réacteurs, et détection des antineutrinos. Parmi un groupe international restreint invité aux réunions organisées par l'AIEA.
Responsabilité d'un sous-WG ESARDA dédié aux antineutrinos	Créé par l'European SAFeguards R&D Association en 2011. Fin en 2016.
Talks et articles de revue sur les antineutrinos et la non-prolifération	4 overview talks et 2 articles d'overview : Nuclear Data 2013 (Nuclear Data Sheets), ESARDA Bulletin num. 50 (2012)
Invitations à des Workshops et Conférences internationaux	De 2010 à 2017 : 8 (AAP, IAEA, ESARDA)
IAEA report SG-EQGNRL-RP-0002	Relecteur du rapport AIEA 2012 sur les anti-ν
Signataires d'un Coordinated Research Project avec l'AIEA (nuclear data)	Dans un groupe restreint d'experts internationaux sur les émetteurs de neutrons retardés (2013-2017)
Invitations aux TAGS Consultant Meetings de l'AIEA	2009, 2011, 2014, 2018. En 2014 : publication de la liste des noyaux à mesurer pour les spectres des antineutrinos, établie par Subatech (Report INDC-NDS 0676, 2015).

Les activités de l'équipe de Subatech impliquées dans les mesures TAGS pour la physique des neutrinos et la physique des réacteurs (ainsi que la structure et l'astro-nucléaire) ont été évaluées par le conseil scientifique international du laboratoire en 2012, 2014 et 2015. Les conclusions de 2015 sont les suivantes [disponible sur l'intranet de Subatech]:

« The ERDRE group performing the above studies has proposed experiments and joined collaborations for TAS (Total absorption Spectroscopy) measurements to investigate influence of b-decay of fission products on reactor-produced antineutrino spectrum and on residual decay heat. They have joined a large collaboration to study nuclear structure aspects related to missing Gamow-Teller strength, and to pursue nuclear astrophysics research, in particular r-process, at ALTO facility at IPNO, at DESIR at SPIRAL2 and at other international facilities. These are programmes with long-term perspectives that are part of the NuPECC long-range plan for research at radioactive ion-beam facilities and where the ERDRE group can have a strong impact ».

#### 4. État de l'art

**Sur la problématique des neutrinos des réacteurs, les avancées réalisées par la communauté des physiciens des neutrinos ont un impact évident sur nos études. Du côté nucléaire, nos principaux concurrents sur ces thématiques à l'interface avec d'autres thématiques de l'in2p3 sont l'équipe de l'Oak Ridge National Lab. aux Etats-Unis.**

Ils ont élaboré un détecteur TAGS segmenté fait de cristaux de NaI : le MTAS [39]. Leur méthode d'analyse de données est moins développée que celle de la collaboration européenne qui repose sur la résolution du problème inverse par la méthode de Bayes. En effet l'équipe de l'IFIC de Valencia a étudié plusieurs algorithmes de résolution et la collaboration a acquis une bonne maîtrise de l'utilisation correcte de ces algorithmes [40-43]. La résolution du problème inverse repose sur la connaissance des niveaux de basse énergie dans le noyau fils, ainsi que sur sa densité de niveaux et les forces gamma (E1, E2 et M1). L'équipe américaine reproche à cette analyse d'être « dépendante des modèles » mais de son côté ajoute « à la main » des niveaux dans la simulation Geant4 du détecteur jusqu'à obtenir un spectre simulé comparable à leurs mesures (sans publier la comparaison données vs simulations!). L'étude minutieuse de l'impact des différents modèles de densité de niveaux et de forces gamma fait partie intégrante de nos analyses.

La résolution correcte du problème inverse nécessite que les données soient très peu contaminées, c'est pourquoi une excellente pureté du faisceau est requise. Les expériences TAGS ne peuvent ainsi être réalisées qu'auprès d'installations qui le permettent, comme IGISOL (JYFL) avec son double piège de Penning. Nos concurrents de l'ORNL n'ont pas bénéficié pour leurs mesures de faisceaux aussi purs.

Cette équipe a néanmoins réalisé beaucoup de mesures ces dernières années qui ont abouti à des publications dans des revues à fort impact. Leur calendrier est assez similaire au nôtre, si bien que nos recherches sont menées dans un contexte de concurrence internationale. Nous avons également le point fort de coupler nos activités expérimentales à des activités de simulations qui nous permettent d'identifier les noyaux pertinents à mesurer ainsi que d'étudier l'impact des nouvelles mesures directement.

Nos prochains objectifs, afin de rester à la pointe des problématiques abordées, sont les suivants :



- Poursuivre les développements nécessaires à l'installation d'un TAGS auprès d'ALTO (cf. paragraphe suivant). La source laser d'ALTO combinée à la sélection magnétique pourrait permettre ce type de mesure, cependant nous n'avons pas encore pu tester la qualité de ces faisceaux suite aux multiples reports des expériences pour raisons techniques sur ALTO ;
- Etudier les possibilités futures auprès de la future extension d'ALTO, avec notamment l'utilisation du piège de Penning ;
- en parallèle, conserver notre position de leader sur les thématiques de puissance résiduelle et antineutrinos des réacteurs via de nouvelles propositions d'expériences (avec l'appui des simulations de réacteurs) auprès d'ISOLDE et de Jyväskylä ;
- en parallèle, étudier concrètement la faisabilité technique de l'installation d'un TAS dans DESIR ;
- conserver le lien étroit entre mesures et simulations de spectres d'antineutrinos ;
- poursuivre le développement des simulations de puissance résiduelle afin d'obtenir la même synergie que sur les études en lien avec les neutrinos ;
- poursuivre les collaborations en cours avec les théoriciens.

## 5. Ressources et moyens

**Les ETP ne concernent pas que ces thématiques mais toutes les activités ISOL quelques soient les motivations :**

A Subatech: 4,5 ETP chercheurs (dont 0.5 de simulations à l'interface avec les physiques des neutrinos et des réacteurs) dont un post-doc et un doctorant.

+ 0,7 ETP ITA.

Total : 5,2 ETP.

Collaboration étroite avec IFIC de Valencia, et Surrey (UK).

Collaboration avec les membres de la collaboration TAGS européenne.

Collaboration avec IPNO et GANIL pour les expériences (M. Lebois, J. Wilson, D. Verney, J.-C. Thomas).

Collaboration avec les théoriciens des CEA-DAM et SPhN (modèle de QRPA, S. Péru et M. Martini).

Collaboration avec le LNHB sur le projet E-Shape et les calculs de spectres d'antineutrinos avec la méthode de sommation (M. Kellett, X. Mougeot).

### **Ressources techniques de Subatech :**

#### **E-Shape :**

Arnaud Cadiou, IR1, mécanique, 8%

Gilles Bouvet, AI, mécanique, 25%

Budget Région PdL 10k€, in2p3/fonds propres : 10k€, budget Surrey : 18k€

#### **TAGS @ ALTO :**

Arnaud Cadiou, IR1, mécanique, 8%

Gilles Bouvet, AI, mécanique, 25%

**Ressources financières :** Combien coûte le projet, globalement et à l'IN2P3 ? Quel budget est disponible ? Préciser les montants et les sources, ainsi que leur évolution temporelle. Un tableau année par année peut être judicieux.

### **Projet Antineutrinos et Puissance Résiduelle des réacteurs :**

**Budget total de Subatech depuis 2009 pour les activités ISOL toutes motivations confondues:**

De l'ordre de 5 à 7 k€ par an de la part de l'in2p3 pour la partie expériences ISOL auprès de IGISOL et ALTO.

Budget via GEDEPEON puis NEEDS (mais rien en 2014 et 2015)

Budget projet européen CHANDA (2013-mi -2018)

PICS Nantes – Valencia TAGS 2012-2014

PICS Nantes – Valencia E-Shape 2016-2018

AAP Région Petits Equipements : 10k€ (2016-2017) (E-shape)

## 6. Réalisations techniques

**Les réalisations techniques ne concernent pas que ces thématiques mais toutes les activités ISOL quelques soient les motivations puisqu'il s'agit d'expériences utilisant les mêmes dispositifs :**

Design et construction du détecteur d'électrons, design mécanique et électronique FASTER associée pour le **projet E-Shape**.

Banc de test TAGS, détecteurs ancillaires pour les expériences **TAGS** et électronique FASTER associée, mécanique pour le détecteur ROCINANTE existant pour adaptation sur ALTO, détecteur bêta pour expérience auprès d'**ALTO**.

Les perspectives de la collaboration TAGS au GANIL (DESIR) nécessiteront des développements techniques (mécaniques notamment) qui seront abordés en 2018.

## 7. Auto-analyse SWOT (facultative)

Quelles sont les forces, faiblesses, opportunités et menaces qui pèsent sur le projet.

**Projet Antineutrinos et Puissance Résiduelle des réacteurs :**

**Forces :** expertise neutrino reconnue internationalement, collaboration TAGS européenne leader mondiale de la technique, travail couplé directement aux simulations de réacteurs ou spectres, collaborations avec théoriciens et évaluateurs de données nucléaires, interdisciplinarité (neutrino, nucléaire, réacteur)

**Faiblesses :**

- 1 seul labo de l'in2p3 impliqué dans l'analyse TAGS ;
- peu d'investissement des agences de financement dans les expériences de physique nucléaire comparées aux expériences neutrinos stériles, alors que ces expériences peuvent apporter des résultats tout aussi pertinents et complémentaires à courte échéance ;
- interdisciplinarité (neutrino, nucléaire, réacteur)

## REFERENCES

**Publications de la collaboration TAGS (restreintes aux publications dans lesquelles les équipes françaises sont impliquées) :**

[2]Th.A. Mueller et al, Phys.Rev. C83(2011) 054615.

[7]M. Fallot et al. Phys. Rev. Lett. 109,202504 (2012)

[10]A.-A. Zakari et al. PRL 115, 102503 (2015)

[11]E. Valencia et al., Phys. Rev. C 95, 024320 (2017)

[12] S. Rice et al. Phys. Rev. C 96 (2017)014320.

[35]J. -L. Tain et al. PRL 115, 062502 (2015)

[1] V. Guadilla et al., Nucl. Inst. and Meth. B, in press. (2015) :

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X15012628>

[25bis] PRL « Viewpoint » on Phys. Rev. Lett. 118 (2017) by M. Fallot.

[38] V. Guadilla et al. Phys. Rev. C. 96 (2017) 014319.

### **Autres Références Antineutrinos :**

[1] A. A. Hahn, K. Schreckenbach, W. Gelletly, F. von Feilitzsch, G. Colvin, and B. Krusche, Phys. Lett. B 218, 365 (1989).

[3] G. Mention et al. Phys. Rev. D83, 073006 (2011)

[4] P. Huber, Phys.Rev. C84 (2011) 024617

[5] K. N. Abazajian et al., <http://arxiv.org/abs/1204.5379>

[6] J. C. Hardy, L. C. Carraz, B. Jonson, and P. G. Hansen, Phys.Lett. B 71, 307 (1977).

[8] Double Chooz and Reno Collaborations in Proceedings of the Neutrino 2014 Conference, <http://neutrino2014.bu.edu/>;

Daya Bay Collaboration in Proceedings of the ICHEP 2014 Conference, <http://ichep2014.es/>. J. H. Choi et al., Phys. Rev. Lett. 116, 211801 (2016).

[9] A. Hayes et al. PRL112, 202501 (2014)

[13] Dwyer & Langford, PRL 114, 012502 (2014)

[14] D.-L. Fang and B. A. Brown, PRC 91, 025503 (2015)

[15] A. A. Sonzogni, T. D. Johnson, and E. A. McCutchan, Phys. Rev. C 91, 011301(R) (2015)

[16] A. Hayes, et al. PRD, 92, 033015 (2015)

[17] A. Sonzogni, et al. PRL,2016

[18] Hayes and Vogel Annual Review of Nuclear and Particle Science, Vol.66 (2016)

[19] C. Buck et al., Physics Letters B, Volume 765 (2017).

[20] C. Giunti, Physics Letters B 764 (2017) 145

[21] X.B. Wang, J.L. Friar and A.C. Hayes, Phys. Rev. C 94.034314 (2016)

[22] Wang & Hayes Phys. Rev. C 95, 064313 (2017)

[23] Hayes et al. [arXiv:1707.07728](https://arxiv.org/abs/1707.07728)

[24] NEOS Collab. Phys. Rev. Lett. 118, 121802 (2017)

[25] Daya Bay Phys. Rev. Lett. 118 (2017)

[26] C. Giunti et al. [arXiv:1708.01133v1](https://arxiv.org/abs/1708.01133v1)

[27] A. Sonzogni et al. Phys.Rev.Lett. 119 (2017)112501

[28] M. Dentler et al. <https://arxiv.org/abs/1709.04294>

[37]P. Huber, Phys. Rev. Lett. 118, 042502 (2017)

### **Publications de l'équipe TAGS américaine sur les sujets concernés :**

[29] B.C. Rasco et al. Phys. Rev. C 95, 054328 (2017)

[30] B.C. Rasco et al. Phys. Rev. Lett. 117, 092501 (2016)

[39] M. Karny et al. Nucl. Instr. Meth. A, Volume 836, 11 November 2016, Pages 83–90

### **Autres Références Puissance Résiduelle et neutrons retardés:**

[31] Nuclear Science NEA/WPEC-25 (2007),

[32] CCFC report 2015 Fispect II, J. C. Sublet et M. Fleming

[33] J. Katakura Journal of Nuclear Science and Technologies, vol. 50, n. 8, 99-807 (2013)

[34] Report INDC(NDS)-0676 (2015), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0676/>

[36] Report INDC(NDS)-0683 (2015) <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0683/>

Publications pionnières de nos collègues de Valencia :

Algora et al., Phys. Rev. Lett. 105, 202501 (2010) et D.Jordan, A. Algora et al., Phys Rev. C 87, 044318 (2013)

Autres rapports de l'AIEA en lien avec la problématique :

Report INDC(NDS-0551), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0551/>  
Report INDC(NDS)-0577 (2010), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0577/>

### **Références Techniques d'Analyse TAGS**

[40] J. L. Tain et D. Cano-Ott NIM A571 (2007) 719

[41] J. L. Tain et D. Cano-Ott NIM A571 (2007) 728

[42] D. Cano-Ott et al. NIM A 430 (1999)333

[43] D. Cano-Ott et al. NIM A 430 (1999)488

### **Proceedings :**

A. Algora et al., Total Absorption Study of Beta Decays Relevant for Nuclear Applications and Nuclear Structure, Nuclear Data Sheets **120**, 12 (2014).

J.-L. Tain et al., Nuclear Data Sheets **120**, (2014).

M. Estienne et al. Nuclear Data Sheets **120**, 149 (2014).

J.-L. Tain et al., Proceedings of NIC-XIV, June 20-24, 2016, Niigata, Japan

J.-L. Tain et al. [EPJ Web Conf., 146 \(2017\) 01002.](#)

M. Fallot et al. [EPJ Web Conf., 146 \(2017\) 10002.](#)

A. Algora et al. [EPJ Web Conf., 146 \(2017\) 10001.](#)

V. Guadilla et al. [EPJ Web Conf., 146 \(2017\) 10010.](#)