

Les grands enjeux en structure nucléaire : quelles sont les questions et thèmes de recherche / présentation des équipes, collaborations et développements

Rapport pour le Conseil Scientifique de l'IN2P3 des 26 et 27 octobre 2017 « Physique nucléaire de basse énergie sur les installations de type ISOL – les propriétés fondamentales du noyau.

Rédacteur : S. Grévy, CENBG, 27 septembre 2017. Source principale : Document stratégique ISOL-France – août 2017.

Introduction

L'essor des recherches modernes en physique nucléaire dite « de basse énergie » (structure et dynamique nucléaires, physique du noyau atomique) repose sur deux axes : le développement de nouveaux faisceaux radioactifs, couvrant un large spectre de régime d'énergie (de quelques keV au GeV par nucléon) avec une gamme toujours croissante de masses et de rapports N/Z (faisceaux radioactifs/exotiques) et le développement de détecteurs de plus en plus performants, sélectifs et spécialisés. Le dynamisme dans ce domaine est mondial, et la décennie qui s'ouvre verra l'avènement d'une nouvelle génération d'installations avec en France SPIRAL2 et à l'étranger avec FAIR (Allemagne), SPES (Italie), FRIB (Etats-Unis), RIBF (Japon), RAON-RISP (Corée du Sud) et ARIEL (Canada).

Depuis les 4 décennies maintenant écoulées de développement constant des faisceaux radioactifs, deux grandes familles de machines se sont formées, qui se distinguent par le mode de production des espèces exotiques: méthode in-flight ou méthode ISOL (pour Isotopic Separation On-Line). Dans ce dernier cas, les produits de la réaction primaire sont collectés et intégralement thermalisés pour permettre la mise en œuvre des meilleures ressources technologiques en sources d'ions. Un faisceau radioactif d'excellente qualité optique est ainsi produit, ce qui permet d'atteindre deux objectifs que ne permet pas la technique in-flight : (1) l'injection dans de bonnes conditions dans un second accélérateur pour une post-accélération, ou (2) sans post-accélération : la manipulation de très faibles populations d'ions exotiques à des fins de mesures fines et/ou de très haute précision. **La communauté de « Physique Nucléaire ISOL Basse Energie », qui est concernée par ce document, est celle qui exploite la spécificité (2) de la technique ISOL.**

Les objectifs scientifiques de cette communauté s'inscrivent dans les grandes questions du domaine Structure et Dynamique Nucléaires telles que définies, par exemple, dans le Long Range Plan 2016/2017 de NuPECC. Néanmoins les performances et les spécificités uniques de la méthode ISOL permettent à cette communauté d'adresser avec la meilleure pertinence

possible certains domaines spécifiques (études des propriétés fondamentales statiques et dynamiques du noyau et études de l'interaction faible) qui seront introduits dans la suite de ce rapport et développés dans les rapports de M. Fallot, E. Liénard, D. Lunney et D. Verney.

Les développements liés à la technique ISOL seront eux détaillés dans le rapport de Mr Pierre Delahaye. En résumé, celle-ci a connu un développement fulgurant dans les années 60, et ISOLDE au CERN s'est rapidement établie comme un centre de référence en Europe pour cette activité. De tout temps, et encore aujourd'hui, l'impact de la communauté française sur ces développements techniques et sur l'essor de la physique associée a dès l'origine été de toute première importance. Aujourd'hui, la technique ISOL est utilisée en France au GANIL (Spiral1) et à l'IPN-Orsay (ALTO), des développements étant en cours sur ces deux sites afin d'en accroître les potentialités. De plus, la communauté française, de par son rôle historique moteur dans l'essor de la technique ISOL et de la physique associée, est bien implantée dans le réseau ISOL européen en menant des recherches sur l'ensemble des machines européennes. De ce fait, elle constitue un acteur essentiel dans l'élaboration du projet de machine ISOL européenne ultime EURISOL

Grandes questions et thèmes de recherche

A) Spécificités de la méthode ISOL

Les objectifs scientifiques de la communauté « Physique Nucléaire ISOL basse énergie » s'inscrivent dans les 7 grandes questions définies par le WG3 dans le cadre du Long Range Plan de NuPECC 2016/2017.

- I. Comment les noyaux et leur diversité émergent des interactions fondamentales ?*
- II. Comment change la structure nucléaire dans la carte des noyaux et quelles formes les noyaux peuvent ils acquérir ?*
- III. Comment la structure des noyaux change t-elle avec la température et le moment angulaire ?*
- IV. Comment unifier les approches décrivant la structure et les réactions ?*
- V. Quelle est la complexité des excitations nucléaires ?*
- VI. Comment les corrélations apparaissent dans la matière neutronique diluée, à la fois pour la structure et dans la dynamique ?*
- VII. Quelle est la dépendance en densité et en isospin de l'équation d'état de la matière nucléaire ?*

Néanmoins les performances et les spécificités uniques de la méthode ISOL permettent à cette communauté de répondre avec la meilleure pertinence possible à un sous-domaine plus spécifique de ces grandes questions :

1) *Comment évolue l'interaction nucléaire en fonction de l'isospin ?*

- Quelle est la dépendance en isospin de l'interaction spin-orbite ?
- Comment la structure en couche se modifie t'elle loin de la stabilité ?

2) *Comment expliquer les phénomènes collectifs à partir des mouvements individuels ?*

- Peut-on décrire l'équilibre entre les effets de champ moyen sphérique et les corrélations au-delà du champ moyen ?
- Comment l'îlot de stabilité des noyaux supers lourds émerge de cet équilibre ?

3) *Quelle est l'origine des éléments dans l'univers ?*

- Quels sont les noyaux pertinents pour les processus astrophysiques ?
- Quel est l'impact de leurs propriétés sur les modèles de nucléosynthèse ?

4) *Existe-t-il des courants exotiques de l'interaction faible révélant une physique au-delà du modèle standard ?*

5) *Quel est l'impact de la physique nucléaire sur les autres disciplines*

- Quel sont les noyaux pertinents pour le fonctionnement et la sureté des réacteurs nucléaires ?
- Quel est l'impact des propriétés nucléaires sur la physique des réacteurs nucléaires ?
- Quels sont les noyaux pertinents pour la physique des neutrinos ?
- Quel est l'impact des propriétés nucléaires sur la physique des neutrinos ?

Pour répondre à ces questions, la communauté ISOL étudie tout un ensemble d'observables : masse, durée de vie bêta, rayon carré moyen de charges, moments statiques magnétique et quadrupolaire, spin, probabilités de transitions électromagnétiques, probabilités d'émissions de particules retardées, spectres en énergies, distribution de force Gamow-Teller et corrélation bêta-neutrino.

La spécificité ISOL est la possibilité qu'elle offre, pour déterminer ces observables, de manipuler de très faibles populations d'ion exotiques à des fins de mesures fines et/ou de très haute précision. En ce sens, l'étude des noyaux exotiques par la méthode ISOL se fait principalement dans le domaine de la précision tandis que les expériences réalisées à plus haute énergie en utilisant les méthodes de production « in flight » relèvent plus du domaine de la découverte. En ce sens, ISOL et In-flight sont deux approches totalement complémentaires dans l'étude de la structure nucléaire.

Les techniques employées dans l'approche ISOL sont traditionnellement celles associées à la spectroscopie de décroissance, la spectroscopie laser mais aussi toutes les techniques de manipulations offertes par les pièges électromagnétiques. Ainsi, les chercheurs impliqués sur ces programmes de recherches sont aussi fortement impliqués dans le développement des techniques expérimentales et des détecteurs associés.

B) Domaine d'excellence de la communauté française dans la méthode ISOL

Le programme scientifique actuel de la communauté ISOL France permet d'apporter des réponses pour chacune des 4 thématiques énoncées ci plus haut. Expérimentalement, il s'articule autour de deux axes principaux, constituant les spécificités et domaines d'excellence de notre communauté :

(1) études des propriétés fondamentales statiques et dynamiques du noyau

(2) études de l'interaction faible

Comme précisé dans l'introduction, ce programme scientifique s'appuie fortement sur les deux sites nationaux GANIL/SPIRAL1 et ALTO mais il est aussi réalisé au sein de collaborations internationales menant des mesures sur d'autres installations ISOL dans le monde, comme IGISOL à Jyväskylä, ISOLDE au CERN et ISAC à TRIUMF. Toutes ces mesures sont évidemment complémentaires dans le sens que : soit l'instrument adapté n'est pas disponible sur les sites nationaux, soit le faisceau d'intérêt n'y est pas produit.

B.1) Propriétés fondamentales statiques et dynamiques du noyau

Le programme scientifique dans lequel la communauté française a un rôle leader se décline essentiellement dans trois régions de masses produites par des méthodes distinctes :

-i- les noyaux riches en neutrons de masse intermédiaire (incluant les produits de fission) en utilisant la photofission à ALTO,

-ii- les noyaux légers riches et déficients en neutrons produits par la fragmentation des faisceaux stables à SPIRAL1

-iii- les noyaux déficients en neutrons de masses intermédiaires et les noyaux lourds et super-lourds qui seront produits par la fusion-évaporation utilisant les faisceaux de SPIRAL2/LINAG

Ces domaines reposant sur des modes de production différents, les salles d'expériences sont elles aussi spécifiques. ALTO dispose de salle expérimentale 110, les faisceaux de SPIRAL1 sont étudiés dans la salle LIRAT et les premiers faisceaux de S3 seront étudiés sur S3-LEB. Dans les 3 cas, l'espace est limité et incomparable à ce que permet un hall comme celui de ISOLDE par exemple. Ce point souligne l'importance de la construction du hall DESIR au GANIL et de la phase2 de SPIRAL2 est de pouvoir traiter ces trois volets de physique dans un lieu unique alimenté par les trois types de faisceaux.

B.1.a) Secteur des noyaux riches en neutrons, masses intermédiaires

L'origine réelle, d'un point de vue microscopique, de la formation des fermetures de couches dites de « type spin-orbite » (nombres magiques 14, 28, 50, 126) reste mystérieuse et largement débattue. Les analyses les plus récentes au travers des théories effectives issues de la QCD montrent trois origines possibles : le terme spin-orbite à deux corps, la force tensorielle et les termes à trois corps. Ces effets de couches jouent un rôle essentiel dans les processus de nucléosynthèse responsables de la formation des éléments du fer à l'uranium, car on s'attend naturellement à ce que l'interception du chemin du processus r par les lignes isotoniques correspondant à ces nombres magiques ait un rôle déterminant dans la formation des pics d'abondance. La région de la table des noyaux alimentée en méthode ISOL par la fission des actinides, en particulier par celle de ^{238}U est particulièrement intéressante pour explorer ce domaine de physique car elle couvre les régions de formation des nombres magiques de spin-orbite 50 et 82. C'est cette région qui est en cours d'exploration à ALTO et fait l'objet de la phase 2 de SPIRAL2.

La première phase de prises de données à ALTO (phase « β -decay »), rendue possible par l'installation des dispositifs BEDO et TETRA, met en œuvre les techniques de spectroscopie γ et électrons β -retardée, et de mesure des probabilités d'émission neutron β -retardée (voir tableau de la Section 2.1). Les mesures ont dans un premier temps été focalisées sur la région de ^{78}Ni , $N=50$. Elles ont été couronnées de succès, en particulier avec l'obtention des premières indications d'une coexistence de forme et de l'existence d'une résonance Gamow-Teller Pygmée dans cette région. La toute première observation de rayonnements γ d'«ultra»-haute énergie dans la radioactivité de noyaux exotiques, interprétés comme une signature de la désexcitation d'une résonance dipolaire Pygmée, alimentée par décroissance β , a également été obtenue. La présence de cette résonance serait favorisée par l'apparition d'une peau de neutrons, immédiatement après la fermeture de couche $N=50$, dans la région de ^{78}Ni .

La communauté française est par ailleurs impliquée dans des collaborations menant des mesures dans ce secteur de la carte des noyaux sur d'autres installations ISOL dans le monde. Ces mesures sont, comme annoncé en préambule, complémentaires. A titre d'exemple on peut mentionner les mesures de spectroscopie laser dans la région de ^{132}Sn ($N=82$) avec le dispositif CRIS à ISOLDE, ou de masse dans la région $N=32$ avec le dispositif TITAN à TRIUMF (Vancouver).

Les noyaux riches en neutrons dans cette gamme de masse jouent également un rôle important dans d'autres secteurs de recherche comme la physique des réacteurs nucléaires et la physique des neutrinos. Les propriétés de désintégration bêta des produits de fission exotiques restent mal connues et ont un impact important dans ces champs disciplinaires. On peut citer notamment l'évaluation de la puissance résiduelle des réacteurs (enjeu de sûreté nucléaire) ou

encore l'existence potentielle de neutrinos stériles qui dépend de l'évaluation des spectres en énergie des antineutrinos des réacteurs. La communauté française a une expertise reconnue internationalement dans ces domaines grâce aux résultats de plusieurs campagnes de mesures (TAS) à JYFL. Une campagne de mesures utilisant la technique TAS, couvrant ces objectifs scientifiques ainsi que la structure et l'astrophysique nucléaires, est en préparation auprès d'ALTO avec le couplage d'un spectromètre TAS existant à la ligne de faisceau TETRA.

Pour ce qui concernent les prospectives, une deuxième phase de mesures à ALTO est en cours de préparation avec l'installation d'un spectromètre de masse à piège de Penning : MLLTrap, d'un réfrigérateur à dilution pour des mesures de facteur g et de spin par orientation nucléaire à très basse température couplé à un système RMN : POLAREX et d'un système de spectroscopie et d'orientation nucléaire par pompage laser : LINO.

Cette deuxième phase permettra d'étendre considérablement le programme de mesures dans ce secteur de masse à ALTO et de l'ouvrir à d'autres types d'observables inatteignables dans le cadre actuel du programme β -decay. La mise en service simultanée des dispositifs POLAREX et LINO donnera à ALTO la toute première place mondiale dans le domaine de l'orientation nucléaire. Cette deuxième phase démarrera en 2019. Dans l'hypothèse d'une phase 2 de SPIRAL 2 (et uniquement dans cette hypothèse), i.e. dans le cas où des faisceaux de masse intermédiaire riches en neutrons, deux ordres de grandeurs plus intenses qu'à ALTO, deviendraient disponibles à DESIR, l'ensemble de ce programme aurait vocation naturelle à être poursuivi sur le site du GANIL.

B.1.b) Secteur des noyaux légers riches et déficients en neutrons

C'est dans ce secteur que sont actuellement produits avec SPIRAL1 les noyaux pour tester le Modèle Standard de l'interaction faible en utilisant la décroissance β nucléaire (voir section 2.3.2). Dans le cadre des mesures des propriétés fondamentales du noyau atomique pour les études de structure nucléaire, un nombre limité d'expériences a été réalisé par le passé. Ce constat s'explique par le nombre modéré d'isotopes produits jusqu'ici par SPIRAL1 et de l'impossibilité d'installer des dispositifs expérimentaux autre que LPCTrap sur la ligne LIRAT. Parmi les résultats marquants, notons les mesures des rayons de charge des noyaux à halo ${}^6\text{He}$ et ${}^8\text{He}$ et la distribution de la force Gamow-Teller du noyau ${}^{33}\text{Ar}$.

Cette situation va s'améliorer dans les prochaines années avec de nouveaux faisceaux intéressants développés par l'upgrade de SPIRAL1.

Le programme scientifique futur devrait s'articuler autour de mesures de masses de noyaux légers riches en neutrons (Ar, Cl, P et K) avec dans un premier temps le MR-TOF-MS PILGRIM ensuite avec MLL-TRAP/PIPERADE sur DESIR ainsi que des mesures de décroissances β -proton pour des noyaux légers déficients en neutrons (${}^{22}\text{Al}$, ${}^{26}\text{P}$, ${}^{31}\text{Ar}$, ${}^{35}\text{Ca}$...).

B.1.c) Secteur des noyaux déficients en neutrons de masses intermédiaires et des noyaux lourds et super-lourds

Noyaux déficients en neutron de masses intermédiaires

Les noyaux le long de la ligne $N = Z$ présentent un intérêt particulier pour plusieurs raisons: (1) les protons et les neutrons occupent les mêmes orbitales. En conséquence, les effets de couches et de déformation sont amplifiés dans ces noyaux, (2) leur symétrie inhérente en fait des candidats idéaux pour les études des corrélations d'appariement n-p et la brisure de symétrie d'isospin, (3) ils se situent le long du chemin du processus astrophysique rp. Ainsi, les noyaux $N = Z$ constituent de bons candidats pour tester la validité des modèles théoriques et la connaissance de leurs propriétés contribue également à la compréhension de ce processus astrophysique

Les noyaux décroissant par la radioactivité un- ou deux-protons ne sont généralement pas accessibles par la méthode ISOL, car ils ont une durée de vie trop courte. Cependant les processus β -retardés (β_{1p} , β_{2p} , β_{3p}) permettent l'étude des phénomènes d'impureté d'isospin, la caractérisation de niveaux importants pour les processus astrophysique et l'étude de l'interaction faible. De telles mesures ont été menées à ISOLDE, Jyväskylä et au GANIL.

La disponibilité de nouveaux noyaux exotiques avec SPIRAL1 et la mise en service de S³ vont ouvrir de nouvelles perspectives dans ce domaine. On peut mentionner en particulier, pour les noyaux situés autour de la masse 100, ^{112,114}Ba qui sont des candidats pour observer la radioactivité 3α et l'émission de cluster de ¹²C. Ces noyaux sont inaccessibles aujourd'hui mais seront étudiés sur l'installation S3-LEB.

Pour les expériences de mesures de masse ou de spectroscopie laser, la région des noyaux $N = Z$ allant du ⁸⁰Zr jusqu'au noyau doublement magique ¹⁰⁰Sn va être accessible avec S3-LEB et DESIR. Dans la région de masses $A \approx 80$, les noyaux avec $N \approx Z$ sont susceptibles de fournir des informations importantes sur la structure nucléaire dans une région de haute déformation et des données pour la modélisation du processus astrophysique rp. Au voisinage de ¹⁰⁰Sn les informations spectroscopiques fourniront un test rigoureux pour les modèles nucléaires. L'ensemble de ces noyaux donne également l'opportunité d'étudier les effets des corrélations d'appariement neutron-proton pour les noyaux $N=Z$ les plus lourds inaccessibles aujourd'hui.

Noyaux lourds et super-lourds

L'étude des noyaux lourds et très lourds ne se limite pas à une course aux extrêmes mais aborde à travers leur spectroscopie les questions de la collectivité, de l'évolution des couches et des nombres magiques ..., ainsi que la dynamique des réactions. La spécificité de cette région de masse réside, d'une part, dans le fait que ces noyaux n'existent que grâce à des effets de couches, et, d'autre part, dans les faibles sections efficaces de production et faibles temps

de vie qui requièrent la mise en œuvre de techniques spécifiques.

Certaines de ces techniques sont déjà maîtrisées (spectroscopie prompte et après décroissance auprès des spectromètres RITU, SHELLS, LISE et prochainement VAMOS-GF et SIRIUS@S³), d'autres doivent encore être mises en œuvre ou généralisées comme par exemple la spectroscopie laser ou les mesures de masse qui ont émergés récemment et ouvrent de nouvelles perspectives dans cette région.

Avec le démarrage de SPIRAL2-Phase1 le programme scientifique autour des noyaux lourds/super-lourds s'articulera autour de S³. Le développement de la ligne basse énergie de ce nouvel instrument ouvre de nouvelles perspectives en physique nucléaire de basse énergie. En effet, pour la première fois, la structure de différents isotopes d'actinium a pu être étudiée grâce à des lasers, lors d'une expérience menée au Centre de Ressources du Cyclotron de Louvain-la Neuve (Belgique). Le succès de cette expérience réside notamment dans la technique expérimentale innovante utilisée, particulièrement performante qui est développée dans le cadre de la collaboration S³. Elle consiste à ioniser, au moyen de lasers, des atomes transportés dans un jet de gaz supersonique. Les perspectives qu'elle ouvre, notamment en regard du programme scientifique de l'installation S³ de GANIL-SPIRAL2, est rapportée dans un article paru dans la revue Nature Communications. Pour la première fois de nouvelles informations (forme du noyau, moments magnétiques,...), complémentaires à la spectroscopie nucléaire seront disponibles dans cette région.

Par ailleurs, avec les pièges MLLTRAP et PIPERADE à DESIR, les mesures de masse précises des noyaux les plus lourds produits par S3-LEB seront accessibles réalisables, ainsi que l'étude de leurs modes de décroissance au moyen de pièges à ions, complétant ainsi les mesures des propriétés fondamentales des noyaux dans ce secteur.

En attendant la mise en service de S³ dans les années à venir, la communauté française poursuit des collaborations sur cette thématique auprès d'autres accélérateurs et notamment au GSI où récemment le schéma d'ionisation du Nobélium (Z=102) par spectroscopie laser a été mesuré pour la première fois, ouvrant des perspectives pour les mesures futures à S³.

B.2 Interaction fondamentales

Cette thématique concerne l'étude, dans des processus d'interaction faible à basse énergie, des interactions fondamentales entre les constituants élémentaires de la matière (quarks et leptons). Ces études sont menées dans le cadre de la recherche de déviations et/ou d'extensions du Modèle Standard de la physique des particules.

Deux types de mesures sont actuellement menés : (i) des mesures des caractéristiques des transitions β de type $0^+ - 0^+$ Fermi super-permises ainsi que des transitions β miroir et (ii) des mesures de corrélations angulaires $\beta-\nu$ où le paramètre de corrélation $a_{\beta\nu}$ est déterminé. Les deux types de mesures sont des expériences de très haute précision (de l'ordre de quelques 10^{-3} ou mieux pour les paramètres mesurés).

Dans le cadre des mesures des transitions de Fermi et miroir, le but est de déterminer avec une précision ultime la durée de vie des noyaux d'intérêt, leur rapport d'embranchement pour la branche super-permise ainsi que la chaleur de réaction. Pour les transitions miroir, le paramètre de mélange Fermi – Gamow-Teller ρ doit être déterminé également. Ces mesures permettent ensuite de tester l'hypothèse de la conservation du courant vectoriel (CVC), de déduire la constante de couplage du courant vectoriel de l'interaction faible g_V et, avec une constante de couplage similaire pour la décroissance du muon, l'élément de matrice V_{ud} de la matrice de mélange de quarks CKM. Une fois V_{ud} déterminé, l'unitarité de la matrice de mélange CKM peut être testée. Des expériences de ce type sont actuellement menées au GANIL sur le séparateur LISE et sur l'IBE de SPIRAL1, à ISOLDE, à Jyväskylä sur IGISOL ainsi qu'à TRIUMF dans des collaborations nationales et internationales.

Des mesures de très hautes précisions du paramètre de corrélation angulaire $\beta-\nu$, $a_{\beta\nu}$, dans des décroissances β nucléaires permettent de tester de manière directe la structure $V-A$ du modèle standard. Les précisions relatives de ce paramètre sont actuellement de l'ordre de 0,7% et excluent des courants exotiques pouvant exister dans l'interaction faible à ce niveau de précision. Dans le cas d'une décroissance miroir mentionnée plus haut, la mesure de $a_{\beta\nu}$ permet de déterminer précisément la valeur du rapport de mélange ρ entre les composantes Gamow-Teller (GT) et Fermi (F) de la transition, entrée indispensable pour déterminer l'élément de matrice V_{ud} avec des transitions miroir. Ces études sont actuellement menées avec LPCTrap au GANIL et un nouveau dispositif expérimental, WISARD, est en cours d'installation à ISOLDE.

Dans le cadre des transitions β super-permises, que ce soit les transitions $0^+ - 0^+$ ou les transitions miroir, des améliorations significatives peuvent être obtenues dans les années à venir. Pour les premiers, une extension de la plage de mesure vers des noyaux plus lourds en gardant les mêmes précisions semble hautement souhaitable. Cette extension permettra de tester l'hypothèse CVC sur une gamme de masse nettement plus large (de $A=10$ à 74 aujourd'hui avec cependant des données imprécises pour $A=62$ et 74 à $A=10-98$ avec de nouvelles mesures). L'hypothèse CVC est un point clé indispensable pour déterminer l'élément de matrice V_{ud} . Ces nouvelles mesures seront uniquement faisables à DESIR avec la production des noyaux d'intérêt avec S3.

La situation est différente pour les transitions β miroir. Jusqu'à il y a peu, les informations

nécessaires pour déterminer la valeur de V_{ud} déduite des transitions miroir étaient extraites des résultats d'expériences visant d'autres objectifs. La mesure de paramètres des transitions miroir spécifiquement pour déterminer V_{ud} ont commencé seulement très récemment, notamment auprès de la station d'identification de SPIRAL1 et à ISOLDE. Pour cette raison des mesures de précision des transitions miroir ont un potentiel énorme inexploré et devraient permettre d'améliorer en quelques années de manière significative la précision de V_{ud} déterminé avec des transitions miroir. Des mesures de ce type peuvent être menées dans différents laboratoires (GANIL, ISOLDE, Jyväskylä). DESIR avec des noyaux produits par SPIRAL1 sera l'endroit de choix, parce que les noyaux d'intérêt pourront être produits avec des taux inégalés et les dispositifs expérimentaux nécessaires seront disponibles dans cette installation (DETRAP, BESTIOL).

Pour les mesures de corrélations angulaires, les projets de nouvelles expériences prennent en considération l'analyse récente de données acquises au LHC au CERN qui a permis de déduire des contraintes très fortes sur l'existence de courants exotiques dans l'interaction faible. Même si ces contraintes ont été obtenues dans un cadre théorique et expérimental bien défini, il est communément admis aujourd'hui dans la communauté internationale que des précisions de l'ordre de 10^{-3} sur le paramètre de corrélation angulaire β - ν $a_{\beta\nu}$, déduit de l'étude des désintégrations β nucléaires, sont nécessaires pour rester compétitif avec les résultats du LHC dans les 10 ans qui viennent. Si atteindre une telle précision pour $a_{\beta\nu}$ semble être aujourd'hui à la limite de ce qui est faisable expérimentalement, notamment par rapport aux effets systématiques des mesures à contrôler, la précision sur $a_{\beta\nu}$ qui est accessible aujourd'hui avec LPCTrap est bien suffisante pour extraire le rapport de mélange ϱ de transitions miroirs avec une précision permettant d'améliorer la mesure du terme V_{ud} de la matrice CKM. De nouveaux faisceaux, développés dans le cadre de l'upgrade SPIRAL1, comme ^{33}Cl ou ^{37}K , devraient être disponibles à partir de 2018 pour réaliser les premières expériences sur la ligne LIRAT du GANIL. La précision sur V_{ud} obtenue avec les noyaux miroirs devrait être améliorée d'un facteur 3 ou plus par rapport à la valeur actuelle. Ces mesures continueront dans l'installation DESIR.

Le projet WISARD actuellement en construction à ISOLDE dans le cadre d'une collaboration internationale portée par le CENBG vise à déterminer le paramètre $a_{\beta\nu}$ des transitions de type Fermi avec une précision de l'ordre du pour mille en utilisant l'effet Doppler lors d'une décroissance β p avec ^{32}Ar . Le dispositif sera amélioré étape par étape pour atteindre la précision requise. Elle vise à porter la précision actuelle du paramètre $a_{\beta\nu}$ pour les transitions vectorielles de 0.8% à 0.1%. La même technique pourra être utilisée pour d'autres noyaux (notamment ^{20}Mg , aussi disponible avec des intensités suffisantes à ISOLDE) et pour des transitions de type Gamow-Teller pour la recherche des courants exotiques tensoriels. A plus long terme, une expérience similaire pourra être installée auprès de DESIR en utilisant le

dispositif de piégeage d'ions PIPERADE.

En parallèle, la communauté Française est impliquée dans le projet MORA, porté par le GANIL, ayant pour but principal de polariser des ions à l'intérieur d'un piège de Paul en utilisant des lasers pour accéder à des paramètres sensibles à la violation de la symétrie fondamentale T de renversement du temps dans les décroissances β . Le dispositif expérimental permettra de guider les lasers vers le centre du piège où se trouve le nuage d'ions d'intérêt et permettra de contrôler en permanence le degré de polarisation du nuage d'ions pendant les expériences. Ce dispositif sera d'abord installé à Jyväskylä en Finlande où la polarisation des ions serait assurée par les lasers fournis par la collaboration COLLAPS. La première expérience envisagée consistera à mesurer le paramètre D , sensible à la violation de CP et donc de T , dans la décroissance β de ^{23}Mg . La précision actuelle devrait déjà être améliorée par cette première mesure qui permettrait, de surcroît, de tester les corrections calculées dans le cadre du modèle standard. Le dispositif sera ensuite installé à DESIR au GANIL.

C) Equipes, collaborations et développements

La communauté française des scientifiques qui se reconnaissent dans la physique nucléaire ISOL basse énergie est importante et dynamique. A l'IN2P3, cette communauté est répartie dans les laboratoires GANIL, CENBG, IPNO, LPC Caen, CSNSM, IPHC, LPSC et SUBATECH. Récemment l'IRFU/CEA a rejoint cette thématique avec notamment son implication dans la ligne basse énergie de S^3 .

Les programmes de recherches reposent actuellement sur l'utilisation de plateformes nationales en cours d'exploitation (SPIRAL1 et ALTO) et des activités hors de France dans le cas où les équipes sont leaders au niveau international, sur des projets phares, complémentaires de ceux menés en France.

Par ailleurs, les laboratoires sont fortement impliqués dans le développement des futures plateformes françaises (ALTO, S^3 -LEB et DESIR) avec d'une part un leadership dans les programmes scientifiques à venir et d'autre part le développement d'une instrumentation de pointe.

L'animation de cette communauté scientifique s'effectue à travers l'organisation de workshops, séminaires et conférences (Colloque GANIL, GANIL-SPIRAL2 week, Isol-France meeting,...) et est actuellement historiquement structurée autour des projets (ex : DESIR, S^3 -LEB, ALTO, ...).

Afin de répondre aux objectifs ambitieux présentés lors du Conseil Scientifique de l'IN2P3 des 26 et 27 octobre, nous proposons un certain nombre d'actions pour une meilleure coordination et organisation de la communauté française.

Une structure ISOL France a été créée en Mars 2017 avec pour objectif d'échanger, lors de réunions annuelles, sur les programmes scientifiques, les développements techniques et de fédérer les équipes de recherche à l'échelle nationale. La première initiative a été la rédaction d'un document stratégique discuté dans l'ensemble de la communauté

De manière à assurer une adéquation entre -i- les programmes scientifiques, -ii- les développements de faisceaux radioactifs auprès des plateformes et -iii- la disponibilité d'une instrumentation adaptée, nous proposons la constitution au sein de la communauté ISOL France d'un comité de coordination des programmes scientifiques et, pour l'instrumentation et la R&D, la valorisation du master projet existant « ions radioactifs » pour le développement et la R&D des faisceaux par la méthode ISOL sur les plateformes.

D'une façon générale, la communauté ISOL France contribuera au sein du Groupement de Recherche (GDR) RESANET "Réactions, Structure et Astrophysique Nucléaire: Expériences et Théories" à consolider et à accroître l'expertise de la communauté française dans la compréhension des propriétés complexes du noyau et de la matière nucléaire.

La liste des équipes Françaises et leur implication dans les programmes de physique et dans les développements techniques sont listés ci-dessous. Un tableau donnant les FTE impliqués sur les programmes scientifiques et sur la R&D Instrumentation et Cible-Source est ensuite donné.

GANIL

Physics cases :

- Weak interaction studies
- Fundamental properties of the nucleus
- Laser spectroscopy measurements
- Mass measurements

Instrumentation and experimental techniques

- RIB developments : SPIRAL 1
- Experimental platforms : LIRAT, S3-LEB, DESIR

Group

J.C. Thomas (CR1), H. Savajols (DR2), P. Delahaye (CR1), L. Caceres (CEA), D. Ackermann (CEA), J. Piot (CR2), B. Bastin (CR1), N. Lécèsne (IR1), R. Leroy (CEA), M. Lewitowicz (DR1), A. Fantina (CR2) +2 PhD theses to start in 2017.

Collaboration

IPN Orsay, LPC Caen, CENBG Bordeaux, CSNSM Orsay, IPHC Strasbourg, K.U. Leuven, U. Mainz, U. Jyväskylä, LMU Munich, U. Manchester, IFIC-CSIC Valencia, IEM-CSIC

Madrid, CIEMAT Madrid, UPC Barcelona, FLNR JINR Dubna, TRIUMF Vancouver, GSI Darmstadt, IRFU Saclay.

IPNO

Physics cases

- Beta-decay properties of neutron-rich nuclei around 78Ni
- Study of neutron-rich nuclei in the lanthanide region
- Fundamental properties of the nucleus
- Laser spectroscopy measurements
- Nuclear orientation measurements
- Mass measurements

Instrumentation and experimental techniques

- Molecular beams
- Target and Ion Source Development :IRENA (Febiad-type IS), RIALTO (Resonant Ionization Laser Ion Source), Uranium carbide target development (coll. SPIRAL2)
- Detection systems : BEDO, TETRA, POLAREX, MLL-TRAP, LINO

Group

C. Delafosse (PhD), S. Franchoo (CR1), A. Gottardo (Post Doc), J. Guillot (PhD), F. Ibrahim (DR2), F. Le Blanc (DR2), M. Lebois (MdC), M. MacCormick (CR1), I. Matea (MdC), E. Minaya Ramirez (Post Doc), B. Roussière (DR2), L. Vasquez Rodriguez (PhD), D. Verney (DR2), D. Yordanov (CR2)

Collaboration

CSNSM, GANIL, IPHC Strasbourg, CENBG Bordeaux, LPSC Grenoble, ILL Grenoble, IRFU Saclay, Univ. Surrey, FLNR JINR Dubna, BLTP JINR Dubna, TRIUMF Vancouver, Univ Manchester, Univ. Leuven, ISOLDE CERN, IFIN-HH Bucharest-Magurele, Saha Institute Kolkota, Tandem CNEA Buenos Aires, Univ Novi Sad Serbia, Univ Niigata Japan, Univ. Sofia, ELI-NP Bucharest, Riken Tokyo, MLL Munich, Subatech Nantes, LNL Legnaro, IOP VAST Hanoi

CENBG

Physics cases

- Weak interaction studies : Pure Fermi $0^+ \rightarrow 0^+$ decays, Mixed Fermi and GT Mirror decays and Search for exotic currents in β decay
- Exotic decay modes on the proton-rich side of the nuclear chart
- Mass measurements
- Beta decay properties of neutron-rich nuclei
- Nuclear structure properties of neutron-rich nuclei
- Properties of r-process nuclei between $N=50$ and 82

Instrumentation and experimental techniques

- Beam purification : HRS, PIPERADE
- Detection systems : Decay station for $\beta\gamma$ coincidences, Precisely efficiency calibrated HP germanium detector and Silicon Cube

Group

M. Aouadi (PhD), P. Ascher (CR2), B. Blank (DR1), M. Gerbaux (MCF1), J. Giovinazzo (DR2), S. Grévy (DR2), T. Goigoux (PhD), T. Kurtukian Nieto (CR1)

Collaboration

GANIL, LPC Caen, IPN Orsay, IPHC Strasbourg, MPIK Heidelberg, JYFL Jyväskylä, TRIUMF Vancouver, Univ. Guelph, Univ. Leuven, INP Rez, ISOLDE CERN, IFIN-HH Bucharest-Magurele, MSU East Lansing, RIKEN Tokyo, CSIC Valencia, RNCP Osaka

CSNSM

Physics cases

- Beta decay properties of neutron-rich nuclei
- Nuclear structure properties of neutron-rich nuclei
- Decay studies in the ^{132}Sn region
- Binding energies of exotic nuclides
- Masses (neutron-rich, neutron-deficient, heavy nuclides)

Instrumentation and experimental techniques

- Ion-beam manipulation for mass spectrometry & nuclear spectroscopy
- Ion traps
- Ion sources and beam transport
- Neutron detectors for βn coincidences

Group

Permanents : Astier, Deloncle, Gaulard, Georgiev, Ljungall, Lopez-Martens, Lozeva, Lunney, Petrache, Rocca

PhD/PostDoc : Chauveau, Dupont, Huang, Lv, Mougeot, Thoer

Collaboration

Beta-decay: ILL, ALTO, ISOLDE, RIKEN, U. Osaka, IBS

Masses: CENBG, CERN, MPIK, TRIUMF, GSI, U. Greifswald

In-trap: IPN, LMU, CENBG

Nuclear Orientation : ILL, LPSC, IPNO, Univ. Surrey, ISOLDE CERN, Univ. Tennessee, Univ. Novi Sad, Oak Ridge National Laboratory, Univ. Niigata

LPC-Caen

Physics cases

- Weak interaction studies : Search for exotic currents in weak interaction from precise measurements of correlation parameters in pure F or GT nuclear β decay and Precise measurement of correlation parameters in mirror decays

Instrumentation and experimental techniques

- Beam handling : Radio Frequency Quadrupole
- Detection systems : Phoswich for electron detection
- DAQ system

Group

G. Ban, D. Durand, X. Fléchar, E. Liénard, F. Mauger, G. Quéméner

Collaboration

GANIL, CENBG Bordeaux, IPN Lyon, CIMAP Caen, CELIA Bordeaux, IKS Leuven, JYFL Jyväskylä, , ISOLDE CERN, NSCL East Lansing, Univ. Manchester

IPHC

Physics cases

- Fundamental properties of the nucleus : Conserved Vector Current and Meson Exchange Current
- Beta decay properties of neutron-rich $N > 50$ Ge nuclei
- Astrophysical aspects
- Nuclear structure aspects

Instrumentation and experimental techniques:

- tape transport system

Group

P. Dessagne (DR2), F. Didierjean (IR2), G. Duchêne (DR1)

Collaboration

IPNO, GANIL, CENBG

LPSC

Physics cases

- Beta-decay, prompt-fission, isomer and ground-state studies of neutron-rich nuclei
- Nuclear structure of astrophysically relevant nuclei of the neutron-rich $A=160$ region
- Onset of deformation beyond ^{78}Ni and ^{132}Sn
- Shell-model studies around ^{132}Sn
- Pygmy Dipole Resonance studies via β -decay
- Shape coexistence and deformation around ^{68}Ni
- Nuclear orientation measurements

Instrumentation and experimental techniques

Detection systems : FATIMA: Fast-Timing Array, Conversion-Electron Detectors, Ge detectors

Target and Ion Source Development : ECR Charge Breeder

Group

J. Angot (IR2), I. Grachev (PhD), T. Lamy (IRHC), M. Ramdhane (PR), G. Simpson (CR1), G. Thiamova (MdC), T.Thuillier (IR1)

Collaboration

UC Madrid, CSIC Madrid, Univ Warsaw, ILL Grenoble, Manchester, Univ Cologne, CSNSM, IPNO, GANIL, IPHC, ILL, IRFU Saclay, Univ. Surrey, Univ West of Scot., Univ. Leuven, TU Darmstadt, ISOLDE CERN, IFIN-HH Bucharest-Magurele, LNL Legnaro (SPES), Univ Tenesse, Univ Novi Sad Serbia, RIKEN Tokyo, CNS Tokyo

SUBATECH

Physics cases

- Properties of r-process nuclei between $N=50$ and 82
- Applications : reactor decay heat, antineutrino spectra and beta-delayed neutron emission

Instrumentation and experimental techniques

Detection systems : Ancillary detectors for TAGS experiments, Electron detector

Group

L. Le Meur (PhD – 30/09/2018), M. Estienne (CR1), M. Fallot (MCF), L. Giot (MCF), A. Porta (MCF), V. Guadilla (postdoc 01/10/2017-30/09/2019). Total of FTE for this program: 4.5 FTE

Collaboration

CSIC Valencia, Surrey, GANIL, IPN Orsay, JYFL Jyväskylä, LNHB, CEA Bruyères-Le-Châtel, CEA Saclay et Cadarache

Bilan des ressources RH impliqués dans le développement des thématiques scientifiques ISOL, de l'instrumentation associée et des ensembles cible-source.

	Chercheurs Enseignants-Chercheurs	ITA Instrumentation "ISOL"	Doctorants Post-Doctorants	FTE/an (hors Cible/Source)	ITA Cible Source "ISOL"
CENBG	6	4	2	8	NA
CSNSM	10	0,25	7	8	NA
GANIL	10	3	4	13	6
IPHC	2	1	0	3	NA
IPN Orsay	9	1	6	11,5	2
LPC Caen	6	5	0	7,7	NA
LPSC	2	3	1	3,7	NA
SUBATECH	4	1	2	5,2	NA
TOTAL	46	11	22	~50	