

Prospectives Nationales 2020-2030 Physique Nucléaire et Astrophysique Nucléaire

Contribution aux perspectives du GT02

Question cadre : Quelle stratégie de développement de nos installations de physique nucléaire ?

Groupe de réflexion composé de (ordre alphabétique)

Nom, Prénom, laboratoire

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| - Angot, Julien, LPSC | - Ibrahim, Fadi, IPN Orsay |
| - Assié, Marlène, IPN Orsay | - Jardin, Pascal, GANIL |
| - Ascher, Pauline, CENBG | - Leblanc, François, IPN Orsay |
| - Beaumel, Didier, IPN Orsay | - Lecesne, Nathalie, GANIL |
| - Blank, Betram, CENBG | - Lewitowicz, Marek, GANIL |
| - Blumenfeld, Yorick, IPN Orsay | - Liénard, Etienne, LPC Caen |
| - Bougault, Rémi, LPC Caen | - Lunney, David, CSNSM |
| - Càceres, Lucia, GANIL | - Matta, Adrien, LPC Caen |
| - Cheikh Mhamed, Maher, IPN Orsay | - MacCormick, Marion, IPN Orsay |
| - Clément, Emmanuel, GANIL | - Maunoury, Laurent, GANIL |
| - De France, Gilles, GANIL | - Mattea, Iolanda, IPN Orsay |
| - Delahaye, Pierre, GANIL | - Minaya Ramirez, Enrique, IPN Orsay |
| - De Oliveira, François, GANIL | - Orr, Nigel, LPC Caen |
| - Dubois, Mickaël, GANIL | - Porta, Amanda, Subatech Nantes |
| - Ducret, Jean Eric, GANIL | - Perrot, Luc, IPN Orsay |
| - Estienne, Magali, Subatech Nantes | - Piot, Julien, GANIL |
| - Fallot, Muriel, Subatech Nantes | - Quéméner, Gilles, LPC Caen |
| - Flavigny, Freddy, LPC Caen | - Serani, Laurent, CENBG |
| - Franberg, Hanna, GANIL | - Savajols, Hervé, GANIL |
| - Gall, Benoît, IPHC | - Stefan, Iulian, IPN Orsay |
| - Georgiev, Georgi, CSNSM | - Thuillier, Thomas, LPSC |
| - Grévy, Stéphane, GANIL / CENBG | - Verney, David, IPN Orsay |
| - Harakeh, Muhsin, KVI | - ... |
-

Description de la contribution

Etat actuel des installations

Les installations de faisceaux radioactifs en France sont principalement organisées autour de l'installation nationale GANIL - SPIRAL 2, et de l'installation pilote pour la photofission ALTO à l'IPN d'Orsay. Depuis les années 80, le GANIL permet l'étude des réactions et des propriétés des noyaux exotiques par la fragmentation des faisceaux d'ions lourds (^{12}C à ^{238}U) accélérés à des énergies intermédiaires (50-100 AMeV). Ces études ont été rendues possibles par le développement pionnier de techniques en vol,

tels que les séparateurs SISSI et les spectromètres SPEG, ou LISE. A plus basse énergie, le spectromètre VAMOS permet d'étudier d'autres noyaux produits par d'autres mécanismes de réactions, tels que la fusion, le transfert, ou la fission. Malgré une offre en faisceaux primaires assez peu renouvelée, la communauté de physique reste très attachée aux spectromètres LISE et VAMOS, qui ont su rester attractifs grâce à une instrumentation en constant perfectionnement. Depuis 2001, GANIL s'est doté de SPIRAL 1, qui utilise la fragmentation des faisceaux du GANIL dans une cible épaisse pour produire des faisceaux radioactifs par la méthode ISOL. A très basse énergie ces faisceaux peuvent être dirigés vers LIRAT. Le plus souvent, ils sont ré-accélérés dans le cyclotron CIME à des énergies de 10 à 20 AMeV. SPIRAL 1 délivre des faisceaux de gaz légers très intenses (He, N, O, F, Ne Ar, Kr). L'installation a récemment été améliorée pour permettre par un nouveau schéma d'ionisation la production d'éléments dits « condensables », de masse légère par fragmentation ($A < 90$) et plus lourde par fusion-évaporation. Le domaine de prédilection actuel de SPIRAL 1 est la structure nucléaire utilisant les réactions de transfert, fusion, et d'excitation Coulombienne. SPIRAL 1 délivre de nouveaux faisceaux de fragmentation depuis 2019, après un redémarrage compliqué par le peu de temps en ligne. L'attractivité de SPIRAL 1 dépendra dans le futur de la disponibilité de l'installation pour les développements de nouveaux faisceaux. Ceux-ci seront indispensables pour les programmes de DESIR.

Le projet d'installation polyvalente SPIRAL 2 est élaboré dès le début des années 2000, en parallèle du démarrage de SPIRAL 1. SPIRAL 2 est basé sur un driver de type LINAC permettant la production de faisceaux très intenses de p, d (5mA@40MeV) et d'ions lourds (plusieurs μA à des énergies $\leq 14,5$ AMeV). SPIRAL 2 est inscrit sur la liste ESFRI, qui définit la feuille de route des grandes infrastructures de recherche européennes. Les objectifs principaux de SPIRAL 2 sont, d'une part, la production de faisceaux superlourds et déficients en neutrons ($N=Z$) par la technique en vol auprès du Super-Séparateur-Spectromètre S3 (phase 1) utilisant des réactions de fusion des ions lourds délivrés par le LINAC, et d'autre part, la production de faisceaux radioactifs riches en neutrons par la méthode ISOL (phase 2), utilisant la fission d'une cible d'UCx induite par neutrons, produits sur un convertisseur d - n. SPIRAL 2 sera doté d'un hall expérimental de basse énergie, DESIR, qui bénéficiera des faisceaux de SPIRAL 1, de la phase 2 de SPIRAL 2, et des faisceaux S3 stoppés dans une cellule gazeuse, qui constitue la ligne basse énergie de S3 (S3-Low Energy Branch). Afin de préparer la phase 2, le banc de test PARRNe est créé auprès de l'IPN d'Orsay. PARRNe est rapidement doté d'un accélérateur d'électrons (l'ancien injecteur du LEP). Cette installation, renommée ALTO (pour Accélérateur Linéaire et Tandem à Orsay), est la première à utiliser la photofission pour la production de faisceaux riches en neutrons par la méthode ISOL. ALTO est actuellement une installation pilote où de nombreux procédés sont testés pour la production de faisceaux de produits de fission. Ces travaux sont conduits en collaboration avec ISOLDE, SPES, et TRIUMF, qui avec son installation ARIEL, sera la deuxième à utiliser la photofission, à une échelle plus importante qu'ALTO (100kW sur convertisseur, $\sim 10^{13}$ fissions /s).

En 2014, du fait du manque de ressources et d'une inquiétude sur l'avancement de la phase 1 de SPIRAL 2, l'IN2P3 et le CEA décident de suspendre la phase 2. La communauté française voit la clef de voûte de son projet fédérateur, garant de la cohérence des installations nationales avec ses activités de recherche, lui échapper. Aujourd'hui, la phase 1 est finalement en bonne voie. Le LINAC est sur le point de démarrer, S3 est en cours d'assemblage pour une mise en service prévue en 2022, et DESIR, grâce à un plan de développement solide, prévoit de démarrer son programme

de physique en 2024. Pour autant, la phase 1, qui ne couvre que des programmes de physique très spécialisés, ne peut nous contenter tous. La physique in-beam, et DESIR se retrouvent privés des fragments de fission, qui étaient au centre de leur programme. Le rôle d'ALTO comme installation pilote pour la phase 2 se retrouve fragilisé. Entre 2015 et 2016, dans le cadre de l'initiative GANIL 2025, notre communauté s'interroge une première fois sur une feuille de route pour ses installations au-delà de la phase 1 de SPIRAL 2. Aujourd'hui, les perspectives nationales de l'IN2P3 encouragent une consultation très ouverte du personnel scientifique des laboratoires de l'IN2P3. Elles offrent un cadre particulièrement propice à un réexamen plus global de l'avenir de nos installations de faisceaux radioactifs, des potentiels de la phase 2 et des scénarios alternatifs. Même si les discussions sont loin d'être terminées, notre communauté ici représentée s'accorde sur un scénario au-delà de la phase 1 qui comporterait :

- une phase de remise en cohérence de nos installations nationales ALTO et GANIL – SPIRAL 2,
- et une phase plus ambitieuse qui se déclinerait en 3 options phares.

Avenir de nos installations

Le scénario suivant est proposé :

1 - Phase de consolidation (2020 - 2030)

Objectif : restaurer la cohérence de nos installations avec les activités de la communauté

- **Création d'un bâtiment de production à GANIL-SPIRAL2** avec plusieurs caves versatiles acceptant
 - o Les **faisceaux du linac** pour la production de faisceaux radioactifs par fusion, transfert et fission du faisceau incident en cible ISOL+catcher/cellule gazeuse.
 - o Les **électrons d'un driver compact** placé auprès des caves, pour la production de faisceaux par **photofission dans une cible adaptée d'ALTO** (de 10^{12} à 10^{13} fissions/s).
 - o L'utilisation de ces faisceaux pour les applications.
- Gain de cohérence:
 - o ALTO comme installation pilote, de test des procédés pour la partie photofission
 - o Programme de physique à DESIR qui bénéficiera d'un driver dédié et de faisceaux riches en neutrons
 - o **Faisceaux du LINAC plus disponibles pour S3 que dans le cadre d'une phase 2 (N=Z, superlourds, physique atomique à S3 LEB/ SIRIUS/FISIC)**
 - o Production ISOL de faisceaux intense ouvre la voie à la suite : e- scattering ; faisceaux ISOL réaccélérés (voir les 3 options décrites ci-dessous)
 - **Projet DESTIN à Orsay comme installation pilote potentielle (2020 - 2030)**
- **La phase 2 telle que suspendue en 2014 est jugée obsolète:**
 - o Théoriquement $3 \cdot 10^{13}$ fissions /s dans une cible très volumineuse (2.3kg UCx haute densité) défavorisant les temps de vie courts,
 - o Dimensionnement de l'installation réalisée à 10^{14} fissions/s très contraignant
 - o **Peu/pas de gain par rapport à SPES, HIE-ISOLDE, ARIEL, et le scénario de photofission proposée ici, pour des contraintes de sûreté maximales.**

2 - Phase plus ambitieuse (2025 - 2035)

Objectif : se démarquer des installations concurrentes.

3 options alternatives ou complémentaires sont à l'étude.

- o **Option e- scattering comme nouvelle sonde du noyau**

- Nécessite l'installation d'un ERL (Energy Recovery Linac) auprès de DESIR
- Programme riche et évolutif suivant la luminosité atteignable
 - Voir contribution dédiée - F. Flavigny et D. Verney
- Nécessite une étude de faisabilité détaillée suivant les cas de physiques
- **Option ré-accélération des faisceaux de qqs 100 keV (astro) à 100 AMeV**
 - Programme couvrant un riche panel de physique
 - Au-delà de 10AMeV pas de concurrent ISOL : intérêt pour les réactions de transfert, résonances géantes, pygmées, équation de la matière nucléaire, réactions d'échange de charge...
 - Nécessite une comparaison avec les installations en vol (RIKEN, FAIR, FRIB) vs ISOL (10^{13} fissions/s)
- **Option stockage d'ions ré-accélérés à ~10AMeV**
 - Permet en particulier la physique in-beam / réaction de transfert dans des cibles très minces, dans des conditions idéales
 - Programme de physique bien étudié auprès de ISOLDE
 - Comprend un programme riche pour la physique atomique
 - ISOLDE n'a pas abandonné l'idée d'un anneau de stockage, la pertinence de cette option dépend donc de l'avenir que lui réserve ISOLDE

Les différentes phases et options de ce scénario sont actuellement étudiées par des groupes de travail dédiés. Après un bref rappel de la feuille de route de la phase 1 de SPIRAL 2, nous résumons dans la suite de ce document l'état d'avancement de la réflexion des groupes de travail. Les groupes de travail « Photofission à la ALTO » et « Autres faisceaux que la fission » ont été formés pour étudier les motivations scientifiques de la création du bâtiment de production à GANIL-SPIRAL 2. En plus des options du scénario détaillé ci-dessus, deux groupes de travail ont étudié :

- Une option de fragmentation en vol. Cette option n'ayant pas été retenue elle n'apparaît pas dans le scénario proposé ci-dessus, mais son étude est explicitée plus bas.
- L'opportunité que constitue l'utilisation du faisceau du LINAC pour les applications médicales. Cette option, qui pourrait être réalisée en parallèle du reste, pourrait également trouver sa place dans le bâtiment de production proposé auprès de GANIL-SPIRAL2.

Phase 1 de SPIRAL 2 (H. Savajols et B. Blank)

La phase 1 de SPIRAL 2 inclut, outre le LINAC, le spectromètre-séparateur S3 et le hall d'expérience de basse énergie DESIR (phase 1+). Le programme scientifique de S3 a plusieurs volets, notamment la production et l'étude des noyaux $N=Z$ et des noyaux très lourds et super-lourds. Ces noyaux peuvent être étudiés au plan focal de S3 dans un dispositif 'state-of-the-art' (principalement des mesures de décroissance radioactives) ou être injectés dans la branche basse énergie LEB où des expériences de spectroscopie laser, de mesures de masse ou de décroissance radioactives sont envisagées. Les futures expériences avec S3 ont deux avantages principaux par rapport aux installations existantes : la capacité d'accepter des intensités de faisceaux incidents inégalées, notamment dans la perspective de l'injecteur $A/q=7$, et, grâce à la technique de « gas catcher », d'avoir accès à des éléments réfractaires, inaccessibles dans des installations ISOL de référence comme ISOLDE/CERN ou ISAC/TRIUMF. Ces deux atouts permettront

d'envisager des expériences dans des régions de la carte de nucléides jusqu'ici inaccessibles.

Le hall DESIR pourra accepter des faisceaux de tous les sites de production de faisceaux ISOL du GANIL : de SPIRAL 1 avec ses faisceaux légers riches et déficients en neutrons, de S3 avec des faisceaux riches en protons sur toute la gamme de masse et notamment des noyaux d'éléments réfractaires, d'un futur bâtiment de production pour des fragments de fission, des noyaux riches en protons produits par fusion-évaporation ou encore des noyaux moyennement riches en neutrons produits par des réactions de transfert. DESIR possédera des équipements d'excellence pour la spectroscopie laser, les mesures de masse et la décroissance nucléaire. Outre le fait que la quasi-totalité des noyaux de la carte des isotopes sera disponible dans DESIR, l'installation bénéficiera de faisceaux ultra-purs au moyen d'une série unique de séparateurs : le HRS (high-resolution separator), un MR-ToF-MS ainsi que PIPERADE, un séparateur de très haute résolution basé sur des pièges de Penning, qui feront la marque de fabrique de l'installation. PIPERADE permettra aussi le stockage d'ions exotiques pour les accumuler.

Photofission à la ALTO (D. Verney, P. Delahaye et al.)

La production de faisceaux de fragments de fission utilisant un driver dédié pour desservir DESIR et le GANIL présente plusieurs atouts :

- Le programme de physique actuel de l'installation nationale serait considérablement enrichi, permettant de réaliser une grande partie du programme scientifique de la phase 2 de SPIRAL 2. Dimensionnée judicieusement, cette option pourrait constituer une alternative avantageuse, sur le modèle d'ARIEL ou SPES. En France, nous pourrions capitaliser sur la dizaine d'années de R&D pour la mise en œuvre de la photofission en mode ISOL menée auprès d'ALTO.

- Un driver indépendant de type linac d'électrons ou cyclotron de protons ou particules légères, robuste et simple d'opération, permettrait une opération en parallèle de S3, DESIR et du GANIL, à moyen comme à long termes. A noter que des solutions commerciales économiquement attractives existent pour différents drivers, d'électrons ou de particules légères (par exemple cyclotrons de type Rodhotron® ou Cyclone® IBA). A noter également qu'avec un faisceau de moins de 40 MeV/nucléon, la classification INB ne s'appliquant plus, les exigences concernant la sûreté deviennent moins contraignantes.

Même si cette option se limiterait à des intensités comparables à celles d'autres installations ambitieuses, elle permettrait de tirer le meilleur parti de l'instrumentation actuellement développée à DESIR, unique en son genre, et de conserver l'avantage des spectromètres du GANIL. A plus long terme elle serait particulièrement adaptée à l'étude des distributions de charge par diffusion électronique (voir option détaillée ci-dessous). Cette solution nécessite outre le driver une ou idéalement plusieurs caves de production. Elle devra être étudiée dans les détails dans le but d'une optimisation en performances, coût, et de rapidité de mise en œuvre par rapport à la phase 2.

Autres faisceaux que la fission (M. MacCormick, F. De Oliveira, M. Lebois et al.)

➤ En lien avec le GT "nucléosynthèse" :

Des processus impliquant des noyaux plutôt légers, **déficient en neutrons** sont identifiés comme ayant un impact significatif dans les études de processus explosifs en astrophysique nucléaire. Les mesures requièrent des faisceaux de fortes intensités, purs et post-accélérés sur cible dans une gamme de 0.1 à 1.5 MeV/u. Ces énergies n'étant pas disponibles, une modification

de CIME, ou l'achat d'un LINAC dédié est nécessaire et réaliste. Faisceaux produits avec SPIRAL1/Réactions de transfert : au moins 10^5 pps sur cible de ^{14}O , ^{17}F , ^{18}F , ^{18}Ne , ^{22}Mg , ^{30}S , ^{56}Ni ,...La production de ^{56}Ni sera intéressante dans la suite des développements d'un ECS avec catcheur solide.

Des faisceaux nécessaires à l'étude du processus-r par mesure indirecte semblent plus appropriés sur SPIRAL2, et reposent sur les réactions de transfert "surrogate" (d,p) de basse énergie ou de transfert (d,p) à plus haute énergie. Des faisceaux intenses sont essentiels, d'au moins 10^5 pps sur cible, de **fragments de fission** accélérés, près de l'énergie de séparation neutron par nucléon ou à 15 MeV/u, suivant la méthode.

- En lien avec le processus de photofission pour la production de faisceaux riches en neutrons :

Les taux de production des photo-FF sur cibles de Th, permettant de mieux s'approcher de ^{78}Ni , sont actuellement inconnus. Des mesures précises sont à réaliser dans le moyen terme (calcul JENDL2011). Pour cela, un nouveau **faisceau d'électrons** est nécessaire, la configuration actuelle à ALTO étant inadaptée. Ceci nécessite la création d'un spectromètre d'étiquetage des **faisceaux de photons** pour les mesures de section efficace de production des FF par photofission, en fonction de l'énergie, qui permettrait d'optimiser les conditions de production. De l'instrumentation pour les mesures et de la R&D pour la fabrication des cibles de Th seraient requises. Le faisceau de photons pourrait avoir un intérêt plus étendu car il permettra de sonder des résonances nucléaires dans les ions radioactifs, ainsi que la photoabsorption et photodésintégration des noyaux exotiques.

Ces demandes de faisceaux sont compatibles avec le projet DESTIN et un driver d'électrons au GANIL.

Option de la fragmentation en vol (A Matta et al.)

La fragmentation en vol de noyaux stables permet la production d'une grande variété de noyaux radioactifs contrairement à la méthode ISOL limitée par les propriétés chimiques et les temps caractéristiques de migration des éléments dans la source de production. Les sections efficaces de fragmentation ont été mesurées et modélisées au cours des dernières décennies et la technique est à présent bien maîtrisée. Le résultat de ces années d'expériences a conduit les installations de seconde génération à augmenter l'énergie des faisceaux incidents pour augmenter la luminosité et l'acceptance des séparateurs, permettant d'atteindre des noyaux toujours plus exotiques. Cette solution a nécessité le développement d'accélérateurs puissants permettant d'accélérer des noyaux lourds, tel que l'Uranium, jusqu'à des énergies de quelques centaines de MeV aujourd'hui à RIKEN, jusqu'à quelques GeV demain, à FAIR. Il est évalué que dans le contexte international, la construction de FAIR et FRIB, ainsi que les upgrades de RIKEN dans les 10 ans à venir, le GANIL ne pourra pas rattraper son retard sur la production de faisceaux de fragmentation en vol. En effet la construction d'une installation, uniquement à niveau avec les installations actuelles de RIKEN, implique la construction d'un cyclotron supraconducteur, l'upgrade de toutes les lignes de transport du GANIL, et la construction d'un séparateur de masse supraconducteur et d'un spectromètre supraconducteur.

La seconde option considérée est d'obtenir des espèces radioactives par fragmentation d'un faisceau radioactif intense issue d'une source ISOL. Pour ce faire nous avons considéré un faisceau de ^{132}Sn produit par une source de photo-fission à 10^{13} fissions par seconde. Une telle source produirait 10^8 pps de ^{132}Sn , soit en considérant 10% d'efficacité pour la post accélération, à 150 AMeV, 10^7 pps sur une cible de fragmentation. Un séparateur de type BigRIPS utilisant une cible de 5mm de Be permettrait alors d'obtenir des faisceaux d'au mieux 10^4 pps, soit trois ordres de

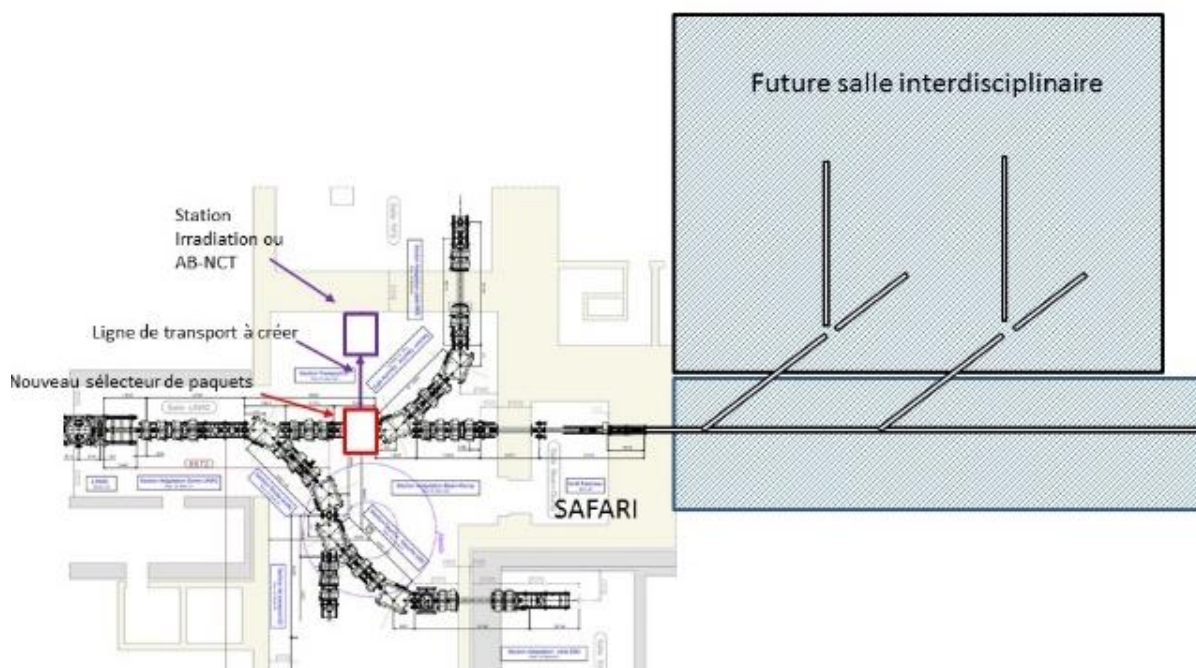


grandeur de moins que la fragmentation directe de l'uranium telle que faite aujourd'hui à RIKEN pour les même noyaux.

Applications médicales (G. De France et al.)

Aujourd'hui, 80% des expériences utilisant la salle NFS ont besoin d'un paquet faisceau sur 100, les 99 restants finissant dans le beam dump SAFARI (voir Figure). L'idée simple de départ est donc de chercher à utiliser ce faisceau perdu. Pour ce faire, il est nécessaire de développer un sélecteur de paquet fonctionnant aux énergies du LINAC. Nous proposons donc une étude de la faisabilité d'un tel dispositif. Si cette faisabilité est établie, nous proposons de le construire et de mettre en place une station d'irradiation pour réaliser de la R&D sur certains radioéléments innovants et en premier lieu les émetteurs alpha. On peut également envisager l'implantation d'un démonstrateur pour l'AB-NCT (Accelerator Based Neutron Capture Therapy). Enfin, nous proposons à moyen terme la création d'une **plateforme interdisciplinaire de recherche** visant à exploiter de façon optimale les faisceaux stables de très haute intensité délivrés par le LINAC de SPIRAL2 (ceci peut être envisagé quel que soit le résultat de l'étude du sélecteur de paquet).

Cette nouvelle plateforme consisterait en un bâtiment dans lequel seraient implantées des lignes de faisceaux permettant de développer des projets de recherches interdisciplinaires. Ce bâtiment accueillerait des stations d'irradiations spécifiques avec par exemple une cible liquide, un convertisseur haute puissance permettant une irradiation sous haut flux de neutrons, de l'imagerie (on envisage pour cela l'utilisation



du prototype du convertisseur développé pour SPIRAL2), ainsi qu'une ligne banalisée modulaire. L'ensemble de ces lignes devra être implanté dans une infrastructure permettant une R&D amont de haut niveau.

Cette nouvelle salle dédiée recherche avec des équipements de haut niveau, capable de recevoir le faisceau de haute intensité, permettrait de décupler l'impact du GANIL au

travers de l'ouverture à de nouvelles thématiques scientifiques, le rôle potentiel des industriels et l'intégration dans un contexte régional porteur.

Option diffusion électron sur noyaux radioactifs (F. Flavigny et D. Verney)

Suite à des décennies d'expérimentation sur les noyaux stables et les nucléons, la diffusion d'électrons s'est imposée comme la sonde la plus précise et la plus sensible à la structure nucléaire et hadronique. L'appliquer à des noyaux exotiques pour lesquels des phénomènes uniques émergent (détails dans la contribution dédiée) est donc naturel mais présente des difficultés évidentes de luminosité jusqu'ici insurmontées. Dans le cadre du développement de nos installations nationales, une des techniques récemment élaborée au Japon pour piéger des ions radioactifs par la circulation du faisceau d'électrons lui-même semble prometteuse et particulièrement adaptée aux faisceaux ISOL déjà produits en France ou dont le développement est proposé dans ce document. Des études préliminaires ont indiqué qu'un ERL (Energy Recovery Linac) pourrait servir de base à un collisionneur électron-noyau basé sur ce concept et permettrait d'atteindre des objectifs de luminosité ambitieux ($10^{29} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ avec 10^6 ions piégés). La combinaison unique entre les faisceaux produits à l'avenir au GANIL et un tel accélérateur d'électrons placerait la communauté française au premier plan mondial et l'ouvrirait à une variété d'applications utilisant le rayonnement synchrotron intense produit par ce type d'accélérateur.

Une telle installation basée sur un ERL présente plusieurs défis techniques bien identifiés et nécessite donc un démonstrateur permettant de développer notamment la source d'électron de haute intensité, la récupération de l'énergie, la maîtrise des instabilités faisceau, le mécanisme de piégeage ainsi que la détection dans cet environnement contraignant. Le projet PERLE (Powerful Energy Recovery Linac Experiment), démonstrateur pour le futur LHeC, réunit l'ensemble des caractéristiques requises pour réaliser ces développements. Sa construction sur le campus d'Orsay serait donc une opportunité unique de synergie entre différentes thématiques de l'In2p3. Une source de photo-fission basée sur le design d'ALTO pourrait par exemple alimenter cet ERL en ions radioactifs de masse intermédiaire afin d'effectuer la R&D nécessaire ainsi qu'un premier programme de physique centré sur les densités de charge de noyaux radioactifs bien produits par ce mécanisme (^{132}Sn notamment). Cette stratégie pour les 10-15 prochaines années poserait les bases du collisionneur électron-noyau de haute luminosité que l'on construirait au GANIL pour bénéficier de toutes ses sources d'ions radioactifs. Pour que cet objectif final soit atteint, une collaboration étroite entre les laboratoires impliqués et le GANIL est essentielle dès le début des développements.

Option ré-accélération de qqs 100 keV à 100 AMeV (M. Lewitowicz, Y. Blumenfeld, D. Beaumel, E. Clément et al.)

Les perspectives de la physique in-beam étant décrites dans une contribution dédiée, nous nous concentrons ici sur deux options techniques dont la pertinence scientifique devra être analysée vis-à-vis des installations concurrentes.

- Accélérateur pour les RIB ré-accélérés à basse énergie (d'environ 100 keV/nucléon à environ 1,5 MeV/nucléon)

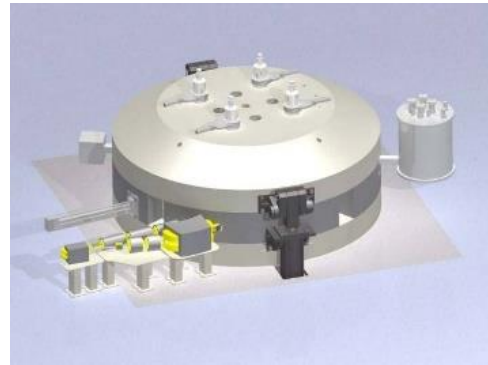
Afin d'étudier les réactions à très basse énergie et en particulier celles importantes pour l'astrophysique, il convient de construire un nouvel accélérateur linéaire pour accélérer le RIB à partir d'environ 100 keV/nucl. à environ 1,5 MeV/nucl. L'accélérateur couplé à un séparateur de recul dédié peut être implémenté dans (ou dans une extension de) la

salle DESIR. Le coût de l'accélérateur était estimé à 2 millions d'euros et son étude et la construction devait durer environ 5 ans (voir détails dans [«GANIL-SPIRAL2 Projet X 2017»](#)).

- Options pour les accélérateurs pour les RIB à haute énergie (de quelques MeV/nucl. à 100-150 MeV/nucl.)

Le cyclotron CIME existant de SPIRAL2 accélère les RIB d'environ 1 à 20 MeV/nucl. L'énergie dépend du rapport A/q des ions et varie par exemple de 1,2 MeV/nucl. à 15,4 MeV/nucl. pour ${}^8\text{He}$ (RIB riche en neutrons), de 1,6 MeV/nucl. à 20 MeV/nucl. pour ${}^{130}\text{O}$ (RIB riche en protons). (Voir <https://www.ganil-spiral2.eu/scientists/ganil-spiral-2-facilities/available-beams/> pour la liste complète des RIB au GANIL). Les énergies maximales de RIB peuvent être augmentées d'environ 30% si un booster de charge plus performant (EBIS, EBIT) est mis en œuvre comme proposé dans RSI 83(2) :02A906.

Le cyclotron compact supraconducteur (SCC) est le post-accélérateur le plus économique et le plus facile à construire pour couvrir la gamme d'énergies jusqu'à 150 MeV/nucl. Par exemple, le SCC avec K1600 permettrait d'accélérer les ions à 400 MeV/nucl. pour $q/A = 0,5$, à 160 MeV/nucl. pour $q/A = 0,3$ et à 36 MeV/n pour $q/A = 0,15$. L'accélérateur nécessitera un booster de charge très performant, de type EBIS, EBIT afin d'accélérer les ions p, He, C, O à 400 MeV/nucl., Kr 160 MeV/nucl., Sn à 100 MeV/nucl., Pb, U 60 MeV/nucl. La conception de base détaillée de ce type d'accélérateur a déjà été réalisée pour le cyclotron C400 ARCHADE (voir illustration) avec les caractéristiques suivantes : diamètre = 6,6 m, hauteur = 5 m, B max 4T, rayon d'extraction 2 m, poids 700 tonnes, injection axiale à 60 keV/nucl. Une conception détaillée complète du cyclotron nécessiterait environ un an, sa construction environ cinq ans et son coût devrait être inférieur à 70 millions d'euros pour la seule machine.



L'implantation du SCC K1600 au GANIL devrait être étudiée et une construction d'une nouvelle salle pourrait être nécessaire pour l'accueillir. Au-delà de 100 MeV/nucl. une modification importante des lignes de faisceau et du spectromètre GANIL existants serait nécessaire (coût à estimer). Des études détaillées de sûreté et de radioprotection seraient également nécessaires.

On peut également envisager une installation au GANIL d'autres cyclotrons supraconducteurs qui pourraient devenir disponibles s'ils n'étaient plus utilisés dans d'autres installations comme NSCL ou KVI.

Une autre option plus flexible et polyvalente mais plus chère pour le post-accélérateur de RIB est un nouveau LINAC supraconducteur comme celui décrit dans le document «GANIL-SPIRAL2 Projet X 2017».

Option anneau de stockage d'ions réaccélérés (S. Grévy, B. Jurado et al.)

Les énergies des faisceaux post accélérés du GANIL, de l'ordre de 10-15 MeV/u, sont idéales pour induire des réactions secondaires, en particulier des réactions de transfert sur des cibles légères, permettant de faire des mesures de précision, par exemple de sections efficaces partielles, liées via un modèle approprié aux facteurs spectroscopiques, ingrédients essentiels à la compréhension de la structure des noyaux exotiques.

Cependant, les intensités des faisceaux secondaires, typiquement de l'ordre de 10^5 - 10^6 pps, obligent à utiliser des cibles relativement épaisses (\sim mg/cm²), parfois composite (ex. CD₂) ou présentant un backing et pouvant de plus présenter des inhomogénéités. En ajoutant la taille du faisceau secondaire sur la cible et l'incertitude lié à la granularité des détecteurs des éjectiles, il en résulte une résolution typique finale sur le spectre d'excitation de l'ordre de 100-150 keV. Une détection des gammas associés permet d'améliorer la résolution (\sim 20 keV), mais ceci au prix d'une efficacité de l'ordre de quelques pourcents (au mieux 10% avec AGATA à 1 MeV).

Nous proposons ici d'utiliser un anneau de stockage afin d'étudier des réactions de transfert par des expériences de précision. L'idée consiste à injecter les faisceaux post-accélérés du GANIL (Spiral1, S3, phase2 ?) dans un anneau de stockage, les « refroidir » avec un « electron cooler » pour obtenir des émittances de faisceaux stables type tandem (\sim 0,05 mm.mrad) et d'utiliser ces faisceaux pour induire des réactions de transfert sur une cible gazeuse de type « gas-jet » extrêmement fine, la très faible épaisseur de la cible étant compensée par les passages multiples du même faisceau dans la cible (luminosité identique pour une cible de 1mg/cm² de CD₂ dans une expérience 'single pass' et une cible gazeuse contenant 10^{14} atomes/cm² dans un anneau de fréquence 10^6). L'« electron cooler » permet aussi de compenser la perte d'énergie ainsi que l'élargissement en énergie et angulaire du faisceau dans la cible. Ainsi, lors de chaque passage à travers de la cible le faisceau conserve la même énergie et la même qualité. La combinaison de la grande qualité de faisceau et d'une cible ultra-mince permet alors une spectroscopie particules avec une très grande précision, limitée en fait par la seule résolution des détecteurs eux-mêmes (de l'ordre de 20 keV à 1 MeV). De plus, la cible ultra mince permet de détecter des éjectiles émis avec des énergies très faibles qui seraient arrêtés dans une cible plus épaisse; il n'y a pas de fenêtre à la cible et donc pas de réactions parasites. Enfin, l'anneau permet de sélectionner un seul faisceau (pas de contaminants), éventuellement dans un état isomérique si celui-ci a une durée de vie plus longue que l'état fondamental. La principale limitation vient du temps de « cooling » du faisceau par les électrons, entre 200 msec pour les masses légères et 1 sec pour les plus lourds. D'un point de vue expérimental, le stockage des ions demande de réduire autant que possible les réactions atomiques avec le gaz résiduel de l'anneau et ainsi le défi principal est de développer des systèmes de détection compatibles avec l'ultravide. Un autre aspect intéressant est l'utilisation des dipôles de l'anneau pour séparer les résidus lourds de la réaction (entre eux et par rapport au faisceau) et les détecter.

Il est aussi important de noter qu'il existe beaucoup d'autres applications intéressantes des anneaux de stockages, pour la physique nucléaire, l'astrophysique ou encore dans le domaine de la physique atomique (voir références ci-dessous).

P.A. Butler et al., NIMB 376 (2016) 270.

M. Grieser et al., EPJ Special Topics 207 (2012) 1.

B. Jurado et al., EPJ Web of Conferences **146** (2017) 11006.