

Processus de rattachement : Management (PS01)

DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL/SPIRAL2

Ind.	Date	Historique des modifications
A	19/12/2012	Émission initiale

Rédacteur	Emetteur/Approbateur	
Adjoint Direction à la Coordination scientifique SPIRAL2 H. SAVAJOLS	Directeur Adjoint	Directeur
Directeur Adjoint M. LEWITOWICZ	M. LEWITOWICZ	F. STALEY

Sommaire

Sommaire	2
1. GANIL existant	3
1.1 GANIL en chiffres.....	4
1.2 Accélérateurs et aires expérimentales	5
1.3 A la pointe de la recherche sur les noyaux exotiques.....	6
1.4 Un outil efficace pour perturber les électrons	6
1.5 Rayonnement au niveau national et international	7
1.6 Une dynamique scientifique pour la région Basse-Normandie.....	7
1.7 Un outil de développement économique	8
1.8 Valorisation	8
2. Objectif de GANIL/SPIRAL2.....	8
2.1 Le Noyau : un Système quantique complexe de particules en interaction forte	9
2.2 Le noyau comme Laboratoire.....	10
2.3 Recherches pluridisciplinaires.....	11
2.4 Recherches appliquées	11
Energie	11
Applications médicales	12
3. Situation du projet SPIRAL2 et détecteurs associés	12
3.1 Stratégie de construction et jalons majeurs du projet SPIRAL2	13
3.2 Avancées technologiques	14
3.3 Pilotage de la construction de SPIRAL2	15
3.4 Planning.....	15
3.5 Partenariat SPIRAL2	16
3.6 Budget	16
4. Cohérence de l'ensemble GANIL-SPIRAL2	17
4.1 La plateforme technique.....	18
4.2 Nature des faisceaux disponibles	19
5. GANIL/SPIRAL2 dans l'environnement international.....	21
5.1 Environnement scientifique et positionnement	21
5.2 Originalité et caractère novateur des faisceaux disponibles auprès de SPIRAL2.....	22
Faisceaux de neutrons avec NFS.....	22
Faisceaux d'ions stables	23
Faisceaux radioactifs	24
5.3 Importance stratégique pour la France Perspectives	34

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 3/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

1. GANIL existant

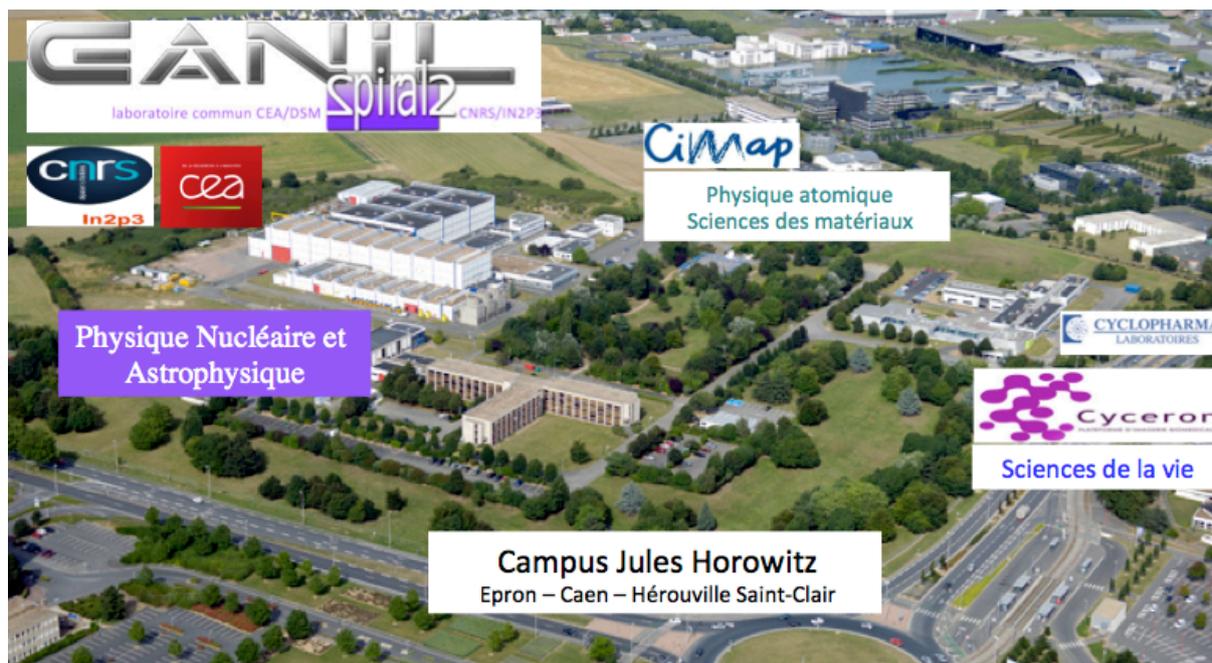
Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) a été créé par deux organismes de recherche associés, à parts égales, pour sa construction et son fonctionnement : le CEA/DSM et le CNRS/IN2P3. Sa forme juridique est celle d'un Groupement d'Intérêt Economique (GIE).

Les collectivités locales (région, agglomération, ville de Caen) et notamment le Conseil **Régional de Basse-Normandie** ont soutenu le projet de début en apportant une contribution appréciable au financement de la réalisation. La décision de construction a été prise en août 1975 et la première expérience réalisée en janvier 1983.

Depuis l'origine, le GANIL participe activement à des **projets européens** qui l'amènent à collaborer avec nombre de laboratoires de l'Union Européenne et au-delà.

Le **GANIL** est l'un des **cinq grands laboratoires au monde** pour la **recherche avec des faisceaux d'ions (GANIL - France, GSI – Allemagne, RIBF/RIKEN – Japon, MSU/NSCL – USA, FLNR/JINR - Dubna)**. Demain, GANIL, avec SPIRAL2, prendra une longueur d'avance dans cette compétition internationale.

Les domaines d'expérimentation s'étalent de la radiothérapie à la physique de l'atome et de son noyau, de la matière condensée à l'astrophysique. En **physique nucléaire**, le GANIL a permis de **nombreuses découvertes** sur la structure du noyau de l'atome, sur ses propriétés thermodynamiques, et sur les noyaux que l'on dit exotiques, car n'existant pas à l'état naturel sur Terre.



Campus Jules Horowitz avec GANIL, CIMAP, CYCERON et CYCLOPHARMA

Les missions principales du GANIL sont de:

- générer des avancées scientifiques qui répondent aux questions les plus importantes en physique nucléaire, en physique atomique et en physique des matériaux.
- maintenir et développer le savoir-faire français en matière d'accélérateurs de particules et des technologies de détecteurs.

Processus de rattachement : Management (PS01)

- transférer les connaissances et commercialiser la recherche du laboratoire pour générer des retombées économiques, sociales et environnementales au profit de tous les Français.
- former par la recherche du personnel de haute compétence
- valoriser et promouvoir la diffusion des connaissances scientifiques
- participer au développement économique local et à la ré industrialisation du pays.

1.1 GANIL en chiffres

9,3 millions € de budget de fonctionnement (2012).

255 postes permanents (juin 2012) (physiciens (27), ingénieurs, techniciens, administratifs) dont 145 agent du CNRS/IN2P3 et 110 du CEA /DSM.

En 2011, **550** scientifiques (dont **40%** d'étrangers en grande majorité européens) issus de plus de **130** laboratoires provenant de **30** pays avec une moyenne de **700** élèves et **200** visiteurs issus du grand public chaque année

77 instituts y menant un programme de physique nucléaire dont 65 laboratoires et universités étrangers.

60 stagiaires, 12 doctorants et 16 post-doctorants sont présents chaque année au GANIL auquel s'ajoute plusieurs dizaines d'étudiants de troisième cycle dans les laboratoires partenaires.

L'installation GANIL/SPIRAL2 pourra répondre aux besoins d'une communauté de plus 1000 utilisateurs ainsi que l'atteste le succès à l'appel des lettres d'intention de SPIRAL2. La communauté des utilisateurs du GANIL compte aujourd'hui environ 700 personnes.

A AJOUTER

- Il a organisé près de 25 conférences internationales en un peu plus de 30 ans et près de 60 ateliers nationaux et internationaux
- Ses chercheurs se sont vus décerner 27 prix scientifiques dont 4 prix "Cristal du CNRS" et 2 médailles d'argent du CNRS
- La production scientifique du GANIL est de plus de 3300 publications depuis sa création (140 publications en 2012)

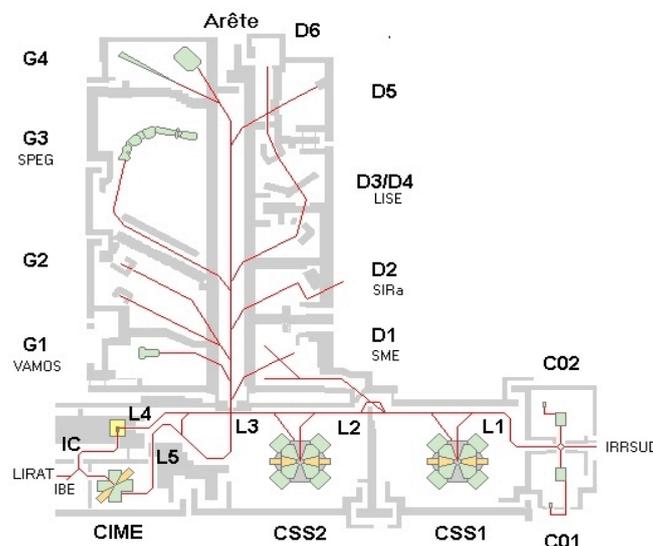


Schéma des accélérateurs et des aires expérimentales du GANIL/SPIRAL1 actuel. Le Hall D qui n'est pas directement connecté aux accélérateurs, n'est pas représenté sur ce diagramme.

1.2 Accélérateurs et aires expérimentales

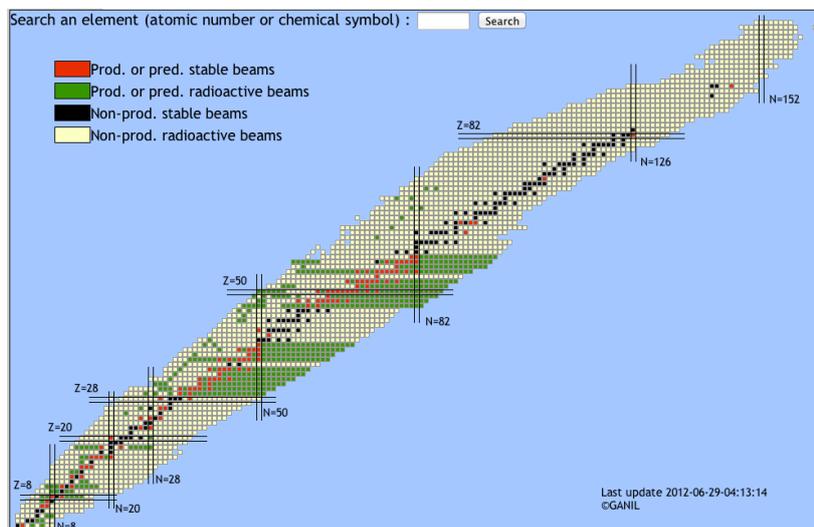
Le GANIL comprend aujourd'hui un ensemble de cinq cyclotrons (C01, C02, CSS1, CSS2 et CIME) avec plusieurs sources d'ions de type ECR et les lignes des faisceaux associés qui permettent d'accélérer les particules et de les envoyer dans 12 salles d'expérience (G1-4, D1-5, IRRSUD, LIRAT, Hall D). GANIL peut actuellement fournir jusqu'à 4 faisceaux simultanément pour 4 expériences différentes (exemple : SPIRAL1, SME, IRRSUD et le Hall D). En fonctionnement nominal (35 semaines par an) GANIL fournit 10000 heures de faisceau par an dont 4000 heures à haute énergie après accélération par le cyclotron CSS2.

GANIL accélère les ions stables entre ^{12}C et ^{238}U et une large palette de faisceaux radioactifs. Les énergies disponibles du faisceau exprimées en kilo électronvolt par nucléons (keV/n) ont:

- 1 keV/n à la sortie des sources d'ions (Hall D)
- environ 1 MeV/n à la sortie des cyclotrons injecteurs C01 ou C02
- entre typiquement quelques MeV/n et environ 15 MeV/n à la sortie des cyclotrons CSS1 ou CIME
- ≤ 95 MeV/n pour ^{12}C et ≤ 24 MeV/n pour ^{238}U à la sortie du cyclotron CSS2.

Les intensités des faisceaux stables délivrés par GANIL sont parmi les plus élevées au monde (ex. 2×10^{13} pps pour ^{12}C à 95 MeV/n correspondant à la puissance de 3,65 kW).

Une liste exhaustive des faisceaux stables et radioactifs (produit avec la méthode ISOL) actuellement disponibles au GANIL et attendu sur SPIRAL2 est disponible sur une charte des noyaux interactive (voir figure ci-dessous) à l'adresse suivante : <http://pro.ganil-spiral2.eu/users-guide/accelerators/chart-beams>

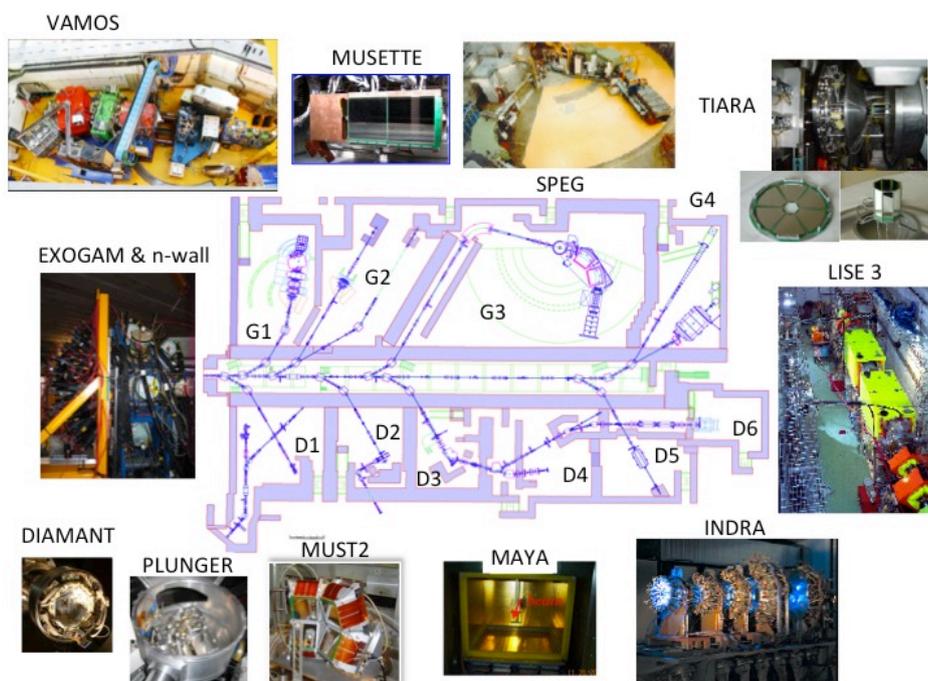


[beams](#)

Faisceaux disponibles sur GANIL/SPIRAL1 et attendus sur SPIRAL2

Il existe plusieurs types de détecteurs au GANIL (voir figure ci-dessous). Ils sont adaptés à la nature des rayonnements étudiés. Le multi détecteur EXOGAM est par exemple dédié à l'observation du rayonnement gamma. Il existe au GANIL d'autres détecteurs utilisés pour la détection de neutrons ou de particules chargées. Par ailleurs le GANIL dispose de plusieurs spectromètres. Ces équipements permettent de séparer les différents ions produits lors de réactions nucléaires.

Processus de rattachement : Management (PS01)



Détecteurs et spectromètres du GANIL/SPIRAL 1

1.3 A la pointe de la recherche sur les noyaux exotiques

Dès l'exploitation des premiers faisceaux d'ions, le GANIL a été un pionnier dans l'étude des noyaux exotiques. La ligne LISE est devenue au début des années 90 l'une des premières installations de synthèse de nouveaux noyaux, imitée depuis dans le monde entier. Puis les spectromètres SISSI-ALPHA et SPEG ont été transformés pour permettre la production et la mesure de la masse de noyaux exotiques. Ce domaine, alors émergent, s'est révélé être une véritable mine d'informations sur les forces nucléaires. Aujourd'hui, le GANIL est l'un des grands laboratoires du monde, avec les faisceaux exotiques produits par SPIRAL1, depuis 2001 (méthode ISOL) et LISE (méthode « en-vol ») et des installations/détecteurs extrêmement performants comme LISE3, SPEG, EXOGAM, INDRA VAMOS, MUST2, MAYA et autres.

SPIRAL1 au GANIL est le premier ensemble de production par la méthode ISOL et d'accélération de noyaux exotiques construit en France. Il délivre aujourd'hui des faisceaux radioactifs (essentiellement les gaz nobles) de masse <90 avec les caractéristiques (énergie, intensité qualité optique) uniques au monde. La combinaison des faisceaux SPIRAL1 avec les systèmes de détection performants disponibles au GANIL ont permis de nombreuses découvertes dans la physique de noyaux loin de la stabilité, les interactions fondamentales et l'astrophysique nucléaire.

1.4 Un outil efficace pour perturber les électrons

Le CIRIL, Centre Interdisciplinaire de Recherche avec les Ions Lourds, est une plateforme qui a été créé pour développer les recherches interdisciplinaires avec les faisceaux d'ions stables du GANIL. Depuis 2008, il fait partie du CIMAP (Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique). Le but premier est de comprendre les effets des collisions des ions sur les électrons des atomes dans divers matériaux. La seconde question concerne les conséquences de ces perturbations à plus ou moins longue distance dans le temps et dans l'espace. Ces recherches concernent une large communauté dont les thématiques couvrent de nombreux champs de recherche de l'atome à l'être vivant, des solides aux cellules, de la matière aux matériaux. Les équipes concernées contribuent à une meilleure compréhension du vieillissement des matériaux du nucléaire civil, de la nano-structuration par faisceaux d'ions et des bases radio-biologiques de l'hadronthérapie.

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 7/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

1.5 Rayonnement au niveau national et international

- Le GANIL est labélisé "Grande installation européenne" depuis 1995
- C'est une des trois principales installations européennes de production de faisceaux d'isotopes rares (avec le GSI de Darmstadt et ISOLDE au CERN)
- C'est un des 5 grands laboratoires mondiaux pour la recherche avec les faisceaux d'ions
- Il a organisé près de 25 conférences internationales en un peu plus de 30 ans et près de 60 ateliers nationaux et internationaux
- Ses chercheurs se sont vus décerner 27 prix scientifiques dont 4 prix "Cristal du CNRS" et 2 médailles d'argent du CNRS
- La production scientifique du GANIL est de plus de 3300 publications depuis sa création (140 publications en 2012)

1.6 Une dynamique scientifique pour la région Basse-Normandie

Un pôle scientifique pluridisciplinaire s'est progressivement constitué autour du GANIL composant le **CAMPUS JULES HOROWITZ**. Après la constitution d'un pôle scientifique pluridisciplinaire «Interaction ion-matière autour du GANIL» et afin d'accentuer les synergies entre les différents domaines de recherche, le GANIL, acteur majeur de la recherche mondiale en physique nucléaire, trouve tout naturellement sa place dans le projet de "Pôle d'excellence nucléaire régional" reposant sur le triptyque Industrie-Formation-Recherche de la Basse- Normandie.

Le CAMPUS JULES HOROWITZ est composé aujourd'hui du :

- **GANIL GIE CEA/DSM et CNRS/IN2P3**
- **CYCERON** Centre d'imagerie médicale et laboratoire de recherches médicales *90 permanents*
- **CIRIL/CIMAP** Laboratoire de recherches interdisciplinaires *77 permanents et 19 non permanents*
- **CYCLOPHARMA** – production de traceurs pour les examens médicaux et thérapie *6 permanents*
- **CURBE** – laboratoire de biologie et animalerie

Plus largement GANIL fait partie du **Plateau nord de Caen** :

- Campus Jules Horowitz (GANIL, CIRIL/CIMAP, CYCERON, CYCLOPHARMA, CURBE)
- ENSICAEN - Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen, IUT et UFR de Sciences au sein desquels des agents du GANIL délivrent des enseignements
- Plate forme d'imagerie biomédicale CINAPS

Le GANIL avec son expertise mondiale dans les domaines des accélérateurs, des interactions ions-matière et de la sûreté, participe activement au projet **ARCHADE** (<http://archade.fr>) qui a choisi de s'implanter sur le Campus Jules Horowitz pour s'appuyer sur cette expertise.

Ce projet, fortement soutenu par le Conseil Régionale de Basse-Normandie, a comme objectifs:

- de créer un Centre Européen de Recherche et Développement en Hadronthérapie, dédié à la recherche fondamentale et appliquée.
- Mener un programme de recherche collaboratif destiné à mettre au point et à valider un prototype de cyclotron. Il s'agit d'un d'accélérateur de particules aux caractéristiques spécifiques qui permettra de délivrer des faisceaux de protons et d'ions carbone à usage thérapeutique. De conception originale, il constitue une percée technologique majeure.
- Développer une filière industrielle autour de la fabrication et de l'utilisation de ce modèle d'accélérateur à des fins médicales.

Le début de la construction des infrastructures d'ARCHADE est attendu en 2013.

GANIL est aussi un des partenaires clef du projet France – HADRON financé récemment à l'hauteur de 15 M€ dans le cadre des investissements d'avenir "infrastructures nationales en biologie et santé".

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 8/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

L'objectif du projet est de fédérer et de coordonner la recherche française dans le domaine de l'hadronthérapie, afin d'optimiser les moyens de traitement, notamment via le développement de nouvelles technologies valorisables.

Fondé sur un programme scientifique pluridisciplinaire, ce projet s'appuie sur 4 grandes thématiques :

- comment cibler et évaluer l'intérêt médical de l'hadronthérapie (recherche clinique) ;
- comment améliorer les plans de traitement (modélisation et simulation informatique) ;
- comment mieux comprendre l'effet des traitements (radiobiologie) ;
- comment améliorer la qualité des traitements (instrumentation).

France-HADRON va permettre aux chercheurs de conduire leurs expérimentations. Les crédits d'investissement permettront d'équiper des salles de recherche et les crédits de fonctionnement financeront l'accès aux faisceaux de particules.

Dans le cadre de ce projet le GANIL s'est engagé à fournir plusieurs semaines de faisceau de ^{12}C à 95 MeV/n par an (financé par France-HADRON) pour la recherche sur les diagnostics utilisés en faisceauologie et sur l'interaction d'ions avec la matière vivante, nécessaire à l'hadronthérapie. Grace au financement de ce projet GANIL va par ailleurs équiper une des lignes de faisceau existantes pour conduire le programme de recherche. Il est à noter que le GANIL est la seule installation en France à pouvoir fournir ce type de faisceaux avant la livraison du nouveau cyclotron dans le cadre du projet ARCHADE.

1.7 Un outil de développement économique

Le GANIL a permis la création de 255 emplois directs dont la moitié au niveau chercheur et ingénieur, ainsi que 245 emplois indirects dans un rayon de 30 kms. De plus, en réinjectant chaque année plus de 4M€ au titre de son fonctionnement, le GANIL génère plus de 100 emplois en Région. Le projet SPIRAL2 permettra de créer une vingtaine d'emplois directs supplémentaires.

1.8 Valorisation

GANIL fournit aux industriels des faisceaux d'ions lourds de grande qualité (de 5 à 10 % du temps de faisceau global). Il participe également aux transferts technologiques vers les entreprises et encourage la création d'entreprises technologiques innovantes.

Orienté plus particulièrement vers la recherche en physique nucléaire, le GANIL s'est largement ouvert à d'autres disciplines, de l'astrophysique à la radiobiologie en passant par la physique des matériaux. Le CIMAP, Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique, avec sa plateforme d'accueil des recherches interdisciplinaires au GANIL, le CIRIL, travaille en grande partie avec les faisceaux du GANIL. La recherche appliquée en est une suite logique, orientée vers le monde socio-économique.

L'implantation du GANIL en Basse-Normandie a modifié en profondeur le développement scientifique de la région. Le plateau Nord de Caen en est l'illustration. Des avancées technologiques de pointe, tel le réseau régional haut débit VIKMAN, se sont développées en associant les différents instituts régionaux de recherche. Depuis 1980, le GANIL valorise ses faisceaux auprès des entreprises et initie la création de PME : BIOPORE (1986-1990), GANELEC (1989-1993), Pantechnik (1991 à nos jours), X-ION (1998 à nos jours). Un incubateur d'entreprises « Normandie Incubation » a été créé afin de soutenir l'émergence de nouveaux projets. Depuis le démarrage de son activité en octobre 2000, Normandie Incubation a soutenu 63 projets. GANIL est aussi membre de Nucléopolis, le Pôle Normand des Sciences Nucléaires et de leurs Applications.

2. Objectif de GANIL/SPIRAL2

SPIRAL2 est un projet d'extension majeur des capacités de production de faisceaux très intenses d'ions lourds et de neutrons (Phase 1) et de production de « noyaux exotiques » (isotopes éphémères produits en abondance dans les « chaudrons stellaires », et que Spiral2 Phase 2 produira en laboratoire). **Cette réalisation fera du GANIL dès 2015 l'un des leaders mondiaux en physique**

nucléaire. Élément déterminant de la stratégie européenne pour la recherche en physique nucléaire, **SPIRAL2 a été retenu par l'European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI)** qui définit la stratégie européenne pour la construction des futures infrastructures de recherche, en concordance avec la construction de l'Espace Européen de la Recherche.

L'installation SPIRAL2 fera franchir à la communauté nationale et internationale une étape significative et cruciale dans la compréhension du noyau, mais également en astrophysique pour les modèles de nucléosynthèse stellaire, pour la conception des réacteurs de nouvelle génération ou encore pour la synthèse de nouveaux isotopes pour la médecine nucléaire. En outre, une source de neutrons rapides de très grande intensité, conçue dans le cadre de SPIRAL2, ouvrira de nouveaux domaines de recherche en science des matériaux. Ainsi, outre leur impact scientifique, les recherches effectuées auprès de SPIRAL2 auront de nombreuses retombées susceptibles de satisfaire les attentes sociétales. Enfin, grâce au dynamisme impulsé par SPIRAL2, de nombreux étudiants pourront être attirés et formés à la recherche et aux techniques de la physique nucléaire et de ses applications, renforçant ainsi la synergie entre les Universités et les Instituts de recherche.

Nuclear Science and Applications at GANIL/SPIRAL2



Nuclear Structure

*Radioactive ion beams
High intense stable ion beams
Neutrons for Science*

Fundamental Interactions

Accelerator Science & Technology

Nuclear Astrophysics

Applications

Les paragraphes suivant présentent de façon plus détaillée les objectifs scientifiques de cette nouvelle installation unique de recherche.

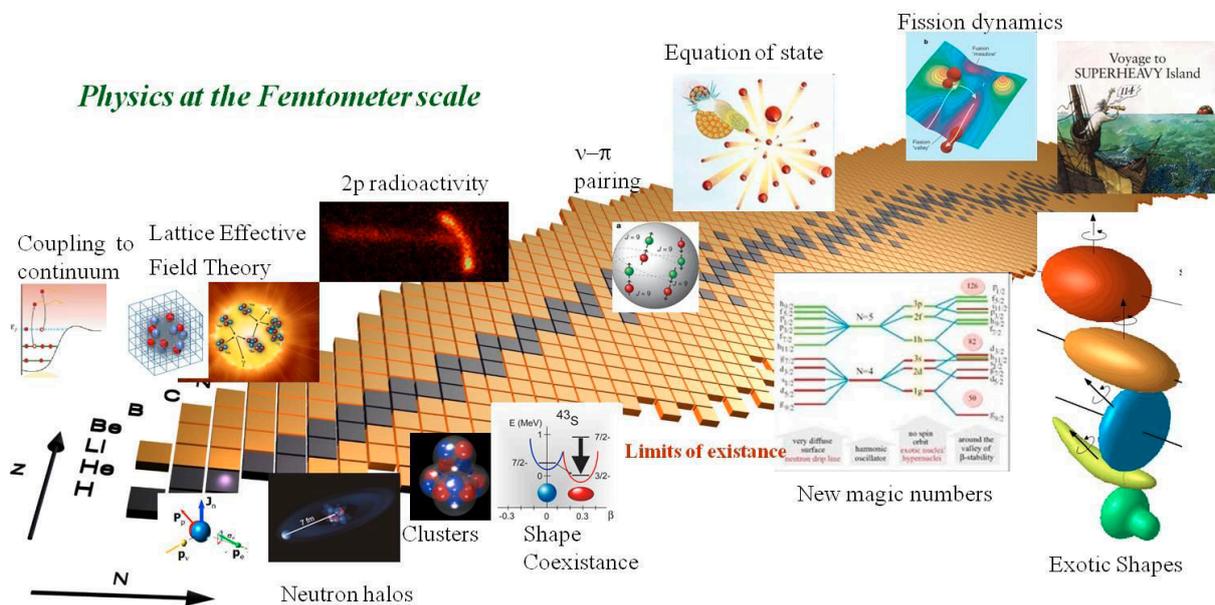
2.1 Le Noyau : un Système quantique complexe de particules en interaction forte

Le noyau atomique, système fortement corrélé à l'échelle femtométrique, est un des objets les plus fascinants de la nature. Il est gouverné par trois des quatre forces fondamentales : nucléaire forte, nucléaire faible et électromagnétique, auquel on ajoute la gravitation dans les étoiles à neutrons constituées de matière nucléaire. Chacune de ces forces jouent un rôle décisif dans la stabilité des noyaux, les réactions nucléaires, l'évolution des étoiles, etc ... Il constitue le dernier système organisé de la matière dans la descente vers l'infiniment petit. **Comprendre ces propriétés c'est remonter aux origines de l'organisation de la matière jusqu'à l'émergence de l'Univers.** Les physiciens nucléaires cherchent à bâtir une vision unifiée de cet objet dans toutes ses conditions d'existence, d'excitations et d'interactions mutuelles.

Avec SPIRAL2, l'étude des noyaux exotiques, présentant un surplus ou un déficit en nombre de neutrons, va permettre d'aborder des thèmes qui constituent de réels défis en physique nucléaire et bien au-delà.

Cette nouvelle installation va en effet permettre de sélectionner des noyaux spécifiques parmi les milliers de nucléides produits et d'ainsi **isoler et amplifier les effets des forces agissant au cœur du noyau, à travers la manifestation de corrélations, de modes d'excitation et de symétries fondamentales.** Les thèmes de recherches majeurs qui seront développés dans les années à venir tenteront de répondre à des questions essentielles à la compréhension du monde dans lequel nous vivons ; ainsi :

- Comment évolue la structure en couches des noyaux, les nombres magiques de nucléons, quelle est la localisation des limites d'existence en nombres de neutrons et protons (drip-lines) et en masse (noyaux super-lourds) des noyaux exotiques ?
- Comment unifier les approches de structure et de mécanismes de réaction dans la description et l'étude des états faiblement liés, non liés et clustérisés du noyau atomique ?
- Pouvons-nous élaborer une équation d'état de la matière nucléaire, capable en particulier de décrire l'influence du rapport des nombres de protons et de neutrons dans le noyau ?
- Comment parvenir à une description microscopique des mécanismes de réaction entre noyaux tels que le processus de fusion, de fission et les collisions nucléaires ?



Le paysage nucléaire: nouvelles découvertes aux limites de l'existence.

Les recherches qui seront menées pour répondre à ces questions dans le cadre de SPIRAL2 sont également essentielles pour comprendre où et comment sont formés dans l'univers les éléments chimiques allant du fer à l'uranium. Enfin, des mesures très précises de la décroissance radioactive et de la masse de certains noyaux permettront de sonder avec une très grande sensibilité le Modèle Standard de la physique des particules, de manière indépendante et complémentaire de la recherche effectuée en physique des hautes énergies.

2.2 Le noyau comme Laboratoire

SPIRAL2 sera également un laboratoire pour étudier les propriétés des noyaux indispensables à d'autres domaines comme par exemple l'astrophysique.

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 11/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

Tous les noyaux de l'univers, mis à part les plus légers, ont été formés dans les étoiles. Le « processus r » consistant en la capture rapide de neutrons et se traduisant par la création de noyaux riches très en neutrons lors de l'explosion d'étoiles, est à lui seul responsable de la synthèse de la moitié des noyaux lourds au-delà du fer. Les données sur les noyaux impliqués (énergie de liaison, mode de désintégration, section efficace, ...) dans ce processus ne sont accessibles que par la production de faisceaux radioactifs. Elles influenceront directement notre **compréhension de la production des éléments dans l'univers**.

Aujourd'hui les calculs de nucléosynthèse font l'hypothèse de structures nucléaires extrapolées à partir de celles des noyaux stables or nous avons montré récemment que celle-ci peut être largement modifiée par la présence d'un grand excès de neutrons. SPIRAL2 permettra d'étudier l'influence de la richesse des noyaux en neutrons sur leurs propriétés.

2.3 Recherches pluridisciplinaires

L'utilisation actuelle des faisceaux du GANIL par d'autres disciplines que la physique nucléaire sera très sensiblement augmentée avec l'arrivée de SPIRAL2 avec de nouveaux programmes qui verront le jour.

Par exemple, la capacité de l'accélérateur linéaire de SPIRAL2 à produire des faisceaux d'ions lourds stables de **très haute intensité**, jusqu'à cent fois plus grande que celle des faisceaux délivrés aujourd'hui, permet d'envisager la mise en oeuvre de dispositifs de **faisceaux croisés**. Une telle installation offre une **luminosité suffisante** pour aborder deux aspects nouveaux de l'étude du dépôt d'énergie des ions lourds rapides dans la matière : **les collisions ion-atome**, d'une part, correspondant aux mécanismes d'endommagement des **matériaux**, et **les collisions ion-ion**, d'autre part, liées aux mécanismes de transfert d'énergie des ions dans les **plasmas denses**. Seule la **réalisation d'expériences de collisions ion-ion peut véritablement permettre par une comparaison directe de tester la validité des modèles théoriques existants**.

Parallèlement, des études portant sur l'interaction des ions lourds rapides avec la matière ionisée (plasmas denses en particulier) se sont développées, en particulier au Tandem d'Orsay et à GSI à Darmstadt. Le développement rapide de ce domaine de recherche est dû, entre autres, à ses implications dans le domaine de la **fusion par confinement inertiel**. Là aussi, **des mesures directes et quantitatives ne peuvent se faire qu'en étudiant directement les processus de collisions ion-ion**.

2.4 Recherches appliquées

Energie

Aux nombreuses possibilités actuelles d'irradiation de matériaux par des ions de nature et d'énergie très diverses disponibles actuellement au GANIL s'ajouteront, avec SPIRAL2 la possibilité de disposer d'une **source unique de neutrons rapides**.

Le faisceau de deutons de 40 MeV de très grande intensité que délivrera SPIRAL2 va permettre de produire des flux de neutrons de haute intensité (jusqu'à 10^{15} n/s dans le bâtiment de production de SPIRAL2 et 10^{13} n/s dans la salle NFS) et d'énergie élevée (0.1 MeV à 40 MeV). Les mesures de sections efficaces de capture neutronique dans une large gamme d'énergie ainsi que les tests de matériaux sous irradiation avec des flux intenses de neutrons sont d'un intérêt majeur pour de nombreux domaines comme la conception et le fonctionnement des réacteurs électronucléaires, la gestion des déchets nucléaires, la production d'énergie par fusion (ITER), la conception de sources de neutrons intenses (projets SNS, ESS,...), la production de faisceaux radioactifs (projets EURISOL, RIA,...) ainsi que pour le spatial.

En complément de ce programme de recherche, l'installation de basse énergie DESIR auprès de SPIRAL2 peut être mise à profit pour étudier le vieillissement des matériaux susceptibles d'être utilisés pour le stockage des déchets (mesures d'autodiffusion de traceurs radioactifs dans les matériaux) et pour caractériser en détail les propriétés de décroissance des résidus de fission produits dans le cœur des centrales nucléaires.

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 12/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

Applications médicales

La recherche de nouveaux radioéléments utiles pour la médecine nucléaire (les traitements anticancéreux utilisant des radioéléments ou des traceurs radioactifs) peuvent être optimisés au moyens d'isotopes radioactifs présentant les meilleures propriétés chimiques, biologiques (transport et fixation dans le corps humain) et radioactives (durée de vie, énergie émise dans la désintégration). Les équipements disponibles auprès de l'installation DESIR notamment, peuvent être mis à profit pour préparer des échantillons ultra-purs de ces nouveaux isotopes d'intérêt médical, dont les conditions de production auprès de SPIRAL2 et de NFS doivent être étudiées (ex : 99Mo).

3. Situation du projet SPIRAL2 et détecteurs associés

L'investissement de la communauté française et internationale dans ses infrastructures scientifiques de recherche en physique nucléaire a été une constante ces dernières décennies. L'amélioration des performances des installations de première génération délivrant des faisceaux radioactifs et stables, en constante synergie avec les développements théoriques, ont permis à cette communauté de découvrir et de comprendre de nouvelles facettes des systèmes nucléaires allant des nouvelles formes de radioactivités aux propriétés et comportements exotiques de la matière à l'échelle du femtomètre, telles que les transitions de phases, les effets de couches, les déformations extrêmes, la fusion sous-coulombienne etc. **Le projet SPIRAL2 et les détecteurs qui lui seront associés vont permettre à cette communauté de se maintenir au plus haut niveau, dans les domaines dans lesquels elle a un rôle leader au niveau mondial.** Cette installation, unique en son genre dans le monde, va fournir les **faisceaux radioactifs les plus intenses en Europe**. Par ailleurs, son accélérateur linéaire, le LINAC, permettra également de disposer de **faisceaux stables d'ions lourds ultra-intenses**. Pour mener à bien le programme expérimental ouvert par cette opportunité unique, notre communauté s'est engagée au cours de la décennie écoulée et dans le cadre de vastes collaborations internationales dans la construction d'un spectromètre (S3), et de détecteurs de particules (GASPARD, ACTAR-TPC, FAZIA, S³) et de rayonnement gamma (EXOGAM2, AGATA et PARIS) beaucoup plus performants que ceux existants à ce jour..

L'importance de SPIRAL2 a été reconnue par le jury international mis en place pour sélectionner la prochaine génération d'Equipements d'Excellence (EQUIPEX), toutes disciplines confondues. Deux des plus importants équipements de SPIRAL2, **S³** (Super Séparateur Spectromètre) et **DESIR** (Désintégration, Excitation et Stockage des Ions Radioactifs), ont ainsi été retenus dans le cadre du Programme pour les Investissements d'Avenir (PIA) et financés pour un montant total de 17M€, au terme d'un processus extrêmement sélectif.

Processus de rattachement : Management (PS01)

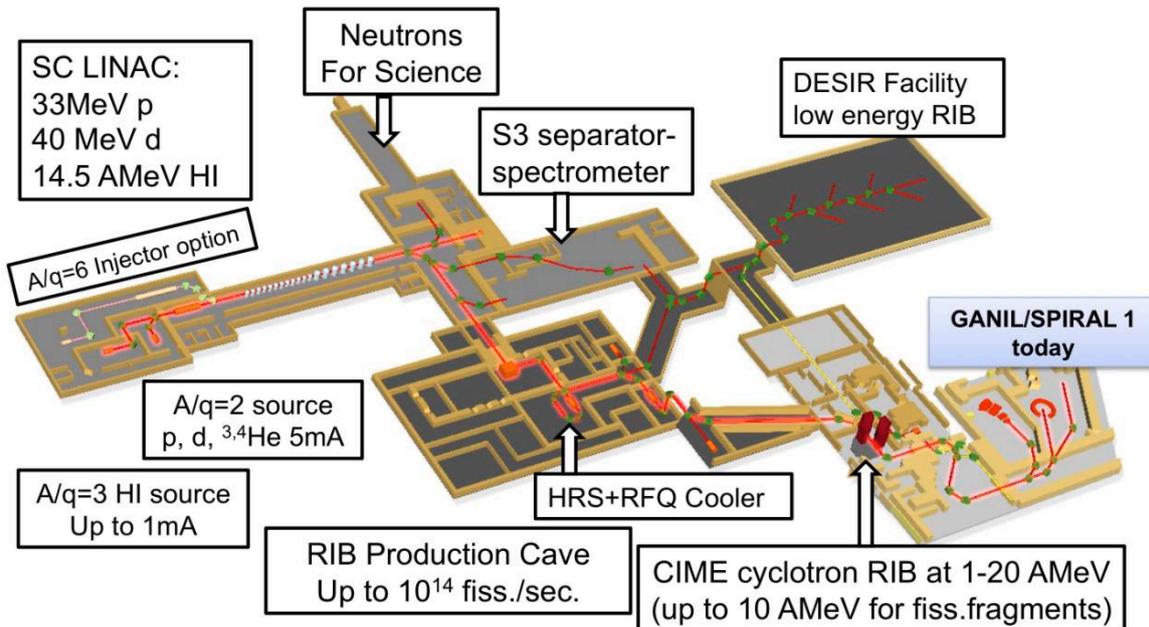


Schéma de l'installation GANIL/SPIRAL2

3.1 Stratégie de construction et jalons majeurs du projet SPIRAL2

Le livre blanc du projet SPIRAL2, publié à la mi-2004, définissait les objectifs scientifiques, les solutions technologiques envisagées et donnait une évaluation budgétaire basée sur un avant projet détaillé de la partie accélérateur-salle d'expérience et d'un avant projet sommaire pour la partie production de faisceaux radioactifs.

A partir de la mi-2005, une équipe projet a été mise en place pour réaliser le projet et une réévaluation complète a été lancée sur l'ensemble du projet.

Dès fin 2005, compte tenu des incertitudes sur la définition du bâtiment de production de faisceaux radioactifs, et donc de l'augmentation potentielle du coût, **un groupe de travail** a été mise en place ayant pour mission de définir et proposer une solution ayant le « **rappport qualité coût** » optimal.

En Octobre 2006 une définition améliorée du projet SPIRAL2 a ainsi été proposée, fondée sur l'utilisation optimale et complémentaire des équipements existants auprès du GANIL et sur la mise à la disposition des chercheurs dès leurs réalisations de l'accélérateur et des nouvelles salles d'expérience de SPIRAL2 (Aires Expérimentales LINAC avec S³ et NFS). La réflexion menée a conduit à une stratégie de construction de l'installation SPIRAL2 **en deux phases**:

1. **Phase 1** : construction de l'accélérateur de protons, de deutons et d'ions lourds et des salles d'expériences spécifiques associées (« AEL » avec S³ et NFS). Le Super-Spectromètre-Séparateur S³ a été sélectionné comme EQUIPEX en 2011 et a été doté d'un budget de 8M€ ce qui a permis de lancer sa construction.
2. **Phase 2** : construction d'une unité de production complémentaire (avec l'accélérateur de la Phase 1) de faisceaux radioactifs qui seront post-accélérés avec le cyclotron CIME de SPIRAL1 avant d'être acheminé vers des salles d'expériences actuelles du GANIL et construction de l'installation **DESIR** qui devrait recevoir les faisceaux radioactifs de basse-énergie issus de SPIRAL1, de S³ et du nouveau bâtiment de production de la Phase 2. Cette dernière plateforme expérimentale a été sélectionnée comme EQUIPEX en 2012 et a été doté d'un budget de 9M€ ce qui va permettre de lancer sa construction.

Cette stratégie de construction en deux phases a permis de :

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 14/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

- Lancer la construction de la Phase 1, les solutions techniques, le planning et le budget étant conforme aux estimations initiales;
- Poursuivre des études de la Phase 2 par l'étude de solutions moins coûteuses pour le bâtiment de production (définition d'un bâtiment plus compact, optimisation des options de sûreté...);
- Lisser la courbe pluriannuelle de financement du projet

Les étapes clés de la mise en œuvre de cette stratégie sont les suivantes :

- Pour la Phase 1 : construction et essais des éléments de l'accélérateur et études détaillées des infrastructures.
- En Septembre 2008, validation par l'ASN de la proposition d'une construction en deux phases de l'installation.
- Pour la Phase 2, simultanément à l'évaluation de l'avant Projet (par un Comité technique international), l'optimisation du bâtiment de production a conduit, fin 2008, à restreindre la construction à une seule cellule de production. Pour mieux maîtriser les coûts industriels, les interfaces entre le bâtiment de production et les lignes de faisceaux ont été définies très précisément.
- Pour la Phase 1, les appels d'offres des différents lots des infrastructures ont tout d'abord, été déclarés infructueux pour optimiser les spécifications techniques et réduire les coûts des travaux. Les secondes offres reçues fin 2010, ont permis de rester dans le budget prévisionnel des bâtiments.

Début 2011, il été décidé de terminer la construction de la phase 1 avec les salles AEL (NFS et S³) et de démarrer toute la construction de la phase 2 à partir de 2015. Ainsi :

- **Pour la Phase 1**, les contrats liés aux bâtiments ont été signés. Les tests des sous ensembles de l'accélérateur s'achèvent dans les différents laboratoires et certains éléments sont en cours de démontage et de transport vers le GANIL. Le début du montage des premiers éléments (section LBE1) a été entamé fin 2012. Les premiers faisceaux à la sortie de du LINAC sont prévus pour septembre 2014.
- **Pour la Phase 2**, les études du bâtiment de production, de la plateforme expérimentale DESIR et des lignes de faisceaux vont se poursuivre et aboutir à des offres industrielles à partir du deuxième trimestre 2014.

3.2 Avancées technologiques

Le projet SPIRAL2 fait appel à une technologie très avancée dans le domaine des accélérateurs linéaires de très haute intensité avec un développement de nouvelles cavités accélératrices supraconductrices performantes et de sources d'ions délivrant des intensités de l'ordre du milliampère. Ces développements placeront les laboratoires français associés au projet au meilleur niveau mondial dans le domaine des accélérateurs de haute intensité et leur permettra de s'investir dans des projets de sources de spallation ou d'ADS, réacteurs hybrides pour la transmutation des déchets nucléaires et la production d'énergie. SPIRAL2 nécessite par ailleurs la maîtrise d'un ensemble convertisseur-cibles de production-source complexe. Les techniques mises en œuvre pour évacuer la puissance (200 kW), confiner la radioactivité produite et intervenir à distance de manière totalement robotisée sont nouvelles et préparent elles aussi ces projets futurs. Les études de sûreté liées au projet SPIRAL2 font enfin l'objet d'un soin tout particulier et préparent les spécialistes du domaine de la qualité, de la sûreté et de l'environnement aux problématiques associées au fonctionnement des installations nucléaires de prochaine génération. Tous ces développements sont indispensables pour les futurs projets d'accélérateurs de faisceaux radioactifs comme EURISOL et contribuent largement à la préparation des accélérateurs haute puissance comme ESS et IFMIF/EVEDA.

Les développements des nouveaux détecteurs autour de GANIL/SPIRAL2 est un moteur d'innovation technologique (nouveau scintillateur, diagnostics faisceaux d'ions, dosimètres, électronique d'acquisition, micro-électronique, etc.) avec des retombées industrielles.

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 15/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

3.3 Pilotage de la construction de SPIRAL2

Le pilotage du projet est décrit dans un texte de gouvernance : conduit par un Chef de Projet et un Responsable Scientifique, le projet est sous l'autorité directe d'un comité de pilotage comprenant les directeurs et les directeurs adjoints de la DSM au CEA, de l'IN2P3 au CNRS et du GANIL.

3.4 Planning

Le planning des deux phases définies précédemment (stratégie arrêtée en juillet 2012) est le suivant :

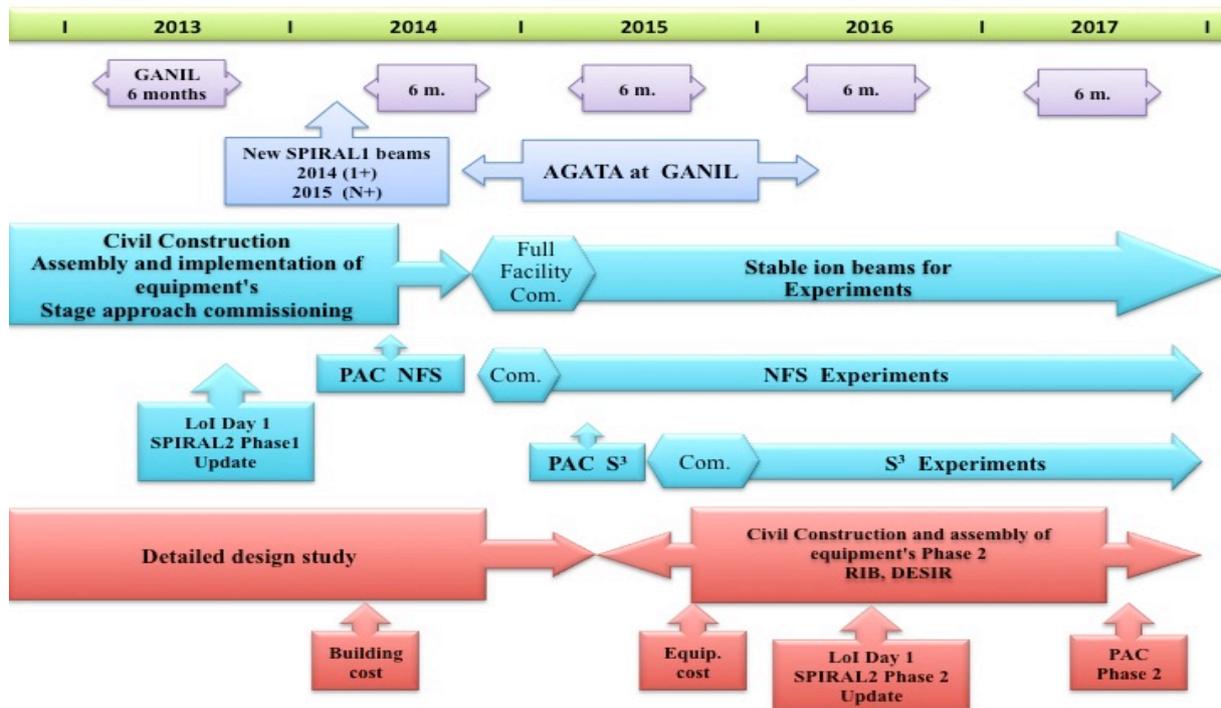
Phase 1 :

- Début des installations SPIRAL2 sur site (Montage de la ligne basse énergie du LINAC LBE1) : Octobre 2012
- Début Installation RFQ : Mars 2013
- Début Installation Cryomodule : Juillet 2013
- Mise en froid du LINAC : Mai 2014
- Faisceaux sortie RFQ : Avril 2014
- Premiers faisceaux sortie du LINAC : Septembre 2014

Phase 2 :

- Bâtiments
 - o APD : T1 & T2 2013
 - o PRO-DCE : T3 2013 à T1 2014
 - o Coûts consolidés : T2 2014
 - o Réalisation : T2 2015 à mi-2017
 - o Essais ensemble : T2 2017 à fin 2017
- Procédés
 - o APD : T3 2013
 - o PRO-DCE : T1 2014 à T3 2015
 - o Coûts consolidés partiels: T1 2015
 - o Coûts consolidés complets: T3 2015
 - o Réalisation : T1 2016 à T2 2017
 - o Montage sur site : T1 2017 à T1 2018
 - o Début tests en froid : T1 2018

Processus de rattachement : Management (PS01)



Planning simplifié de la construction de SPIRAL2 et des premières expériences S³ et NFS avec les principaux jalons

3.5 Partenariat SPIRAL2

19 accords bilatéraux avec 16 pays ont été signés :

- MoU's avec GSI (Allemagne), ISOLDE-CERN (Suisse), MSU, ANL et ORNL (Etats-Unis), l'université d'Uppsala (Suède), ESS Bilbao (Espagne), TRIUMF (Canada), INFN (Italie), NIPNE (Roumanie), JINR (Russie), INRNE (Bulgarie), SOREQ (Israël), BARC (Inde), IMP (Chine)
- LEA's COLLIGA (Italie), COPIGAL (Pologne) et NuAG (République Tchèque)
- LIA's Inde et Japon

7 accords multilatéraux pour l'instrumentation :

- 4 MoU's : NEDA, PARIS, NFS, FAZIA
- 3 accords de collaboration : ACTAR TPC, DESIR, EXOGAM2

2 projets européens du 7e Programme Cadre de Recherche et Développement (FP7) de la Commission Européenne :

- SPIRAL2 PP (GANIL est coordinateur) : 25 partenaires (instituts publics et entreprises privées) sur 13 pays (France, Allemagne, Italie, Royaume-Uni, Roumanie, Pologne, République Tchèque, Bulgarie, Hongrie, Belgique, Pays-Bas, Espagne, Israël)
- CRISP (GANIL est participant) : 16 partenaires publics sur 10 pays (France, Allemagne, Italie, Royaume-Uni, Suisse, Suède, Grèce, Portugal, Hongrie, Roumanie)

3.6 Budget

Dépenses : hors aléas et détecteurs (NFS, S3, DESIR et autres), la phase 1 est estimée à 71 M€ (chiffage 2007 : 65,7M€) et la phase 2 à 80,7M€ (chiffage 2007 : 57,5M€), soit un total de 151,7M€.

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 17/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

Afin de limiter les aléas et de respecter le calendrier du financement, les contrats majeurs pour le procédé et les bâtiments de la phase 2 ne seront lancés que lorsque les analyses des offres seront achevées (T2 2014 et T3 2015 pour les procédés complets).

Au 10 mai 2012, l'ensemble des engagements financiers est de 84,77M€ (69,22 Phase 1 et 15,55 Phase 2).

Pour information, le budget de fonctionnement 2012 du GANIL est de 9 M€ (2012). Si les hypothèses budgétaires sont respectées, le GANIL réduira son temps de fonctionnement dans les années 2012 à 2014 de la façon suivante :

- 4 mois en 2012,
- 6 mois en 2013 et 2014 au lieu de 9 mois en fonctionnement habituel.

4. Cohérence de l'ensemble GANIL-SPIRAL2

Le projet SPIRAL2 a été conçu dès l'origine comme une extension des capacités de faisceaux stables et exotiques de l'installation existante avec les objectifs majeurs suivants :

- Accroître la puissance des faisceaux d'ions lourds stables d'un facteur 10 à 100 et doter le GANIL des ions légers p, d et ions de masse $A < 12$ non accessibles présentement au GANIL ; les utiliser dès la sortie de l'accélérateur SPIRAL2 dans deux nouvelles salles d'expériences dédiées (AEL) où les scientifiques installeront deux instruments aux performances uniques au monde : S^3 (un Super Spectromètre Séparateur qui fera notamment la chasse aux éléments super-lourds) et une ligne de neutrons rapides NFS (Neutrons for Science) dédiés à l'étude des réactions induites par neutrons rapides (mesure de sections efficaces utiles pour les réacteurs de nouvelle génération notamment). **Ces objectifs constituent la PHASE1 de SPIRAL2.**
- Multiplier par plusieurs ordres de grandeur (d'un facteur 10 à 1000) la production de noyaux « exotiques » et élargir considérablement la gamme des éléments « éphémères » produits aujourd'hui par GANIL/SPIRAL1. Les faisceaux de SPIRAL2 « extraits » au repos d'une cible de carbure d'Uranium (ou d'autres éléments chimiques) seront :
 - o Soit post-accélérés par l'accélérateur existant CIME de l'installation SPIRAL1 au GANIL et conduit à haute énergie dans plusieurs salles expérimentales du GANIL, salles existantes et déjà dotées de spectromètres et détecteurs performants (VAMOS, Exogam2, SPEG, LISE, INDRA, MAYA).
 - o Soit envoyés directement dans une nouvelle salle expérimentale DESIR pour la réalisation d'expériences de physique à l'aide de faisceaux radioactifs de basse énergie.

La production de faisceaux exotiques, leur transmission vers DESIR et leur post-accélération dans le GANIL existant constituent la Phase 2 du projet SPIRAL2. Par ailleurs, la plateforme expérimentale DESIR qui sera construite lors de la phase 2 du projet pourra recevoir non seulement les faisceaux délivrés par le bâtiment de production de SPIRAL2, mais aussi ceux issus de la salle d'expérience S^3 et ceux issus de l'installation SPIRAL 1 existante. S^3 fournira en particulier des faisceaux d'éléments réfractaires peu ou pas disponibles auprès des principales autres installations de recherche. SPIRAL1 fournit aujourd'hui des faisceaux radioactifs légers ($A < 90$) lesquels, dans leur grande majorité, ne seront pas produits sur SPIRAL2. Ainsi, par la qualité et la diversité de ses faisceaux, le GANIL/SPIRAL1/SPIRAL2 sera une installation unique en son genre et un **leader mondial dans la physique basse énergie.**

La nouvelle installation SPIRAL2 avec le GANIL/SPIRAL1 existant, ses accélérateurs et équipements permettront de mettre en œuvre, **un complexe accélérateur unique au monde** et capable de fournir 2 faisceaux exotiques et 3 faisceaux stables à différentes énergies en parallèle.

Ainsi, cette installation pourra répondre aux besoins d'une communauté de plus 1000 utilisateurs ainsi que l'atteste le succès de l'appel à lettres d'intention de SPIRAL2 (**82 propositions de programmes expérimentaux « Letter of Intent » déposés à ce jour, dont 35% qui concerne la phase 1 et 65% la phase 2).**

4.1 La plateforme technique

Lors de la mise en exploitation de SPIRAL2, avec l'installation GANIL existante, 16 différentes possibilités de fourniture du faisceau vers les utilisateurs seront envisageables (voir figure « schéma des accélérateurs et des aires expérimentales GANIL/SPIRAL1 » et « schéma de l'installation GANIL/SPIRAL2 »). 9 des 16 modes de fonctionnement possibles peuvent être associés à la délivrance de faisceaux radioactifs. Ils sont indiqués en bleu dans le tableau suivant :

mode	Description du mode de fonctionnement	Installation
A	Production et accélération d'un faisceau stable de basse énergie par un des injecteurs C01 ou C02 vers IRRSUD	GANIL existant
B	Production et accélération d'un faisceau stable de moyenne énergie par le CSS1 vers la salle d'expérience D1	GANIL existant
C	Production et accélération d'un faisceau stable par C01 seul ou C02 seul ou par le CSS1 ou le CSS2 puis transport vers les salles d'expériences existantes	GANIL existant
C'	Production et accélération d'un faisceau stable de haute énergie par le CSS2, production d'un faisceau radioactif puis transport vers les salles d'expériences existantes	GANIL existant
D	Production et accélération d'un faisceau stable de haute énergie par le CSS2, puis production d'un faisceau radioactif par l'ECS de SPIRAL et transport à basse énergie vers LIRAT	GANIL existant
E	Production d'un faisceau stable de basse énergie par l'ECS de SPIRAL et transport vers LIRAT	GANIL existant
F	Production et accélération d'un faisceau stable de haute énergie par le CSS2, puis production et accélération avec CIME d'un faisceau radioactif SPIRAL de moyenne énergie et transport vers les salles d'expériences existantes	GANIL existant
G	Production et accélération avec CIME d'un faisceau stable SPIRAL de moyenne énergie puis transport vers les salles d'expériences existantes	GANIL existant
H	Production et accélération par le LINAC vers une des 2 salles S3 ou NFS	SPIRAL2 phase 1
I	Production et accélération d'un faisceau stable par le LINAC vers la salle S3 puis transport du faisceau secondaire produit dans S3 vers le hall d'expériences DESIR	SPIRAL2 phase 2
J	Production et accélération d'un faisceau stable par le LINAC vers l'installation de production d'isotopes radioactifs puis transport d'un faisceau radioactif ou stable produit vers le hall d'expériences DESIR	SPIRAL2 phase 2
K	Production d'un faisceau stable dans l'installation de production d'isotopes radioactifs puis transport de ce faisceau stable vers le hall d'expérience DESIR	SPIRAL2 phase 2
L	Production et accélération d'un faisceau stable par le LINAC vers l'installation de production d'isotopes radioactifs puis transport d'un faisceau radioactif ou stable vers le cyclotron CIME pour être accéléré puis transporté vers les salles d'expérience existantes	SPIRAL2 phase 2 GANIL existant
M	Production d'un faisceau stable dans l'installation de production d'isotopes radioactifs puis transport de ce faisceau stable vers CIME pour être accéléré puis transporté vers les salles d'expériences existantes	SPIRAL2 phase 2 GANIL existant

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 19/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

N	Production et accélération d'un faisceau stable de haute énergie par le CSS2, puis production d'un faisceau radioactif ou stable SPIRAL transporté à basse énergie vers DESIR via la ligne LIRAT	GANIL existant SPIRAL2 phase 2
0	Production d'un faisceau stable par l'ECS de SPIRAL, vers DESIR via la ligne LIRAT	GANIL existant SPIRAL2 phase 2

Il est à noter que les caves de production (SPIRAL1, SPIRAL2) pourront servir de production d'isotopes radioactifs, puis retrait vers boîte à gans pour traitement et utilisation ultérieure.

Ainsi SPIRAL2 permettra de renforcer la possibilité de servir plusieurs utilisateurs en même temps avec des faisceaux distincts tant en nature qu'en énergie. Actuellement, en effet, les Comités d'expériences du GANIL et du CILRIL ont à gérer de 2 à 3 fois plus de demandes qu'ils n'ont de temps de faisceau à distribuer. Ne pouvant augmenter le nombre global de semaines de fonctionnement – 35/an actuellement en fonctionnement nominal – nous nous sommes attachés à développer la possibilité de faisceaux délivrés en parallèle.

L'ensemble GANIL/SPIRAL1/SPIRAL2 sera ainsi capable de fournir annuellement et de manière régulière :

- **jusqu'à 79 semaines de faisceau stables,**
- **jusqu'à 53 semaines de faisceau radioactifs,**
- **jusqu'à 5 faisceaux en parallèle dont 2 faisceaux radioactifs indépendants,**

soit presque un **triplément** des capacités actuelles de GANIL/SPIRAL1.

Cette augmentation du temps de faisceau disponible bénéficiera bien évidemment aux expériences de physique nucléaire mais également aux autres disciplines utilisant les faisceaux du GANIL, la physique de matériaux et la radiobiologie en particulier. Elle permettra à l'ensemble GANIL/SPIRAL1/SPIRAL2 de répondre aux attentes de près de **1000 utilisateurs par an**.

La très large palette de particules, d'ions (du **proton à l'uranium**) et de **neutrons**, dans des domaines énergies allant **du keV au GeV** et des intensités atteignant 5 mA (deutons) feront de l'installation un **outil unique en France et dans le monde**.

4.2 Nature des faisceaux disponibles

Le projet SPIRAL2 repose sur la production de faisceaux radioactifs par les techniques de type ISOL ou de production en vol à basse énergie. Ces opérations seront assurées par le driver multifaisceaux. L'accélérateur linéaire (LINAC) supraconducteur d'ions légers ou lourds fonctionnera avec un potentiel d'accélération d'environ 40 MV. Il pourra accélérer les deutons avec une intensité de 5 mA jusqu'à 40 MeV et des ions lourds à une intensité de 1mA jusqu'à 14.5 MeV/nucléon.

Type de faisceau	Protons (H ⁺)	Deutons (2H ⁺) « q/A=1/2 »	Ions « q/A≥1/3 »	Ions « q/A≥1/6 »
Intensité Max (mA)	5	5	1	1
Energie Min (MeV/A)	0	0	0	0
Energie Max (MeV/A)	33	20	15	9
Puissance faisceau Max (kW)	165	200	45	54

Type de faisceaux produits par le LINAC de SPIRAL2

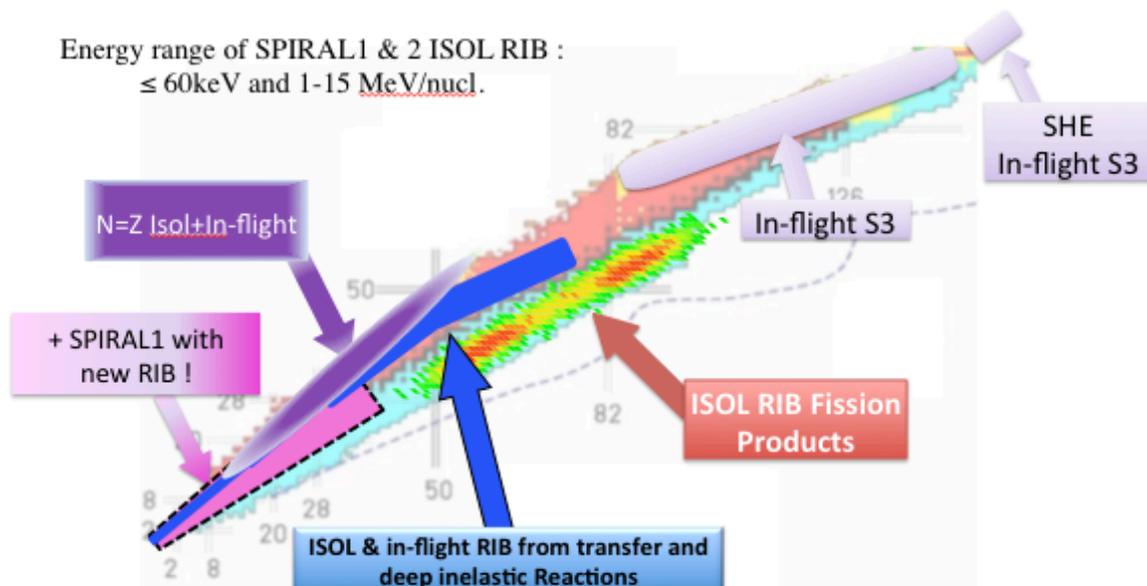
Avec SPIRAL2, les faisceaux accélérés par le LINAC pourront bombarder des cibles minces ou épaisses, et être ainsi employés pour la production de faisceaux radioactifs intenses par des mécanismes de réaction variés (fusion, fission, réactions de transfert multi-nucléons notamment pour

la production des faisceaux légers etc.) et par plusieurs techniques (ISOL, IGISOL, spectromètres de recul, etc...).

Plus particulièrement, lors de la phase 1 de SPIRAL2, l'accélération de faisceaux d'ions lourds à haute intensité, grâce à l'avènement des nouvelles générations de sources d'ions ECR, permettra d'explorer une zone de **noyaux très déficients en neutrons tel que ^{100}Sn** ainsi que la production de **noyaux lourds et super-lourds**.

Lors de la Phase 2 de SPIRAL2, le flux de neutrons, issu de la cassure (break up) du faisceau de deutons sur une cible tournante de carbone (appelée convertisseur), sera utilisé pour induire des fissions dans une cible de carbure d'uranium. Un taux inégalé de **5.10^{13} fissions/s** devrait être atteint dans le cadre du projet. Les noyaux radioactifs ainsi produits seront compris dans une gamme de masse allant de $A=60$ à $A=140$. A ces noyaux riches en neutrons s'ajouteront des éléments proches de la vallée de stabilité par des réactions de transfert ou à l'extrême proches de la drip line protons produits par des réactions de fusion-évaporation induites par ions lourds. Enfin, l'implantation des faisceaux intenses d'ions légers délivrés par le LINAC sur différentes cibles de production permettra de produire des faisceaux radioactifs légers avec des intensités comparables à celles des faisceaux stables actuels (ex : faisceaux de ^6He , ^8Li à 2.10^{12} pps et $^{14-15}\text{O}$ à 2.10^{12} pps).

RIB's with SPIRAL1 & SPIRAL2



pro.ganil-spiral2.eu/users-guide/accelerators/chart-beams

Carte des nucléides identifiés par leur nombre de neutrons en abscisse et leur nombre de protons en ordonnée. Les cases noires sont les quelques 250 noyaux stables existants dans la nature ; les zones rouge et bleue sont les noyaux exotiques découverts à ce jour, soit près de 2000 ; la zone en pointillés délimite les 3000 à 5000 noyaux exotiques qui n'ont pas encore été synthétisés en laboratoire. Les zones fléchées ciblent les régions de la carte des noyaux rendues accessibles par SPIRAL 1 et SPIRAL2 au moyen des différents modes de production indiqués.

La gamme des énergies accessibles pour ce qui est des faisceaux exotiques ($<60\text{keV}$ et $1-20 \text{ MeV/n}$) sera elle aussi unique et parfaitement adaptée aux études de structure nucléaires, de mécanismes de réaction, d'astrophysique et des symétries fondamentales qui intéressent la communauté

internationale.

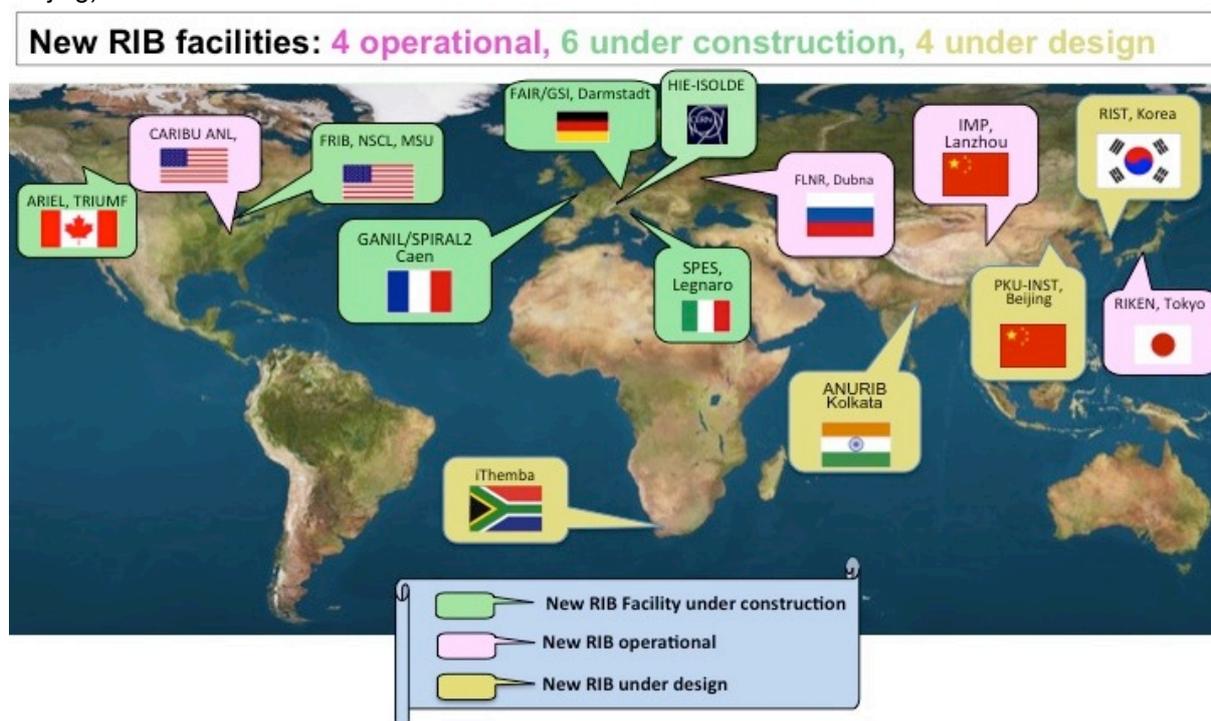
5. GANIL/SPIRAL2 dans l'environnement international

5.1 Environnement scientifique et positionnement

SPIRAL2 est avec FAIR une priorité de la feuille de route européenne de physique nucléaire établie depuis 2006 et confirmée récemment (2010) par la communauté sous l'égide de NuPECC, le comité de collaboration européen pour la physique nucléaire. SPIRAL2 est sur la feuille de route de ESFRI depuis 2006. L'objectif, à l'horizon des années 2020, est le développement en Europe de deux installations de production de noyaux radioactifs dites de seconde génération fondées sur les deux méthodes de production « en vol » et ISOL: FAIR en Allemagne et EURISOL dont le site n'est pas encore fixé. La France est très présente dans ces réflexions à long terme puisque le GANIL a été pendant plusieurs années le coordinateur des programmes européens qui développent EURISOL.

Actuellement en dehors du GANIL les faisceaux radioactifs post-accélérés ou issus de la fragmentation en vol sont utilisés couramment à GSI, REX-ISOLDE et JINR Dubna en Europe, à RIBF/RIKEN au Japon, à ISAC/TRIUMF au Canada et à ANL et NSCL/MSU aux USA. Il existe une dizaine d'autres laboratoires dans le monde qui produisent différents faisceaux radioactifs (essentiellement des noyaux légers) pour des expériences ciblées.

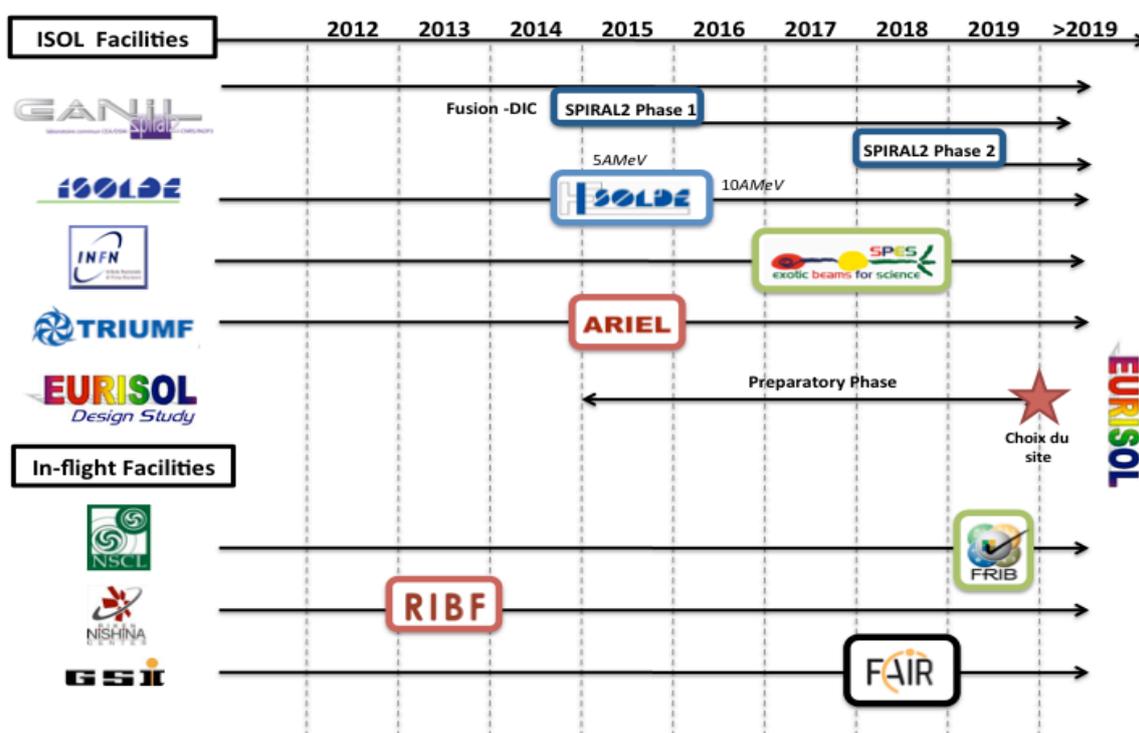
Durant la décennie 2010-2020 REX-ISOLDE au CERN et TRIUMF/ISAC au Canada verront une augmentation de leurs performances avec, respectivement, un accroissement de l'intensité et de l'énergie des noyaux radioactifs post-accélérés ainsi qu'une diversification des méthodes de productions. Le projet SPES à LNL Legnaro en Italie dédié, comme SPIRAL2, à la production de faisceaux de fragments de fissions est dans sa phase initiale de construction. Aux Etats-Unis un projet très ambitieux (cout actuel 650M\$) d'une usine des faisceaux radioactifs (projet FRIB) est en début de construction à MSU, East Lansing. En Corée du Sud le projet d'un complexe d'accélérateurs de faisceaux stables et radioactifs (projet RISP) vient d'être accepté. Des projets similaires existent dans une phase d'avant projet sommaire en Inde (projet ANURIB à Kolkata) et en Chine (projet CARIF à Beijing).



Installations de faisceaux radioactifs opérationnelles, en construction et en projet.

SPIRAL2 est identifié comme une étape indispensable entre la première génération des installations de faisceaux radioactifs actuellement en service (GANIL/SPIRAL, REX-ISOLDE, etc) et les projets de seconde génération comme EURISOL. Le GANIL a déclaré sa candidature pour accueillir l'installation EURISOL dans l'avenir. De par la nature même de l'accélérateur choisi, un accélérateur linéaire supraconducteur, le projet SPIRAL2 est parfaitement évolutif. Il pourrait constituer une partie de l'ossature de la future installation EURISOL. Une étape intermédiaire vers EURISOL avec une post-accélération des faisceaux des fragments de fission jusqu'à 150 MeV/nucléon (au lieu de 5-9 MeV/nucléon dans le projet actuel), soutenue par la communauté scientifique, est envisageable après 2020.

La figure ci-dessous montre le planning de mise en service des différentes installations suscité jusqu'à l'horizon 2020.

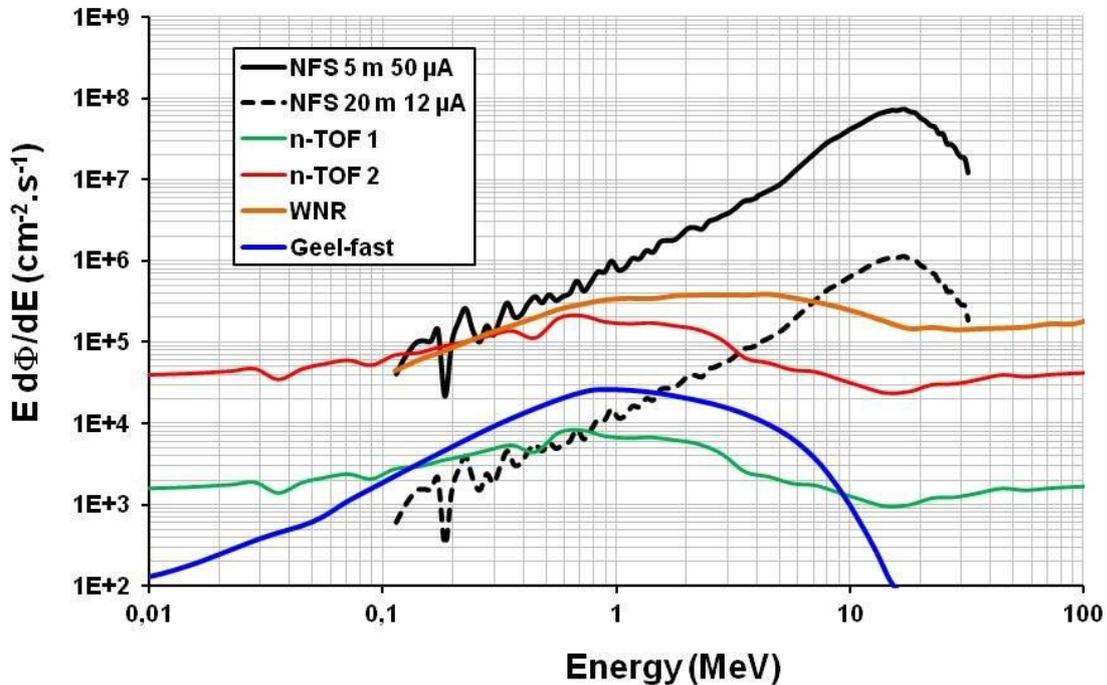


Feuille de route des différentes installations de faisceaux radioactifs incluant SPIRAL2

5.2 Originalité et caractère novateur des faisceaux disponibles auprès de SPIRAL2

Faisceaux de neutrons avec NFS

SPIRAL 2 avec son accélérateur linéaire de deutons de très haute intensité combiné avec un convertisseur dans la salle NFS va permettre de produire des flux de neutrons de haute intensité (jusqu'à 10^{13} n/s) et d'énergie élevée. Comme le montre la figure ci-dessous NFS concurrence favorablement plusieurs installations, du même type dans la gamme d'énergie de 0.1 MeV à 40 MeV.



Comparaison des flux de neutrons en fonction de l'énergie entre les installations NFS, Gelina (Geel, Belgique), WNR (Los Alamos, US) et n-TOF (CERN).

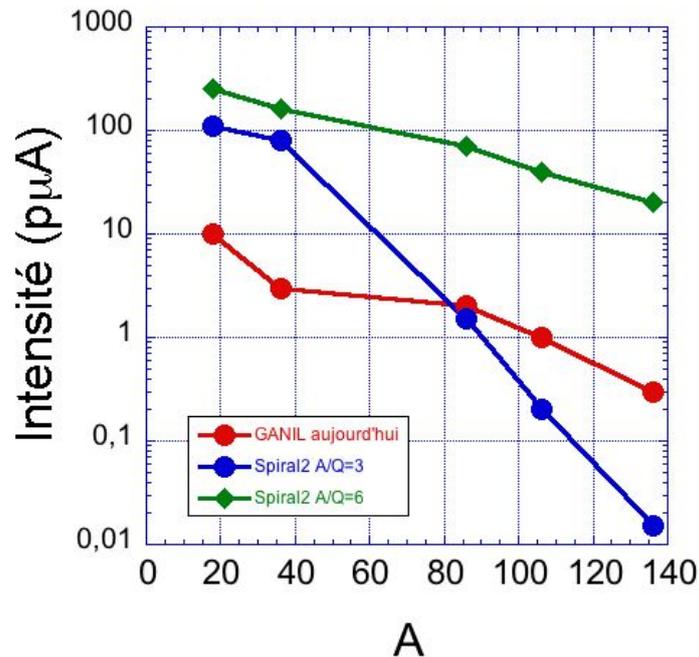
Faisceaux d'ions stables

Pour les faisceaux d'ions lourds stables accélérés par SPIRAL2, les performances visées (1 à 5 mA suivant la masses des ions) placent d'emblée l'installation comme la plus performante au monde. Ces intensités offriront de nouvelles opportunités dont l'exploitation donnera un avantage décisif à la communauté française dans de nombreux aspects de la physique nucléaire, tels que la synthèse et la spectroscopie des noyaux super-lourds et très lourds, ainsi que celle des noyaux très déficients en neutrons. Ces intensités offriront aussi des perspectives uniques en physique atomique (étude des interactions entre deux faisceaux d'ions) et contribueront ainsi de façon significative à différents domaines tels que le plasma de fusion, les plasmas stellaires et interstellaires et l'endommagement des matériaux sous irradiation.

La figure ci-dessous illustre les intensités effectives des faisceaux de gaz rares (O,Ar,Kr,Xe) accélérés actuellement par le GANIL (courbe rouge) et attendus avec SPIRAL2 (courbe bleu pour un RFQ 1/3 et courbe verte pour un RFQ 1/6). Les performances représentées pour SPIRAL2 sont estimées avec les nouvelles générations de sources d'ions ECR supraconductrices.

Il est à noter que le projet de référence de SPIRAL2 comprend une source d'ions « conventionnelle », installée pour le démarrage du projet, couplé à un RFQ 1/3. Les intensités attendues seront un facteur 5 à 10 inférieures à celles représentées sur cette figure par la courbe bleue.

Les faisceaux les plus intenses délivrés par le LINAC seront obtenus avec le RFQ 1/6 (courbe verte) qui est une option du projet.



En fonctionnement nominal, l'intensité effective des ions lourds stables gazeux accélérés par le LINAC de SPIRAL2 correspondra à la courbe bleu. La courbe en rouge représente les intensités actuellement disponibles au GANIL. La courbe verte montre les intensités atteignables avec un RFQ A/q = 6, qui est une option du projet SPIRAL2, mais dont l'intégration a été anticipée lors de la construction des bâtiments de la Phase 1.

Faisceaux radioactifs

La pluralité, les intensités et la gamme des énergies accessibles pour les faisceaux exotiques, seront uniques et parfaitement adaptées aux études de structure nucléaires qui intéressent la communauté internationale.

Une comparaison entre les différentes machines existantes ou en projet est présentée, sur les figures ci-dessous, dans le cas des isotopes du krypton et de l'étain, particulièrement intéressants en regard de l'étude de l'évolution de la structure du noyau suivant son nombre de protons et de neutrons. Les figures ci-dessous, montent une comparaison entre des installations existantes (REX-Isolde et RIBF/RIKEN) et SPIRAL2 d'une part et les projets FAIR (Allemagne), SPES (Italie), FRIB (Etats Unis) et EURISOL, d'autre part.

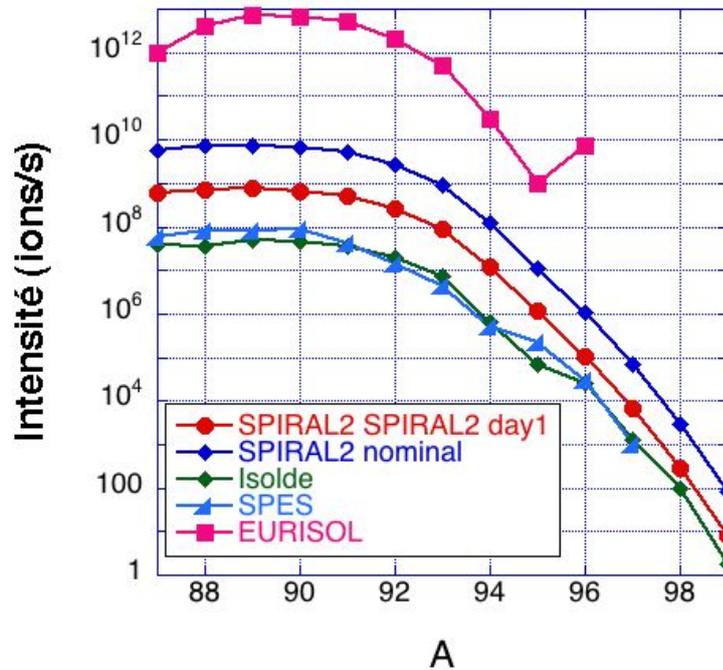
Nous rappelons que les faisceaux obtenus par la méthode ISOL (donc disponibles auprès de SPIRAL2) sont idéaux pour effectuer des mesures de précisions à très basse énergie (masse, déformation, caractéristiques quantiques, modes de décroissance radioactive, ...) ou par réactions nucléaires à des énergies proches de la barrière coulombienne, tel que les réactions de transfert, les réactions d'excitation coulombienne et les réactions de fusion (énergie, taux d'occupation et configuration des états excités, déformation du noyau, ...).

Les faisceaux produits par la méthode de fragmentation du projectile, sont quand à eux, utilisés pour effectuer des réactions à plus haute énergie, tel que les réactions de knockout (arrachage d'un ou

Processus de rattachement : Management (PS01)

plusieurs nucléons), d'échange de charge, ou l'étude des résonances géantes qui traduisent les modes collectifs d'excitation du noyau.

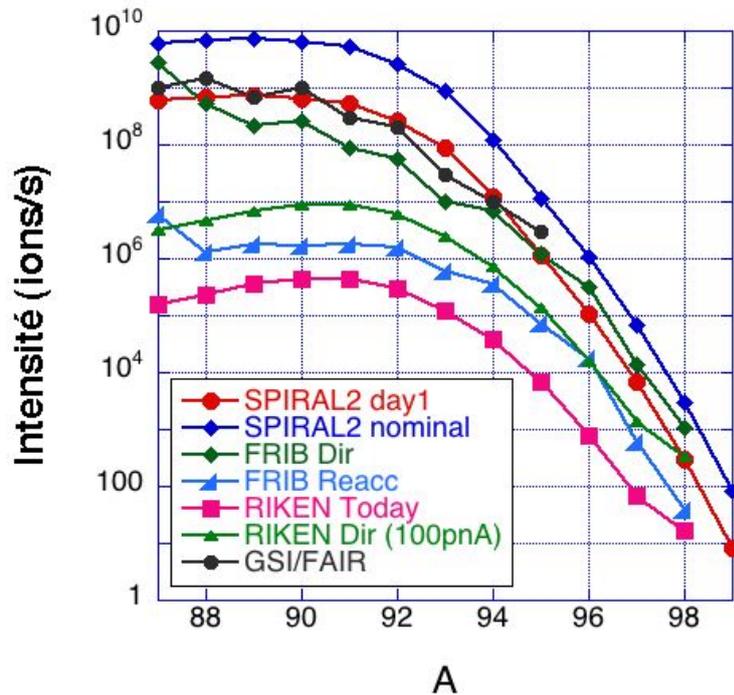
Isotopes de Kr



Comparaison entre les installations ISOL existantes (REX-ISOLDE) ou en construction (SPIRAL2) d'une part et les projets SPES et EURISOL, d'autre part. La figure montre les intensités en échelle logarithmique des faisceaux radioactifs de krypton accélérés obtenus par la méthode ISOL.

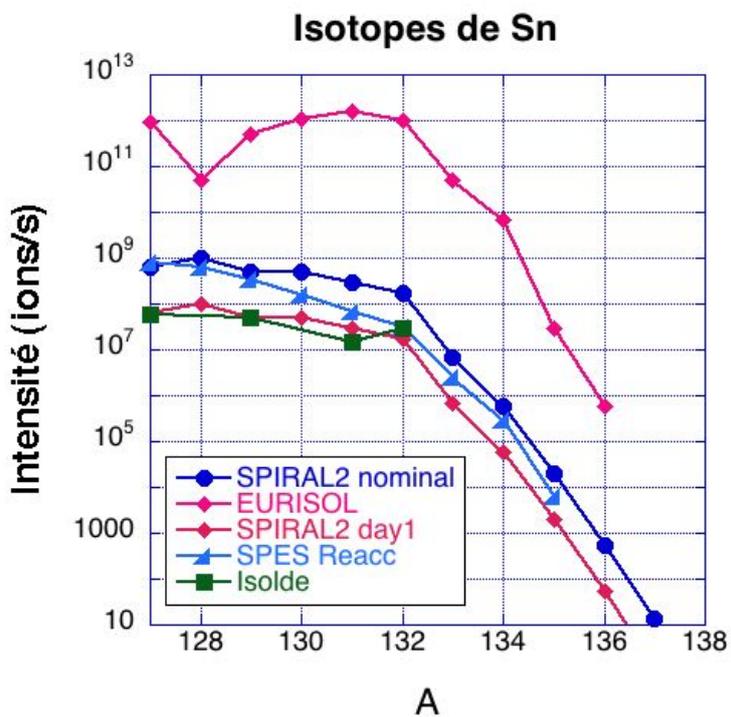
Processus de rattachement : Management (PS01)

Isotopes de Kr



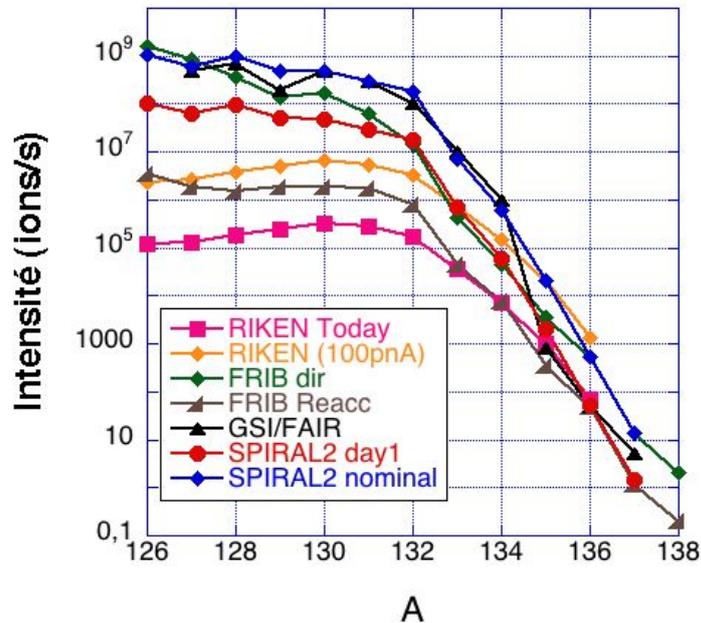
Comparaison entre des installations existantes (RIKEN) ou en construction, (SPIRAL2) d'une part et les projets FRIB et FAIR, d'autre part. La figure montre les intensités en échelle logarithmique des faisceaux radioactifs de krypton accélérés obtenus par la méthode ISOL pour SPIRAL2 et FRIB Reacc ou par la méthode de production en vol pour RIKEN, FRIB Dir et FAIR (350 MeV/u à 1 GeV/u).

Processus de rattachement : Management (PS01)



Comparaison entre les installations ISOL existantes (REX-ISOLDE) ou en construction SPIRAL2 d'une part et les projets SPES et EURISOL, d'autre part. La figure montre les intensités en échelle logarithmique des faisceaux radioactifs d'étain accélérés obtenus par la méthode ISOL.

Isotopes de Sn



Comparaison entre des installations existantes (RIKEN) ou en construction, SPIRAL2 d'une part et les projets FRIB et FAIR, d'autre part. La figure montre les intensités en échelle logarithmique des faisceaux radioactifs d'étain accélérés obtenus par la méthode ISOL pour SPIRAL2 et FRIB Reacc ou par la méthode de production en vol pour RIKEN, FRIB Dir et FAIR (350 MeV/u à 1GeV/u).

L'installation REX-ISOLDE, mise en service en 2001, accélère les noyaux exotiques produits grâce aux faisceaux du CERN à Genève. Compte tenu de la longue expérience de l'installation ISOLDE en matière de noyaux exotiques, REX-ISOLDE est aujourd'hui une référence. Une augmentation de l'énergie des ions post-accélérés est en cours pour atteindre 5 MeV/n fin 2014 et 10 MeV/n en 2016 (HIE-ISOLDE). On voit clairement que SPIRAL2 disposera d'intensités plus importantes que HIE-ISOLDE, même au démarrage de l'installation (SPIRAL2 day1).

L'autre installation de type ISOL en Europe est SPES, avec un début de construction prévu en 2013. Ce projet est basé sur la fission d'une cible d'Uranium induite par un faisceau direct de proton (40 MeV, 200 μ A) pour un taux de fission inférieur à 10^{13} /s à comparer à $5 \cdot 10^{13}$ /s pour SPIRAL2. Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques des 3 installations de type ISOL en EUROPE (HIE-ISOLDE, SPIRAL2 et SPES).

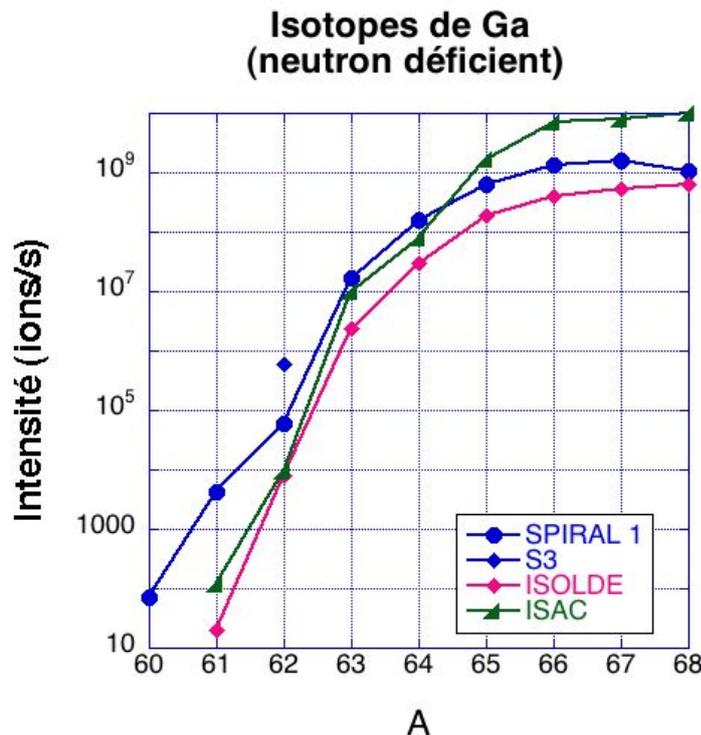
	Faisceau primaire	Puissance sur cible (kW)	Cible UCx	Fission s ⁻¹	Post-accélération	Energie nominale MeV/n
HIE-ISOLDE	p 1-1,4 GeV – 2 μ A	0,8	Direct (150g)	$4 \cdot 10^{12}$	Linac SC	5-10
SPIRAL2	d 40 MeV – 5mA	200	Convertisseur (4kg)	$5 \cdot 10^{13}$	Cyclotron CIME	1-20
SPES	p 40 MeV – 200 μ A	8	Direct (30g)	10^{13}	Linac SC	10

Processus de rattachement : Management (PS01)

Quant à la composante production de noyaux exotiques de l'installation existante RIKEN, des projets Allemand FAIR au GSI ou FRIB aux Etats Unis, la méthode basée sur la fragmentation en vol d'un faisceau d'uranium ne permet pas d'atteindre des taux comparables à ceux de SPIRAL2 aussi bien pour les faisceaux directs (0,3-1 GeV/n) que pour ceux post-accélérés (20 MeV/n).

Les figures montrent clairement qu'il faudra attendre les installations de nouvelles générations, tel que EURISOL en Europe ou RIPS en Asie, pour concurrencer SPIRAL2 dans ces régions de masse.

Par ailleurs la complémentarité entre le GANIL existant avec SPIRAL1 et SPIRAL2 avec son installation S^3 , va permettre d'être très compétitif pour l'étude des noyaux très déficités en neutrons à la limite de la stabilité. La figure suivante montre, pour les isotopes du Ga, la comparaison des intensités attendues entre les installations de type ISOL existantes, ISAC/TRIUMF au Canada et ISOLDE au CERN, avec le GANIL-SPIRAL1 et SPIRAL2- S^3 .



Comparaison entre les installations existantes (ISOLDE et ISAC) d'une part et celles en construction S^3 et l'upgrade de SPIRAL1, d'autre part. La figure montre en échelle logarithmique les intensités des faisceaux radioactifs de Ga déficités en neutrons produits par la méthode ISOL.

Les faisceaux radioactifs de hautes intensités, disponibles pour la première fois avec SPIRAL2 (voir figure ci-dessous), serviront à produire des noyaux encore plus exotiques au moyen de réactions profondément inélastiques (DIC) pour les masses intermédiaires et de réactions de fusion pour les noyaux lourds. On pourra ainsi accéder à des éléments que l'on ne peut pas obtenir directement aujourd'hui avec la méthode Isolde.

Processus de rattachement : Management (PS01)

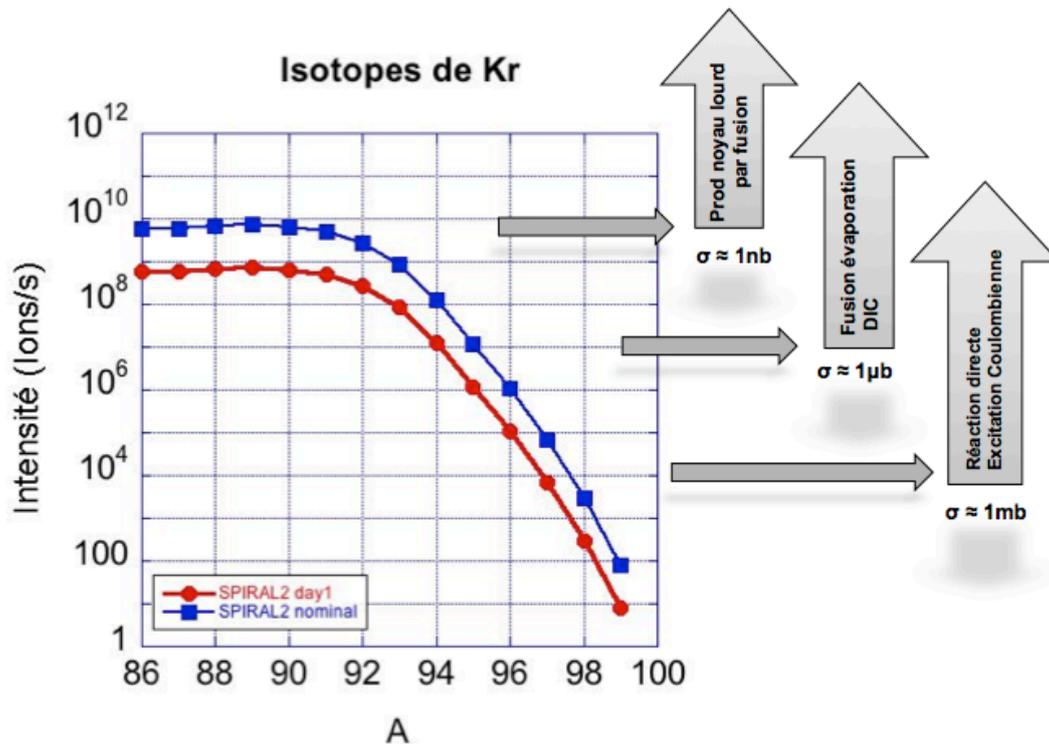


Illustration des mécanismes de réactions possibles en fonction de l'intensité des faisceaux radioactifs de krypton accélérés obtenus par la méthode ISOL pour SPIRAL2.

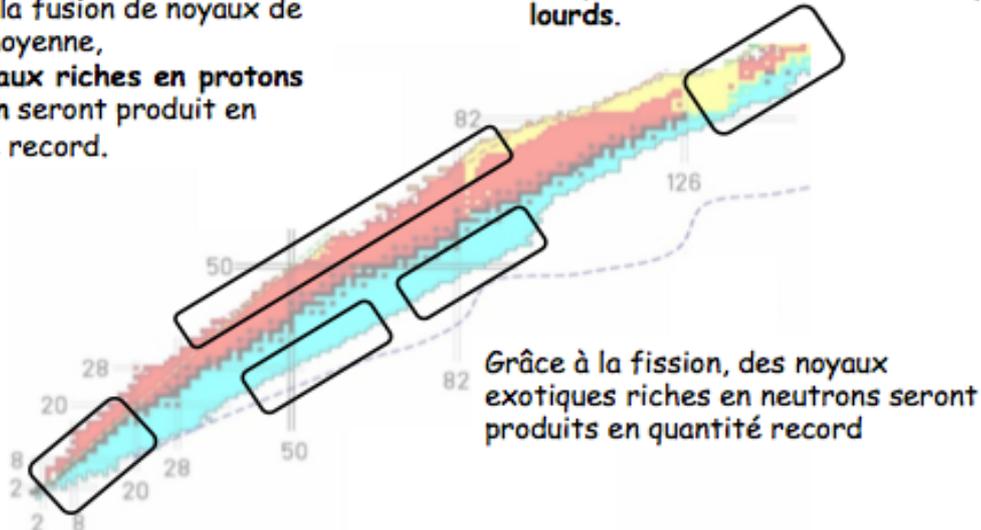
Ce tour d'horizon, entre les différentes machines existantes, en construction ou en projet, illustre bien le rôle majeur du GANIL/SPIRAL2 dans le contexte mondial. Les intensités des faisceaux exotiques produits seront proches pour certains isotopes **des intensités de faisceaux stables actuels**. C'est là une véritable révolution pour la recherche avec des faisceaux exotiques car de telles intensités rendent possible de nombreuses études jusque là impensables. En effet la compréhension détaillée du noyau requiert la mise en œuvre de méthodes expérimentales variées, sur la base de mesures précises et fiables qui seront rendues possibles grâce à la combinaison des intensités et des énergies des noyaux produits par GANIL/SPIRAL2.

Les domaines d'étude d'excellence qui seront rendu possible avec SPIRAL2 sont résumés sur la figure ci-dessous.

Processus de rattachement : Management (PS01)

Grâce à la fusion de noyaux de masse moyenne, **des noyaux riches en protons tel ^{100}Sn seront produit en quantité record.**

Les intensités des faisceaux primaires permettent au GANIL de devenir compétitif dans la course aux **noyaux super lourds.**



Grâce à la fission, **des noyaux exotiques riches en neutrons seront produits en quantité record**

Avec les ions légers de hautes intensités accélérées par LINAC, **des noyaux exotiques de petite masse produits avec des intensités comparables à celles des faisceaux stables actuels.**

Domaines d'étude accessibles avec GANIL SPIRAL2

GANIL/SPIRAL2 fournira ainsi des faisceaux d'ions stables et radioactifs de grande qualité, pureté et intensité dans une gamme d'énergie parfaitement adaptée à **des mesures de précision sur une grande quantité d'observables et sur une large gamme de noyaux.**

Des approches complémentaires permettront de réaliser, par exemple, la **spectroscopie complète** des noyaux exotiques à basse énergie d'excitation grâce à l'analyse d'expériences de mesure de masse, de spectroscopie laser, de décroissance radioactive (**propriétés des états fondamentaux**), de spectroscopie gamma pour déterminer les propriétés des états excités liés, d'excitation coulombienne réalisée à basse énergie (quelques MeV/n) pour l'étude de la forme et de la collectivité des états nucléaires (**facteurs de forme**), de diffusion élastique et inélastique à des énergies de 10 MeV/n, de réactions de transfert de 5 à 30 MeV/n pour la caractérisation de la configuration et du taux d'occupation des états (**facteurs spectroscopiques**), et la détermination de leurs caractéristiques quantiques.

Les faisceaux aux énergies du GANIL/SPIRAL2 sont très bien adaptés pour l'étude des modes de de-excitation et des propriétés microscopiques (densité de niveaux, viscosité, corrélation d'appariement) des noyaux de fusion dans la gamme d'énergie d'excitation (1-3 MeV/n) grâce à la détection exclusive des produits de réaction.

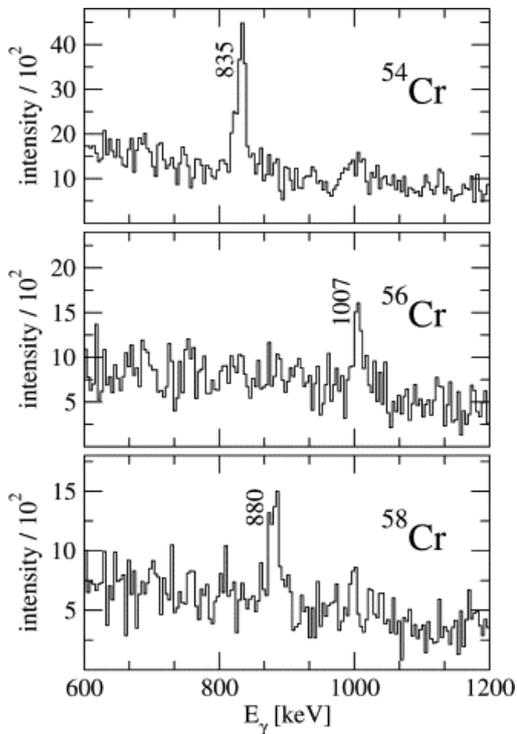
De nombreux sujets d'intérêt pour l'astrophysique seront également développés tel que la détermination de **sections efficaces de réactions nucléaires** intervenant au cours des différentes étapes de la vie d'une étoile.

Enfin les intensités des faisceaux primaires permettront au GANIL/SPIRAL2 de devenir compétitif dans la course aux noyaux lourds et **super-lourds.**

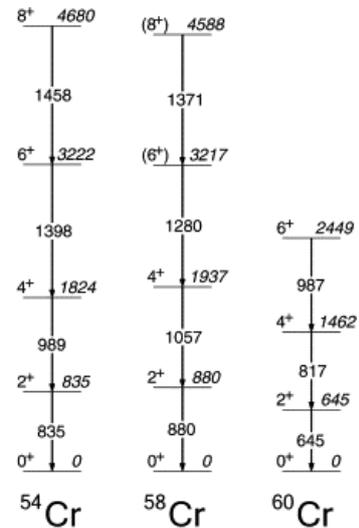
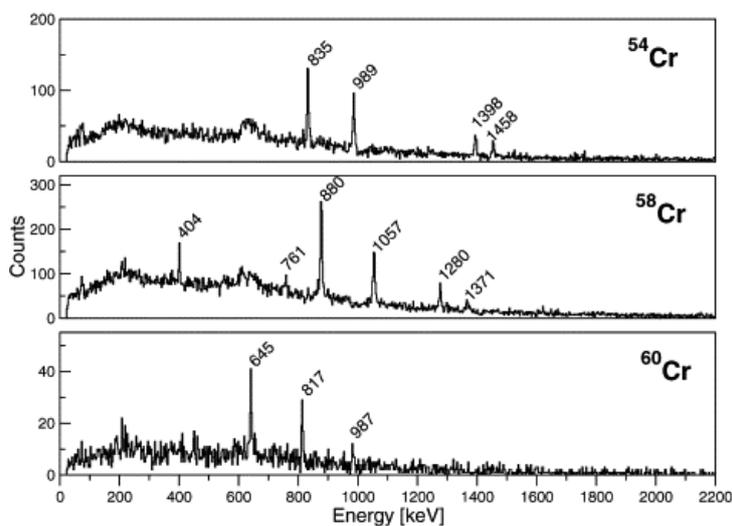
L'exemple, illustré avec les figures ci-dessous, comparant les spectres de désexcitation gamma pour le même noyau à haute (GSI) et basse énergie (LNL), montrent la bien **la qualité des informations**

Processus de rattachement : Management (PS01)

obtenues aux énergies de SPIRAL2 (comparables à celles du LNL) par rapport à celles disponibles aux énergies de RIKEN ou GSI. En effet, à haute énergie incidente, la résolution des spectres de désexcitation gamma est dégradée dû à l'effet Doppler et le rayonnement de freinage induit un bruit de fond important.



Excitation Coulombienne du premier état 2^+ obtenue au GSI avec RISING (200MeV/n) (A. Burger and the RISING collaboration [Physics Letters B](#) Volume 622, Issues 1–2, 25 August 2005, Pages 29–34)



Spectroscopie des états à haut spin obtenu avec le dispositif CLARA-PRISMA à LNL N. Mărginean et al [Physics Letters B](#) Volume 633, Issue 6, 23 February 2006, Pages 696–700)

	DOCUMENT STRATEGIE SCIENTIFIQUE GANIL / SPIRAL 2		DIR-005-A	
			Niv. 4	Page 33/34
Processus de rattachement : Management (PS01)				

Avec GANIL/SPIRAL1 et SPIRAL2, les faisceaux radioactifs peuvent couvrir **une grande partie de la carte des radionucléides** (Cf Figure section 4.2). Ainsi, la compréhension détaillée des noyaux exotiques, aussi bien riches que déficients en neutrons, va permettre d'aborder des thèmes qui constituent de réels défis en physique nucléaire et bien au-delà. Nous allons en effet pouvoir, avec cette nouvelle installation, sélectionner des noyaux spécifiques parmi les milliers de nucléides produits et d'ainsi **isoler et amplifier les effets des forces agissant au cœur du noyau, à travers la manifestation de corrélations, de modes d'excitation et de symétries fondamentales.**

5.3 Importance stratégique pour la France : Perspectives

SPIRAL2 est d'une importance stratégique majeure pour la France pour préserver et amplifier ses compétences et ses savoirs faire dans les domaines de la recherche, de l'énergie, de la santé (hadron et radiothérapie, imagerie médicale), des technologies de pointe et de la formation. GANIL/SPIRAL2 joue également un rôle central et structurant dans le développement de la recherche en Basse Normandie.

Autour du GANIL s'est développé un campus unique au monde avec de nouveaux outils et projets (CYCERON, ARCHADE et SPIRAL2) qui vont placer le site caennais au meilleur niveau mondial dans la recherche nucléaire appliquée à la médecine.

Au niveau international, la majeure partie des pays dotés d'une industrie nucléaire importante développent des installations de faisceaux exotiques : Japon, Chine, USA, Russie, Inde, Brésil, Corée du Sud, Canada, Belgique etc. En Europe, l'Italie et l'Allemagne ont de nouvelles installations en construction ou en projet.

SPIRAL2 est un des principaux précurseurs de l'installation de seconde génération EURISOL que le GANIL se propose d'accueillir dans l'avenir. Une étape intermédiaire vers EURISOL avec une installation permettant l'accélération des fragments de fission à 150 MeV/nucléon (au lieu de 10 MeV/nucléon dans le projet SPIRAL2 actuel) peut être envisagée après 2020.



Image de synthèse représentant une implantation de l'installation du projet EURISOL sur le site du GANIL. Dans cette optique le LINAC de SPIRAL2 a été conçu pour être soit le post accélérateur de EURISOL ou soit une partie du driver.

Le concept d'EURISOL consiste en un accélérateur linéaire supraconducteur fournissant des protons d'énergie 1 GeV et une puissance impressionnante de 5 MW. EURISOL sera aussi capable d'accélérer des deutons, des Helium 3 et des ions jusqu'à la masse 40. Les faisceaux vont collisionner simultanément avec deux types de cibles, soit directement ou après conversion des protons en neutrons. Les noyaux instables produits se diffusent hors de la cible, sont ionisés et sélectionnés et peuvent être directement utilisés à basse énergie ou ré-accélérés par un autre accélérateur linéaire jusqu'à des énergies de 150 MeV par nucléon de façon à induire des réactions nucléaires.