

L'AVENIR EUROPEEN DU GANIL

Avis

**du Conseil Économique et Social Régional de Basse-Normandie
adopté à l'unanimité le 16 décembre 2002**

L'AVENIR EUROPEEN DU GANIL

Onze années après l'étude relative ***aux développements scientifiques autour du GANIL : bilan et perspectives***¹, le CESR de Basse-Normandie est amené à réaliser, de nouveau sur saisine du Président du Conseil Régional, un rapport sur ***l'avenir européen du Grand Accélérateur National d'Ions Lourds***.

Depuis cette première étude, le Très Grand Équipement a fortement évolué tant en termes d'équipements qu'en matière de thématiques de recherches, suivant en cela les évolutions scientifiques autour de la connaissance du noyau.

L'installation de SPIRAL (Système de Production d'Ions RAdioactifs en Ligne) au sein du GANIL, opérationnel depuis septembre 2001, constitue une étape capitale et permet au très grand équipement d'être aujourd'hui le plus performant au monde dans son domaine.

Mais, pour conserver le bénéfice de cette avance technologique à moyen et long termes, de nouvelles évolutions apparaissent indispensables et vont nécessiter un soutien des autorités nationales et européennes. La concrétisation du projet SPIRAL II et le positionnement du GANIL pour l'accueil, à plus longue échéance, d'un très grand équipement de seconde génération de niveau européen (EURISOL) s'inscrivent tout à fait dans cette perspective.

C'est la raison pour laquelle, dans un courrier en date du 18 décembre 2001, le Président du Conseil Régional a demandé au CESR d'établir un argumentaire justifiant la légitimité en France de la candidature de GANIL pour accueillir en son sein le futur grand projet européen et ceci, notamment dans la perspective de la tenue d'un prochain Comité Interministériel d'Aménagement et de Développement du Territoire (CIADT) qui doit, conformément à des engagements antérieurs², arrêter des mesures en faveur de la Basse-Normandie afin de prendre en considération les incidences négatives engendrées par la disparition de l'entreprise Moulinex et d'affirmer ainsi une démarche volontariste de développement régional pour l'avenir.

¹ Rapport et Avis rapportés au CESR par Claude DETRAZ, 19 avril 1991.

² Lors du CIADT de Limoges du 9 juillet 2001

GANIL : Un équipement de recherche fondamentale de renommée mondiale

Décidé en 1975 et entré en exploitation huit ans plus tard, le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds est un très grand équipement commun au CNRS et au CEA associés à parts égales dans un Groupement d'Intérêt Économique.

● La vocation première du GANIL est de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la physique nucléaire en offrant à la communauté scientifique les moyens de conduire des recherches fondamentales.

Les expériences qui y sont menées depuis l'origine ont d'ailleurs largement contribué à de nombreuses avancées dans la compréhension de la structure du noyau atomique³ et des systèmes nucléaires fortement perturbés.

En complément de sa forte activité expérimentale, le GANIL a développé en son sein un groupe théorique qui a pris une place prépondérante dans le paysage fondamental français.

L'équipement SPIRAL, mis en service en septembre 2001 et dont le projet a été piloté par un comité scientifique international, constitue un outil aujourd'hui unique en Europe en physique nucléaire. Il ouvre des perspectives très prometteuses et renforce encore davantage le rôle de GANIL au sein de la communauté scientifique mondiale.

SPIRAL permet en effet de produire des ions radioactifs dits "exotiques" de courte durée de vie et n'existant pas sur Terre, de les accélérer et d'en constituer ainsi un faisceau pour les projeter sur une cible. Grâce à cet équipement, les physiciens devraient accumuler des données nouvelles sur quelques uns des milliers de noyaux qui peuplent l'univers.

Ces données sont particulièrement importantes car, comme l'ont déjà montré les quelques expériences réalisées dans ce domaine, l'exploration des noyaux exotiques réserve bien des surprises qui obligent les chercheurs à remettre souvent en cause la vision du noyau de l'atome, vision bâtie depuis un siècle sur l'observation des seuls noyaux stables. Notons également que la connaissance des propriétés de ces noyaux exotiques est indispensable à une bonne description de la nucléosynthèse⁴.

³ Notons que plus de 100 noyaux ont été découverts au GANIL.

⁴ La nucléosynthèse est l'ensemble des processus qui conduisent à l'apparition des éléments constituant la matière de l'univers. Les premiers noyaux (principalement hydrogène mais également hélium) ont donc émergé du Big-Bang voici quelque 15 milliards d'années et servent de combustible aux réacteurs stellaires. C'est en effet au cœur des étoiles et lors de leur explosion que sont transmutés les éléments des plus légers aux plus lourds. Une étoile moyenne comme notre Soleil "brûle" son hydrogène et utilise les "cendres" de cette combustion pour fabriquer des atomes plus lourds comme l'hélium jusqu'au carbone seulement. Les éléments plus lourds jusqu'à l'uranium sont ensuite fabriqués lors de phénomènes violents comme les explosions de *supernovae*.

Les faisceaux de noyaux exotiques ainsi obtenus permettent également une première exploration en termes de mélange de protons et de neutrons, de la matière chaude et dense. L'intérêt de ces études est incontestable pour comprendre et mesurer les propriétés de la matière à très haute température et densité et donc, pour mettre à l'épreuve la description du noyau.

Par ailleurs, la connaissance des noyaux exotiques joue un rôle essentiel dans la compréhension du Cosmos en donnant accès à un état de la matière qui doit exister dans l'univers au cœur des étoiles en fin de vie (*supernovæ* et étoiles à neutrons).

On notera qu'en Europe, les deux principales installations produisant des faisceaux d'isotopes rares sont le GANIL en France et GSI⁵ en Allemagne.

● La deuxième mission du GANIL est le développement d'applications des ions lourds à d'autres domaines de la recherche fondamentale, notamment la physique atomique, la physique de la matière condensée, la chimie sous rayonnement et la radiobiologie. En effet, 10 % du temps du faisceau principal sont consacrés à ces activités et la possibilité d'utiliser, en parallèle, un second faisceau dans la salle à moyenne énergie (SME) permet à ces autres domaines scientifiques de bénéficier d'environ 2 000 heures de faisceau par an.

Dès l'origine, l'utilisation des faisceaux du GANIL par d'autres disciplines a été encouragée. Cela s'est traduit en 1982 par la création du CIRIL (aujourd'hui Centre Interdisciplinaire de Recherche Ions-Lasers), laboratoire commun CEA-CNRS-Université.

Les différentes thématiques s'inscrivant dans ce cadre concernent les collisions ion - atome, l'interaction ion - matériau, le domaine d'application des polymères, la radiolyse de l'eau ou l'effet des particules ionisantes sur les cellules vivantes.

● Le succès du GANIL tient non seulement à la qualité des faisceaux qu'il délivre mais également à la richesse des équipements expérimentaux qu'il met à la disposition de la communauté scientifique internationale. Pour preuve de cette reconnaissance, GANIL enregistre aujourd'hui cinq à six fois plus de demandes d'expériences du monde entier que de temps de faisceau disponible pour les accueillir ! Certains laboratoires se voient ainsi contraints de patienter parfois plusieurs années avant d'y mener une expérience.

La communauté autour du GANIL, toutes activités confondues (physique nucléaire et autres recherches), est forte de quelque 700 utilisateurs dont 40% d'étrangers appartenant à 130 laboratoires et provenant de 30 pays différents. La plupart des programmes expérimentaux et théoriques exigent des collaborations étroites avec de grands laboratoires internationaux situés en Allemagne, en Russie, aux États-Unis et au Japon.

⁵ GSI : Gesellschaft für Schwerionenforschung à Darmstadt.

Le GANIL se distingue tout particulièrement au sein de la communauté scientifique mondiale par son rôle crucial dans la propagation des connaissances sur ses domaines de recherche. Depuis l'origine, la production scientifique du GANIL s'élève ainsi à plus de 1400 publications dans des revues scientifiques à comité de lecture, sans compter les très nombreuses contributions aux conférences dans lesquelles les physiciens présentent les résultats du Très Grand Équipement. Il a en outre organisé à ce jour une douzaine de Conférences Internationales, 30 Ateliers nationaux et internationaux. Par ailleurs, 27 Prix scientifiques ont été décernés pour des travaux effectués au GANIL.

Sur le plan de la formation, le GANIL contribue largement à l'enseignement de la physique nucléaire avec une moyenne de 20 à 30 thésards et post-docs et quelque 60 stagiaires par an. À ce propos, la formation par la recherche s'exerce tant à l'extérieur du laboratoire par des enseignements spécialisés (école d'ingénieurs, université) qu'en son sein grâce à l'accueil permanent de stagiaires, doctorants et post-docs. Les travaux scientifiques élaborés au GANIL ont donné lieu depuis l'origine à 140 thèses de doctorat dans différents laboratoires français concernant les spécialités suivantes : physique nucléaire, physique des ions rapides, physique des accélérateurs, informatique... .

La recherche appliquée auprès du GANIL et son ouverture vers le monde industriel

Le GANIL offre toute une palette de faisceaux d'ions lourds dans une large gamme d'énergie intéressant directement la recherche appliquée. Ces faisceaux permettent en effet la simulation en laboratoire de l'endommagement des matériaux, que ce soit ceux concernant le cycle du combustible, des éléments de structure d'un réacteur jusqu'au stockage des déchets ou encore l'électronique spatiale.

Les domaines d'applications incluent de nombreuses thématiques qui interviennent dans d'importants défis posés à nos sociétés comme la gestion des déchets radioactifs, le vieillissement des centrales nucléaires, la tenue des composants électroniques aux rayonnements cosmiques ou encore la radiothérapie par particules lourdes.

Pour encourager la recherche appliquée et l'insérer dans le pôle aujourd'hui interrégional « Interactions Ions-Matière », le GANIL et le CIRIL ont créé le Groupe des Applications de la Recherche avec des Ions (GARI) qui a pour vocation première de favoriser le développement de la recherche appliquée auprès du GANIL. Dès le milieu des années 80, il a été cherché la meilleure manière de valoriser les atouts du Très Grand Équipement et la première voie choisie a été de tenter une ouverture vers le monde industriel.

Ces dernières années, le GANIL, en collaboration avec le CIRIL, a mis en place plusieurs équipements qui ont renforcé son importance pour ces recherches. Ce sont les lignes de basse énergie (LIMBE) pour la physique atomique, le laboratoire de radiobiologie et, dernièrement, IRRSUD (IRRadiation SUD qui doit entrer en fonctionnement fin 2002), nouvelle ligne utilisant les faisceaux de basse énergie du

GANIL dédiée aux applications industrielles. Il convient de noter que cet outil ouvre des perspectives pour la modification des surfaces ou encore la simulation et le vieillissement sous irradiation des matériaux utilisés dans l'industrie électro-nucléaire par exemple.

Le CESR se réjouit de ces développements prometteurs tant les trois équipements précités, actuellement uniques en France, jouent un rôle important dans la structuration et le dynamisme des communautés scientifiques concernées.

Trouver des applications industrielles directes d'un Très Grand Équipement dédié principalement à la recherche fondamentale est, par nature, complexe. La valorisation des savoir-faire et des moyens du GANIL a cependant donné lieu à des transferts de technologie par essaimage comme PANTECHNIK, société spécialisée dans la fabrication et la commercialisation de certains équipements et de sources d'ions. Par ailleurs, le GANIL loue du temps de faisceau à des industriels pour le test de matériaux divers, pour simuler, par exemple, le rayonnement cosmique auquel sont soumis les composants électroniques embarqués à bord des satellites artificiels et stations orbitales. Les clients sont de grandes firmes nationales ou internationales.

GANIL en Basse-Normandie : un exemple d'implantation réussie en région

Vingt ans après son entrée en exploitation, le GANIL est considéré aujourd'hui comme une implantation réussie d'un Très Grand Équipement en région et, à ce titre, il a valeur d'exemplarité au niveau national. Au départ, la construction à Caen du grand accélérateur constitua un véritable pari sur l'avenir qui relevait d'une volonté politique forte de doter la Basse-Normandie d'un outil de recherche structurant et répondant, par là même, à un enjeu de développement économique.

Depuis lors, le soutien de la Région à ce Très Grand Équipement n'a jamais failli et nombreux dans la communauté scientifique reconnaissent qu'il existe peu d'exemples similaires où un équipement de recherche fondamentale fait l'objet d'un intérêt régional aussi marqué.

La Région Basse-Normandie constitue en effet depuis l'origine un partenaire décisif pour le GANIL et, au fil du temps, elle a su attribuer des moyens importants pour soutenir son évolution en termes d'équipements. Tel fut encore le cas par exemple pour SPIRAL qui a nécessité un investissement d'un peu plus de 18 millions d'euros, cofinancé à parts égales par le CEA, le CNRS et le Conseil Régional pour un coût complet, incluant les salaires, de l'ordre de 36 millions d'euros.

Depuis lors, la Région poursuit son soutien pour ce qui concerne les investissements du laboratoire via notamment sa politique en faveur du pôle de recherche structurant "interaction ion-matière" réaffirmée à l'occasion du Plan d'Actions Régional 2000-2006 (et dont le IV^{ème} Contrat de Plan fait mention) qui se fixe d'ailleurs comme objectif de permettre à ce pôle d'atteindre une dimension européenne pluridisciplinaire forte.

- **GANIL : un acteur dans l'économie régionale**

Évaluer précisément les retombées directes et indirectes du GANIL en région n'est pas chose aisée et nécessiterait une étude approfondie à part entière. On peut signaler toutefois aujourd'hui que le GANIL fait appel à des prestataires de la région pour près de 45 % de ses commandes. Par ailleurs, en 2000, sur un total de dépenses totales estimées à 22,3 millions d'euros, les seuls salaires des personnels du GANIL étaient estimés à 14,2 millions d'euros⁶.

À ce jour, l'effectif permanent au GANIL est de 236 personnes dont 134 dépendant du CNRS, 101 relevant du CEA et une de l'université. Ajoutons-y un nombre important de physiciens extérieurs, la plupart du temps étrangers qui se font ensuite, ambassadeurs de la région. Rappelons également que le GANIL accueille chaque année en moyenne 20 à 30 thésards et post-docs.

- **GANIL : un catalyseur pour la recherche en Basse-Normandie**

C'est indiscutablement sur le plan de la recherche, au-delà même de son domaine de prédilection, que le GANIL a joué un rôle de catalyseur pour le développement de la région caennaise.

Le paysage scientifique de la Basse-Normandie s'est profondément transformé au cours des vingt dernières années, GANIL y a largement contribué en permettant la concrétisation en région d'un pôle d'excellence de recherche de niveau européen voire mondial.

Il a notamment contribué au développement scientifique et technologique du plateau nord de Caen qui regroupe :

→ au sein du campus Jules HOROWITZ auquel le GANIL appartient, CYCERON (Centre de Recherche de Tomographie par Émissions de Positons) dont il est à l'origine en raison des compétences croisées avec les ingénieurs des cyclotrons du grand accélérateur. Il a ensuite permis de développer une démarche scientifique interdisciplinaire entre différents organismes au-delà de la seule physique nucléaire et dont le CIRIL est la concrétisation. Cette collaboration a ainsi permis de développer de grandes compétences dans la conception des détecteurs de rayonnements, des systèmes d'acquisition de données et de leur traitement informatique, compétences qui permettent aujourd'hui au site scientifique et technologique caennais d'être reconnu sur le plan de l'imagerie. Ce domaine fait d'ailleurs l'objet, avec les Technologies de l'Information et de la Communication, d'un pôle scientifique et technologique inscrit au IV^{ème} Contrat de Plan État-Région. De tels développements technologiques de pointe ont (ou auront) indéniablement des retombées au niveau des applications en imagerie industrielle et médicale.

⁶ Source : Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques selon la Direction de la Recherche, Ministère de la Recherche.

→ sur le campus scientifique, l'ISMRA (Institut des Sciences de la Matière et du Rayonnement) qui a des relations privilégiées avec le grand accélérateur via, en particulier le CIRIL, le LERMAT (Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux) ou le LPC (Laboratoire de Physique Corpusculaire), ce dernier participant directement à la mise au point, à la réalisation et au dépouillement d'expériences menées au GANIL sur les propriétés macroscopiques de la matière nucléaire comme sur la structure du noyau.

Ce développement spectaculaire a, dans le même temps, favorisé l'émergence de la Technopole SYNERGIA, des parcs d'activités technologiques (Parc d'Activités Technologiques de la Folie-Couvrechef - ACTIS - à Caen et CITIS à Hérouville-Saint-Clair).

C'est grâce à cet élargissement des champs de compétences scientifiques qu'un pôle scientifique pluridisciplinaire « Interaction Ion-Matière autour du GANIL » a été mis en place, permettant d'accentuer les synergies entre les différents domaines de recherche et de mettre ainsi en valeur le rôle fédérateur du Très Grand Équipement.

En matière de transferts de technologie, le GANIL est partie prenante en Basse-Normandie à la fois du Réseau de Diffusion Technologique (RDT) et du réseau GRAVIR (Groupe Régional d'Action pour la Valorisation Industrielle de la Recherche). Depuis 2000, le GANIL est en outre avec l'Université de Caen Basse-Normandie, l'Institut des Sciences de la Matière et du Rayonnement (ISMRA) membre fondateur de l'association « Normandie Incubation » qui a pour but de détecter et d'accompagner les porteurs de projets innovants nécessitant un développement technologique à mener avec l'un des laboratoires membres de l'association.

Concernant les recherches appliquées, et plus particulièrement en matière de radiobiologie, il convient de reconnaître que les collaborations entre le GANIL et le milieu médical en Basse-Normandie sont, jusqu'à présent, demeurées en deçà des espérances malgré l'existence, localement, d'un pôle de compétences reconnues dans le domaine biomédical constitué de CYCERON, du CHU et du Centre de Lutte contre le Cancer François BACLESSE. L'ouverture depuis 1999 d'une structure d'accueil des biologistes près du GANIL complétée récemment par un laboratoire scientifique (qui a nécessité la construction d'un nouveau bâtiment largement soutenu par le Conseil Régional) ouvre de nouvelles perspectives. C'est pourquoi le CESR compte sur une véritable coopération entre le milieu médical et les équipes de GANIL, rappelant que la recherche contre le cancer constitue l'un des grands chantiers que s'est fixé le Président de la République, Jacques CHIRAC au cours de son quinquennat.

En résumé, la réalisation du GANIL a indiscutablement contribué à la notoriété du pôle scientifique caennais aux plans national et même international et, par conséquent, a donné à la Basse-Normandie une image très forte dans les domaines de la recherche et de la technologie. Les colloques et ateliers souvent organisés

dans le cadre de coopérations internationales autour du GANIL renforcent de surcroît cette reconnaissance⁷.

Les retombées indirectes sont, on le voit, notables pour la région mais passent le plus souvent inaperçues aujourd'hui tant certaines applications sont désormais inscrites dans la vie quotidienne. N'est-ce pas grâce au GANIL si, dès 1991, la Basse-Normandie a mis en œuvre le réseau régional à haut débit "VIKMAN", lui-même raccordé au Réseau National de la Technologie, de l'Enseignement et de la Recherche (RENATER) ? Pour preuve, GANIL héberge toujours aujourd'hui le nœud régional de VIKMAN, interconnectant le réseau régional à RENATER.

Concernant l'information, il faut rappeler la mission de vulgarisation scientifique du GANIL dont l'objectif est de faire partager avec le plus grand nombre les résultats des recherches qui sont menés en son sein.

• **GANIL : un outil de diffusion au service de la culture scientifique.**

Au-delà du rôle de GANIL en matière de formations supérieures -du fait des relations privilégiées avec l'ISMRA et l'Université-, le Très Grand Équipement est investi d'une mission de vulgarisation scientifique qui lui a d'ailleurs valu plusieurs prix et récompenses. Dans la perspective de faire partager avec le plus grand nombre les résultats de la recherche, il constitue un membre actif du réseau bas-normand CCSTI-Relais d'Sciences présidé d'ailleurs actuellement par Philippe CHOMAZ, physicien-théoricien au GANIL.

L'éventail d'actions menées dans ce cadre, le partenariat suivi avec les instances pédagogiques et sa forte implication dans les activités de culture scientifique, tant nationales que régionales, ont valu au GANIL de recevoir en 1997 le premier prix de culture scientifique décerné par le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement. À ce propos, les opérations portes ouvertes/Science en Fête ont accueilli entre 1983 et 2001, 21 600 personnes, les portes ouvertes dédiées aux lycéens ont impliqué au total sur la même période 125 établissements de l'Académie de Caen et 16 200 lycéens ainsi que les visites sur rendez-vous qui ont concerné 8 000 personnes.

Le GANIL mène également des actions spécifiques destinées au grand public, aux jeunes et aux enseignants à travers des ateliers scientifiques, des conférences dans les lycées, des concours, expositions.... Enfin, parmi les actions ponctuelles grand public interviennent notamment des expositions dont l'une, intitulée "Voyage au cœur de la matière" à l'Hôtel de Ville de Caen en 1998 avait rencontré un vif succès.

Le CESR encourage la poursuite et même l'intensification de ces actions d'information et de communication qui pourraient être itinérantes sur l'ensemble du territoire bas-normand. Ces initiatives permettent en effet, au-delà de leur rôle

⁷ Citons par exemple la tenue en septembre 2002 à Caen de la Conférence Internationale HCI-2002 (pour Highly Charged Ions) sur la Physique des ions multi-Chargés. Cette manifestation a fait office de forum international majeur dans le domaine puisqu'elle a réuni près de 300 physiciens provenant de 36 pays différents soit près du double de la précédente édition qui s'est tenue à Berkeley en 2000.

vulgarisateur, d'associer étroitement les bas-normands au développement du Très Grand Équipement. Il convient de rappeler à cet égard la forte mobilisation de la population bas-normande pour l'accueil en Basse-Normandie du Synchrotron SOLEIL avec l'envoi, en 2000, de 70 000 cartes postales-pétitions.

• GANIL : un vecteur d'image forte pour la capitale régionale et pour la recherche bas-normande.

Élément indiscutable du développement local, le GANIL a aussi contribué à faire de Caen un pôle de recherche aujourd'hui reconnu au-delà des frontières nationales, lui conférant par là même une image hautement valorisante.

Grâce aux recherches et découvertes du GANIL, le nom de Caen figure désormais dans des publications scientifiques spécialisées ou grand public à l'échelon international, ce qui contribue à la renommée de la capitale bas-normande. Pour le CESR, il conviendrait, localement, de davantage valoriser cet atout dans les messages de promotion de la capitale régionale délivrés vers l'extérieur.

Cette image actuelle de pôle de recherche dynamique et largement ouvert à l'international, la capitale régionale la doit beaucoup au Grand Accélérateur. Ce dernier a en effet permis de catalyser localement des équipements et des compétences allant au-delà de son propre domaine d'activités.

QUELS DÉVELOPPEMENTS À MOYEN ET LONG TERMES POUR LE GANIL ?
--

Au niveau scientifique, outre quelques évolutions toujours possibles à attendre dans les choix futurs de thématiques en matière de physique nucléaire, les experts français estiment aujourd'hui que l'étude du noyau et des interactions intégrant une composante « astrophysique » forte (genèse des éléments) va se développer à l'avenir et qu'ainsi, le GANIL peut jouer un rôle important dans ces axes de recherches.

À terme, le Très Grand Équipement peut permettre à la France de conserver la place qu'elle occupe aujourd'hui dans le domaine de la physique nucléaire, pourvu que l'on tire profit des développements à venir dans le domaine des accélérateurs de haute intensité qui conditionnent, pour le futur, le succès des installations de seconde génération.

Au-delà des coopérations existantes, il paraît clair que la compétition existe entre pays et risque de s'exacerber au niveau européen dans la mesure où le nombre des équipements va sans doute diminuer à terme. Autrement dit, pour le GANIL, l'avenir sera européen ou il ne sera pas.

Depuis longtemps déjà, l'ouverture européenne de GANIL, du fait de l'importance de la communauté des utilisateurs, est forte, structurée et s'affirme à travers notamment des soutiens financiers significatifs : des équipements expérimentaux d'envergure (EXOGAM, VAMOS et LISE 2000 développés pour SPIRAL) ont été construits grâce à un apport financier de laboratoires européens à hauteur de 40 %. Rappelons que GANIL est reconnu comme Grande Installation Européenne depuis 1995 et ce, dans le cadre du 5^{ème} Programme Cadre de la Recherche et Développement (PCRD) européen,

La dimension européenne de GANIL se trouve enfin renforcée aujourd'hui du fait du rôle du GANIL dans la coordination du programme **European Isotope Separation On-Line** (EURISOL). Ce programme rassemble de grands laboratoires européens de physique nucléaire qui étudient le projet d'une installation de seconde génération pour la production et l'accélération de faisceaux radioactifs à l'horizon 2010-2015.

Mais, pour le moyen terme (2007-2008), le développement envisagé est une extension de SPIRAL (phase intermédiaire appelée SPIRAL II) qui, pour se réaliser, nécessitera des collaborations européennes.

Une phase intermédiaire incontournable : le projet SPIRAL II

L'ensemble SPIRAL qui vient de démarrer au GANIL est une machine de première génération particulièrement bien adaptée à la production et à l'accélération de noyaux radioactifs légers et moyennement lourds (de l'hélium au krypton) à des énergies de 2 à 25 MeV par nucléon.

Dès l'origine du projet SPIRAL, une seconde phase avait été envisagée afin d'étendre la gamme des faisceaux produits vers les noyaux lourds.

La production de faisceaux d'isotopes rares, riches en neutrons de masses moyennes à lourdes permet d'aborder toute une gamme de problématiques particulièrement intéressantes, à condition que l'intensité des faisceaux produits soit suffisante. De tels isotopes peuvent être produits par un faisceau de deutons faisant fissionner une cible d'uranium. Le projet SPIRAL II se propose d'atteindre ainsi **a minima** 10^{13} fissions par seconde.

Diverses options ont été très minutieusement examinées tout d'abord dans le cadre d'une RTD (Research Technological Development) européenne (SPIRAL phase II) coordonnée par le GANIL et qui rassemblait un certain nombre de laboratoires français, finlandais ou belge.

Un groupe de travail mis en place en octobre 2000 a remis, fin 2001, un Avant Projet Sommaire de SPIRAL II.

Le principe de cet équipement consiste en un accélérateur dédié, LINAG qui produit un faisceau de deutons de très forte intensité et d'une énergie de 40 MeV qui va se fracasser sur une cible de carbone et produire un flux de neutrons lesquels, font fissionner une cible d'uranium. Les noyaux rares ainsi produits sont triés et

amenés, soit vers une salle de basse énergie, soit vers le cyclotron CIME déjà en fonctionnement dans le cadre de SPIRAL pour être post-accéléérés vers les salles d'expériences du GANIL. Dans une étape ultérieure il pourrait être envisagé d'injecter ces noyaux rares dans les cyclotrons existants (C0, CSS1 et CSS2) du GANIL pour les amener à des énergies plus élevées.

Notons que ce schéma permet d'envisager plusieurs faisceaux en parallèle. On peut, par exemple, offrir des faisceaux de produits de fission à basse énergie avec SPIRAL II pendant que GANIL et SPIRAL fournissent des faisceaux stables ou des faisceaux exotiques légers. Cet aspect « multi-faisceaux » est primordial et augmentera le temps de faisceau disponible.

L'accélérateur primaire permettant de former les faisceaux de deutons pourrait également fournir, par la simple adjonction d'une source d'ions différente - une des sources du GANIL actuel, dans un premier temps - des faisceaux stables d'ions lourds de très haute intensité. Des réactions de fusion-évaporation avec des sections efficaces très faibles pourraient être étudiées, comme la formation de noyaux super lourds ou de noyaux proches de la limite de stabilité.

Il convient en outre d'insister qu'avec SPIRAL II, les activités pluridisciplinaires du GANIL ainsi que l'utilisation des faisceaux d'ions pour des recherches appliquées seraient fortement renforcées. Ainsi, l'utilisation du flux important de neutrons créé auprès de la cible de production serait très intéressante dans de nombreux domaines.

Citons par exemple l'étude des matériaux proche du cœur des réacteurs nucléaires (combustible, matériaux de gainage et de structure, matrice de transmutation) qui subissent de fortes irradiations par des neutrons rapides. La mise en place d'un poste d'irradiation neutronique auprès de SPIRAL II permettrait d'améliorer sensiblement la qualité des recherches sur la stabilité des matériaux du nucléaire.

Autre exemple, les faisceaux d'ions lourds intenses constituent un outil idéal pour produire des plasmas denses, confinés dans un solide, et les étudier. Ils ont l'avantage de permettre d'étudier précisément la réponse hydrodynamique de la matière hautement excitée, les transitions de phase sous onde de choc qui sont des états extrêmes de la matière dans l'univers.

Un tel projet, en faisant appel à des techniques de pointe pour la plupart maîtrisées dans les laboratoires situés sur le territoire national, permettra en outre à la France de conserver son avance technologique dans les domaines des accélérateurs de haute intensité.

Ce projet devrait mobiliser dans l'ensemble des laboratoires de physique nucléaire français l'équivalent de 80 physiciens, ingénieurs et techniciens à plein temps pendant 4 à 5 ans. Le budget d'investissement nécessaire est de l'ordre de 40 millions d'euros étalés sur quatre ans et un budget consolidé d'environ 80 millions d'euros.

Concernant les étapes à venir, l'Avant-Projet Détaillé (APD) est maintenant engagé. Il convient de noter à ce propos que le projet de Budget du Conseil Régional

pour l'année 2003 a prévu une participation à cette phase décisive à hauteur de 1,1 million d'euros.

Dans ce cadre, le CESR apprécie particulièrement les efforts de collaboration européenne qui s'intensifient. Cette étape demandée par les tutelles (CEA et CNRS) au GANIL est d'autant plus nécessaire qu'il existe en Europe d'autres projets plus ou moins avancés.

L'étape suivante sera de faire approuver, si possible avant fin 2003 par les deux tutelles au plan national, le projet pour ensuite être présenté au Ministère de la Recherche.

Aussi, le CESR demande au Gouvernement, conformément aux déclarations du Ministre de la Recherche lors de l'inauguration de SPIRAL en février 2002, de confirmer l'inscription du projet SPIRAL II au prochain Comité Interministériel d'Aménagement et de Développement du Territoire (CIADT) qui, dans le respect d'engagements antérieurs⁸, doit arrêter des mesures concrètes en faveur de la Basse-Normandie, prenant en considération les incidences négatives engendrées par la disparition de l'entreprise Moulinex.

Il convient de rappeler la décision politique prise en 2000 par le précédent Gouvernement, et ce, à l'encontre de la nécessité de rééquilibrage de la recherche⁹ en France, d'installer le Synchrotron SOLEIL à Saclay au lieu de Caen malgré des engagements gouvernementaux antérieurs¹⁰.

L'avenir à long terme : EURISOL

Pour une échéance plus lointaine, des réflexions très poussées, à la fois aux niveaux mondial et européen, menées ces deux dernières années, ont montré tout l'intérêt de disposer d'accélérateurs de faisceaux radioactifs de seconde génération permettant de produire des faisceaux d'isotopes rares selon deux types de procédés complémentaires :

- la fragmentation à haute énergie,
- la méthode ISOL (Isotope On Line).

Dans le premier cas, un faisceau de noyaux stables lourds de haute énergie est fragmenté par choc sur une cible mince permettant de former toutes sortes de noyaux. L'avantage de la méthode est qu'elle permet d'étudier des noyaux de très courte durée de vie. L'inconvénient est que ceux-ci sont formés à haute énergie (1 GeV par nucléon), ce qui ne permet pas tous les types d'expériences nécessaires.

⁸ Cf. CIADT de Limoges du 9 juillet 2001

⁹ Malgré un effort de redéploiement de la recherche au profit de la province ces dernières décennies, il n'en demeure pas moins que l'Ile de France concentre, tous établissements et organismes confondus, encore plus de 30 % des chercheurs et même 43 % pour les seuls grands organismes, selon le Schéma de Services Collectifs de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche -automne 2000.

¹⁰ Lors du CIADT de janvier et février 1992, dans le cadre des dispositions à prendre suite à la fermeture d'Unimétal-Normandie.

Selon l'autre procédé, comme sur SPIRAL par exemple, un faisceau d'énergie intermédiaire produit des noyaux exotiques dans une cible épaisse. Ceux-ci sont ensuite ionisés et ré-accélérés par un autre accélérateur. L'inconvénient est qu'il faut un certain temps pour extraire les atomes de la cible de production et les ioniser. On n'aura donc pas accès aux particules de très courtes durées de vie. Par contre, la maîtrise de l'énergie finale du faisceau exotique est totale, ce qui autorise toute une palette d'expériences.

Les États-Unis ont pris l'option de bâtir un projet unique utilisant les deux méthodes. La communauté scientifique européenne a choisi pour sa part de développer deux machines complémentaires utilisant chacune l'une de ces deux méthodes.

Pour beaucoup d'experts, si le GSI en Allemagne est le candidat naturel à développer la machine de haute énergie, le GANIL serait un candidat de choix pour EURISOL, la machine basée sur la technique ISOL.

La méthode de fragmentation à haute énergie envisagée à GSI ne permettant d'explorer qu'une partie des expériences nécessaires et, suivant en cela les recommandations de NuPECC¹¹ et du Forum Megasciences de l'OCDE, la communauté européenne a entrepris l'étude d'une machine de seconde génération basée sur la méthode ISOL.

Cette étude est menée dans le cadre du RTD Européen EURISOL (2000-2003) coordonné par le GANIL et intégrant de grands laboratoires français, anglais, allemand, belge, italien, suisse et finlandais¹². Ce travail doit aboutir, mi 2003, à un rapport présentant un avant-projet sommaire et à la recommandation d'un certain nombre d'études techniques jusqu'en 2006, date à laquelle le choix d'un site devrait être effectué. La construction pourrait alors démarrer pour un fonctionnement à l'horizon 2010 - 2015.

EURISOL tel qu'envisagé aujourd'hui est constitué d'un « driver », d'un ensemble cible-source et d'un post-accélérateur permettant d'atteindre 100 MeV par nucléon. Pour ce qui est du « driver », l'option de référence est un accélérateur de protons de très haute intensité et d'une énergie de 1 à 2 GeV. L'option « driver électron » est également étudiée ainsi que la possibilité d'accélérer un certain nombre d'ions « lourds-légers » dans l'accélérateur de protons. La post-accélération quant à elle pourrait être confiée à un accélérateur linéaire supraconducteur du même type que celui envisagé comme « driver » pour SPIRAL II.

¹¹ Nuclear Physics European Collaboration Committee est un forum scientifique qui fixe les priorités dans le domaine de la physique nucléaire, mais n'a pas de pouvoir décisionnel ou financier.

¹² En l'occurrence : Chalmers University, Louvain, GSI, INFN, IPN Orsay, SPhN Saclay, ISOLDE-CERN, Jyväskylä, et le Rutherford Appleton Lab.

En résumé, bien que n'étant pas encore techniquement et budgétairement bouclé, on estime que le coût du projet EURISOL pourrait se situer entre 400 et 500 millions d'euros, ce qui témoigne de l'ampleur de ce projet que la France, seule, ne pourrait entreprendre et donc décider.

Le rôle qu'occupe le GANIL sur la scène internationale dans le domaine de la physique nucléaire est reconnu par la communauté scientifique. L'enjeu majeur pour le Très Grand Équipement à moyen terme est de conserver ce rang dans un contexte à la fois de collaborations et de compétitions fortes entre les installations de ce type.

À cet égard, devant le risque que représenterait une confrontation entre les très grands équipements européens, le CESR souhaite une étroite coopération entre ces grands laboratoires de physique nucléaire et ce, pour développer une véritable complémentarité dans les choix des investissements à venir.

Plus largement, il paraîtrait essentiel qu'une réflexion globale soit menée et aboutisse à un plan à long terme sur la physique nucléaire en Europe.

Le Projet SPIRAL II est la prochaine grande étape technique et scientifique à privilégier. Outre les avancées significatives attendues, la reconnaissance de GANIL permettra à la France de conserver le rang qui est le sien et de pouvoir se positionner en Europe pour l'accueil, à plus long terme, d'une machine de très haute intensité : le projet EURISOL.

L'Avenir Européen du GANIL

RAPPORT

présenté au Conseil Économique et Social Régional de Basse-Normandie

par Dominique GOUTTE

Décembre 2002

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	5
INTRODUCTION.....	7
PREMIÈRE PARTIE : LE GANIL EN 2002.....	9
I - LES MISSIONS SCIENTIFIQUES DU GANIL.....	9
II - LES DOMAINES D'ACTIVITÉS DU GANIL	11
A - LE GANIL : INSTRUMENT MAJEUR DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE.....	11
1°/ Plus loin dans la connaissance sur le noyau de l'atome.....	11
2°/ Les autres disciplines concernées	16
3°/ La "Moisson" Scientifique du Ganil	17
B - LA RECHERCHE APPLIQUÉE ET L'OUVERTURE VERS LE MONDE INDUSTRIEL	19
1°/ Principales applications	19
2°/ La Valorisation Industrielle - L'Essaimage.....	21
3°/ La création d'entreprises à forte composante technologique : Normandie Incubation..	22
III - DES MACHINES ET DES HOMMES.....	23
A - DES ÉQUIPEMENTS POUR "VOIR" L'INVISIBLE.....	23
B - LES MOYENS HUMAINS ET BUDGÉTAIRES.....	26
IV - POSITIONNEMENT DU GANIL AU NIVEAU NATIONAL ET EUROPÉEN DU POINT DE VUE SCIENTIFIQUE	28
A - LA PLACE DU GANIL EN FRANCE.....	28
1°/ Positionnement sur le plan expérimental.....	28
2°/ Former et Informer	30
B - LA PLACE DE GANIL EN EUROPE	32
V - LA COMMUNAUTÉ DES UTILISATEURS.....	33
DEUXIÈME PARTIE :	
LES DÉVELOPPEMENTS À MOYEN ET LONG TERMES.....	35
I - LE MOYEN TERME : L'EXTENSION SPIRAL II	35
A - DESCRIPTION DU PROJET	36
1°/ Choix du faisceau primaire	37
2°/ Le schéma général	39
3°/ L'accélérateur primaire (« driver »).....	39
4°/ La post-accélération.....	41
B - LES ASPECTS TECHNOLOGIQUES ET LES MOYENS NÉCESSAIRES.....	41
II - L'AVENIR À LONG TERME : EURISOL.....	42
A - LES CHOIX DE LA COMMUNAUTÉ DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE EN EUROPE ET DANS LE MONDE...	43
B - LA MACHINE DE FRAGMENTATION À HAUTE ÉNERGIE : LE PROJET DE GSI.....	44
C - LA MACHINE ISOL DE SECONDE GÉNÉRATION : EURISOL	45
D - SOLUTION ALTERNATIVE	46

AVANT-PROPOS

Pour la seconde fois, le CESR de Basse-Normandie est amené à réaliser, sur saisine du Président du Conseil Régional, une étude sur l'avenir du Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL).

En 1991, une étude sur "les développements scientifiques autour du GANIL" avait été rapportée par M. Claude DÉTRAZ, conseiller économique et social, anciennement directeur du GANIL. Elle avait permis à la fois de dresser un premier bilan sur l'apport du GANIL huit ans après son installation à Caen et d'aborder différents scénarios possibles de développement de ce très grand équipement.

Le rapport du CESR abordait en effet les projets à court terme inscrits au Contrat de Plan État-Région 1989-1993 et ceux, à plus longue échéance, dans la perspective d'une évolution du très grand équipement (phase appelée "GANIL 2").

L'étude de Claude DÉTRAZ évoquait même à l'époque la perspective d'accueillir sur Caen un nouveau grand équipement.

Après avoir connu de nombreuses évolutions depuis ses premières expériences en 1983 en termes d'équipement et de travaux scientifiques, le GANIL est aujourd'hui unanimement reconnu par la communauté scientifique internationale.

L'installation de SPIRAL (Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne) au sein du GANIL depuis septembre 2001 constitue une étape capitale et permet au très grand équipement d'être aujourd'hui le plus performant au monde dans son domaine.

Mais, pour assurer le bénéfice de cette avance technologique à moyen et long termes, de nouvelles évolutions apparaissent indispensables et vont nécessiter un soutien des autorités nationales et européennes. La concrétisation du projet SPIRAL 2 et le positionnement du GANIL pour l'accueil d'un très grand équipement de seconde génération de niveau européen dénommé EURISOL encore aujourd'hui au stade d'avant-projet s'inscrivent tout à fait dans cette perspective.

C'est la raison pour laquelle, dans un courrier en date du 18 décembre 2001, le Président du Conseil Régional a demandé au CESR d'établir un argumentaire justifiant la légitimité en France de la candidature du GANIL pour accueillir en son sein le futur grand projet européen et ceci, notamment dans la perspective de la tenue d'un prochain Comité Interministériel d'Aménagement et de Développement (CIADT) qui doit, conformément à des engagements antérieurs¹, arrêter des mesures en faveur de la Basse-Normandie afin de prendre en considération les incidences négatives engendrées par la disparition de l'entreprise Moulinex.

Pour mener à bien cette étude, M. Dominique GOUTTE, conseiller économique et social régional et actuel directeur du GANIL a été désigné rapporteur.

¹ Lors du CIADT de Limoges du 31 juillet 2001

INTRODUCTION

La France occupe une place de premier plan au niveau mondial dans le domaine de la physique nucléaire notamment grâce à l'utilisation des faisceaux d'isotopes rares radioactifs ou exotiques² que permet la nouvelle installation SPIRAL en fonctionnement au GANIL depuis septembre 2001, rang que ce Très Grand Équipement devrait pouvoir conserver à court terme. À plus long terme, le GANIL peut permettre à la France de conforter cette place pourvu que l'on tire profit des développements à venir dans le domaine des accélérateurs de haute intensité qui conditionnent le succès des installations de seconde génération³.

Dans ce cadre, des réflexions très poussées à la fois aux niveaux mondial et européen menées ces deux dernières années (cf. annexes 1 et 2) ont montré tout l'intérêt de disposer d'installations de ce type permettant de produire des faisceaux d'isotopes rares dans le domaine de la physique nucléaire et de ses applications.

Dans tous les cas, l'objectif, avec de telles installations est de réaliser un gain dans les intensités de faisceaux secondaires produites de 100 à 1000 par rapport aux installations actuelles afin de réaliser les objectifs de recherche suivants qui peuvent se résumer très brièvement à travers un certain nombre d'interrogations et de thématiques concernant l'origine de la liaison nucléaire, les limites de la stabilité nucléaire, le nombre de combinaisons de neutrons et de protons conduisant à des noyaux stables, les éléments liés les plus lourds (noyaux super-lourds), l'origine des éléments chimiques dans l'univers ou encore l'exploration en laboratoire des chemins de la nucléosynthèse.

Hors de l'Europe, une réflexion poussée a eu lieu aux États-Unis et au Japon a conduit à mettre en avant deux projets, Rare Isotope Accelerator (RIA) aux USA (projet considéré comme le projet prioritaire de la physique nucléaire pour les dix prochaines années par le Department Of Energie et la National Sciences Foundation) et un autre au Japon, à RIKEN dont la première phase de financement a été accordée.

En Europe, les deux principales installations produisant des faisceaux d'isotopes rares sont le GANIL en France et GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) en Allemagne.

Le GANIL pour sa part vient de mettre en service l'installation SPIRAL qui vise dans sa première phase à produire par la méthode dite ISOL et accélérer des faisceaux d'isotopes rares légers de masse inférieure à 90 (obtenus par cassure du

² Cf. encadré intitulé "Les noyaux exotiques".

³ Entre une installation de première génération (type SPIRAL 1) et une machine de seconde génération (type EURISOL), on prévoit une augmentation de l'ordre de 100 à 1000 de l'intensité des faisceaux radioactifs.

projectile) à des énergies de 1,7 à 25 MeV par nucléon. Cette phase a reçu le soutien important des laboratoires étrangers pour la construction de nouveaux équipements expérimentaux.

L'objectif de ce présent rapport est de mettre en évidence les atouts du GANIL et de décliner les perspectives de développement dans le contexte européen.

Pour cela, l'étude se décompose en deux parties : la première fait un point sur ce qu'est le GANIL aujourd'hui, ses forces et ses atouts dans un contexte de collaborations internationales et la seconde aborde les développements à moyen et long termes à travers les projets SPIRAL 2 et EURISOL.

PREMIÈRE PARTIE : LE GANIL EN 2002

Le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds est un équipement commun au CNRS et au CEA associés à parts égales dans un Groupement d'Intérêt Économique créé en 1976. Il est en exploitation depuis 1983 et est reconnu Grande Installation Européenne depuis 1995. Il emploie un peu plus de 200 physiciens, ingénieurs et techniciens.

Au cours de cette première partie, seront abordés successivement les missions scientifiques du GANIL, les différents domaines d'activités puis les équipements qui composent aujourd'hui cette grande installation.

I - LES MISSIONS SCIENTIFIQUES DU GANIL

La mission première du GANIL est d'offrir à la communauté scientifique les moyens de conduire des recherches fondamentales en physique nucléaire.

Les expériences qui y sont menées ont largement contribué à élargir notre connaissance des noyaux à travers l'étude de la thermodynamique de la matière qui les composent ; elles ont permis également de nombreuses avancées dans la compréhension de la structure du noyau atomique qui peut être considéré comme un laboratoire pour la mécanique quantique des objets complexes.

Des progrès considérables dans cette compréhension sont attendus avec SPIRAL, outil unique en Europe en physique nucléaire qui suscite un large engouement dans la communauté scientifique européenne. Il convient de préciser que le projet SPIRAL, dont la construction au GANIL a été recommandée par NuPECC (Nuclear Physics European Collaboration Committee, comité de l'ESF), a été piloté par un comité scientifique international présidé par le Professeur danois d'origine américaine, B. Mottelson, Prix Nobel de Physique en 1975.

La deuxième mission du GANIL est le développement d'interfaces d'applications des ions lourds à d'autres domaines de recherche fondamentale ou appliquée. Mis à part les implications directes des résultats de physique nucléaire en astrophysique nucléaire (nucléosynthèse) le GANIL, de par ses qualités de faisceaux et ses équipements est, comme nous le verrons plus avant dans le document, un outil remarquable pour la physique atomique, la physique de la matière condensée, la chimie sous rayonnement et la radiobiologie.

Pour mener ces études pluridisciplinaires, le CIRIL (Centre Interdisciplinaire de Recherche Ions-Lasers⁴), laboratoire commun CEA-CNRS-Université a été créé en 1982.

Les domaines d'application incluent de nombreuses thématiques comme par exemple l'étude des radiations qui interviennent dans d'importants défis posés à notre société : la gestion des déchets radioactifs, le vieillissement des centrales nucléaires, la tenue des composants électroniques aux rayonnements cosmiques ou encore la radiothérapie par particules lourde.

L'élargissement des champs de compétences scientifiques du GANIL a en outre conduit l'Institut Supérieur de la Matière et du Rayonnement (ISMRA), le CIRIL et le GANIL à proposer la constitution à Caen d'un pôle scientifique pluridisciplinaire « Interaction Ion-Matière autour du GANIL » afin d'accentuer les synergies entre les différents domaines de recherche et de mettre ainsi en valeur le rôle fédérateur du GANIL.

De plus, une PME, Pantchnik, a été créée et valorise aujourd'hui les développements technologiques effectués au sein du laboratoire.

En résumé, le GANIL est reconnu comme un centre de recherche d'excellence au niveau mondial. Telle est d'ailleurs la conclusion de l'audit réalisé en 1997 par un panel international de physiciens de renom, présidé par le Professeur R.Siemssen de l'Université de Groningen, éditeur en chef de Physics Letters qui insiste sur le fait que *"GANIL est un laboratoire de tout premier ordre à tous points de vue, à la pointe de la recherche.... Il a joué depuis le début un rôle moteur avec de nombreux résultats majeurs dans ses champs scientifiques de compétence. Avec SPIRAL, ce sera pour de nombreuses années une installation unique au monde"*.

L'ouverture européenne, du fait de l'importance de la communauté des utilisateurs (cf. V "la communauté des utilisateurs") est forte, structurée et s'affirme à travers des soutiens financiers significatifs. Le GANIL est reconnu comme Grande Installation Européenne dans le cadre du 5^{ème} Programme Cadre de la Recherche et Développement (PCRD) au niveau européen, des équipements expérimentaux d'envergure (EXOAM, VAMOS et LISE 2000) pour le projet SPIRAL ont été construits avec un apport des pays européens (Allemagne, Danemark, Finlande, France, Grande-Bretagne, Hongrie et Suède) de l'ordre de 40 %.

Notons également que le Comité de sélection des expériences du GANIL est international et présidé par W. Gelletly, Professeur à l'Université de Surrey (GB). Quant au Conseil Scientifique du GANIL qui examine les orientations à moyen et long termes du laboratoire, il est présidé par K. H. Schmidt, physicien du GSI en Allemagne.

Par ailleurs, un programme européen de R&D financé dans le cadre du 5^{ème} PCRD a permis d'aboutir au projet SPIRAL II avec des universités belges, finlandaises et hollandaises.

⁴ Initialement Centre Interdisciplinaire de Recherche sur les Ions Lourds.

La dimension européenne du GANIL se trouve enfin renforcée aujourd'hui du fait de son rôle dans la coordination du programme European Isotope Separation On-Line (EURISOL). Ce programme rassemble de grands laboratoires européens de physique nucléaire qui étudient le projet d'une installation de seconde génération pour la production et l'accélération de faisceaux radioactifs à l'horizon 2010-2015 sur lequel nous reviendrons abondamment dans la deuxième partie du présent document.

II - LES DOMAINES D'ACTIVITÉS DU GANIL

A - LE GANIL : INSTRUMENT MAJEUR DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE

1°/ PLUS LOIN DANS LA CONNAISSANCE SUR LE NOYAU DE L'ATOME

La compréhension de la structure des noyaux atomiques et des propriétés de la matière nucléaire nécessite l'exploration d'états extrêmes des noyaux. Ces états jouent un rôle essentiel dans le Cosmos et constituent des tests sévères de notre description de la matière. Le GANIL est l'un des pôles de recherche mondiaux où ces travaux sont réalisés.

1.1 - Noyaux exotiques et Structure Nucléaire

Le GANIL est un laboratoire reconnu pour la recherche fondamentale sur la nature du monde subatomique.

Les travaux qui y sont menés portent en particulier sur la limite de cohésion des noyaux. La structure des noyaux dits "exotiques"⁵ remet en cause les modèles nucléaires standards, comme le modèle des couches. Quelle est cette structure et quels en sont les constituants essentiels et leur interaction dans les noyaux ? Voilà des questions fondamentales auxquelles l'étude des réactions avec des noyaux exotiques apportera des réponses.

Citons par exemple les noyaux à halos qui constituent un des sujets phare du GANIL. Leur étude a révélé des structures quantiques analogues aux atomes de Rydberg, car ils sont formés d'un nuage de nucléons en orbite autour d'un noyau-cœur dense. Systèmes complexes à plusieurs composantes, certains comme le Lithium 11 tirent leur cohésion d'un phénomène quantique nouveau dans les noyaux, lié à l'interaction des 3 corps qui le constituent. Ces systèmes sont des bancs d'essais incomparables pour la description des noyaux dans des conditions jusque là inaccessibles. Des dimères⁶ nucléaires formés de deux noyaux à halos d'Hélium 6,

⁵ 90% des noyaux qui peuplent l'univers ont une durée de vie courte et ne peuvent survivre sur terre.

⁶ Dimère : Se dit d'une molécule constituée à partir de deux molécules monomères.

liés par leur nuage de neutrons, ont été observés récemment. C'est une manifestation spectaculaire de l'existence des molécules nucléaires.

Loin d'être des singularités, ces états mettant en jeu aussi bien des clusters⁷ que des nuages de nucléons, semblent être des structures nucléaires très répandues en particulier près des limites de stabilité. Toutes ces observations ont conduit les théoriciens à profondément modifier notre description des noyaux.

Dans ces zones fortement exotiques, la possibilité d'une disparition des nombres magiques a aussi été mise en évidence. Cette modification de la cohésion des noyaux correspond à un profond changement de leur structure d'équilibre. Ainsi, par exemple comme le GANIL l'a démontré, pour le nombre magique de 20 neutrons, l'oxygène 28 n'existe pas, et les noyaux proches du magnésium 32 sont anormalement déformés. L'origine de ces phénomènes pourrait être directement liée aux propriétés élémentaires des couplages entre les nucléons par les vecteurs de l'interaction forte. Une description relativiste des noyaux prenant en compte ces propriétés est aujourd'hui en plein développement.

La connaissance des noyaux exotiques joue un rôle essentiel dans la compréhension du Cosmos. Les processus de nucléosynthèse sont directement liés aux propriétés des noyaux mis en jeu. L'observation de l'instabilité de certains noyaux riches en protons a, par exemple, obligé les théoriciens à reconsidérer les scénarii de capture rapide de protons.

Les nouveaux faisceaux de noyaux exotiques maintenant produits par SPIRAL, alliés aux équipements existants ou en construction, font du GANIL un outil unique en Europe pour explorer la structure de la matière dans des états extrêmes d'isospin⁸.

De plus, le GANIL a développé en son sein un groupe théorique qui a pris une place prépondérante dans le paysage fondamental français. De par ses liens avec le monde universitaire et académique, il ouvre de nombreux réseaux.

⁷ Cluster : agrégation d'un petit nombre de nucléons qui forment une entité au sein du noyau.

⁸ Isospin : contraction de "spin isotopique" ; nombre quantique qui caractérise le nombre de protons et de neutrons dans un noyau.

Les noyaux « exotiques »

Le noyau de l'atome est formé de nucléons c'est-à-dire de protons et de neutrons. C'est le nombre de protons qui détermine le nom d'un élément donné tout simplement parce que, dans l'atome correspondant qui doit être neutre électriquement, le nombre d'électrons qui orbitent autour du noyau est égal au nombre de protons. Les propriétés chimiques d'un corps étant déterminées par ce nombre d'électrons, il est logique d'avoir donné aux éléments un nom qui corresponde à un nombre d'électrons - et donc de protons - donné. Pour un nombre de protons donné, plusieurs noyaux peuvent exister avec des nombres de neutrons différents. C'est ce que l'on nomme des isotopes. La figure ci-dessous présente les noyaux de l'atome en fonction du nombre de protons et de neutrons qui les composent. Chaque carré noir représente un noyau stable c'est à dire un noyau dont la durée de vie est suffisamment longue pour qu'on le rencontre aujourd'hui sur terre. Il y a moins de 300 de ces noyaux de l'hydrogène (un proton) le plus léger d'entre eux à l'uranium (92 protons) le plus lourd. Ils se distribuent le long d'une ligne que l'on nomme «vallée de stabilité».

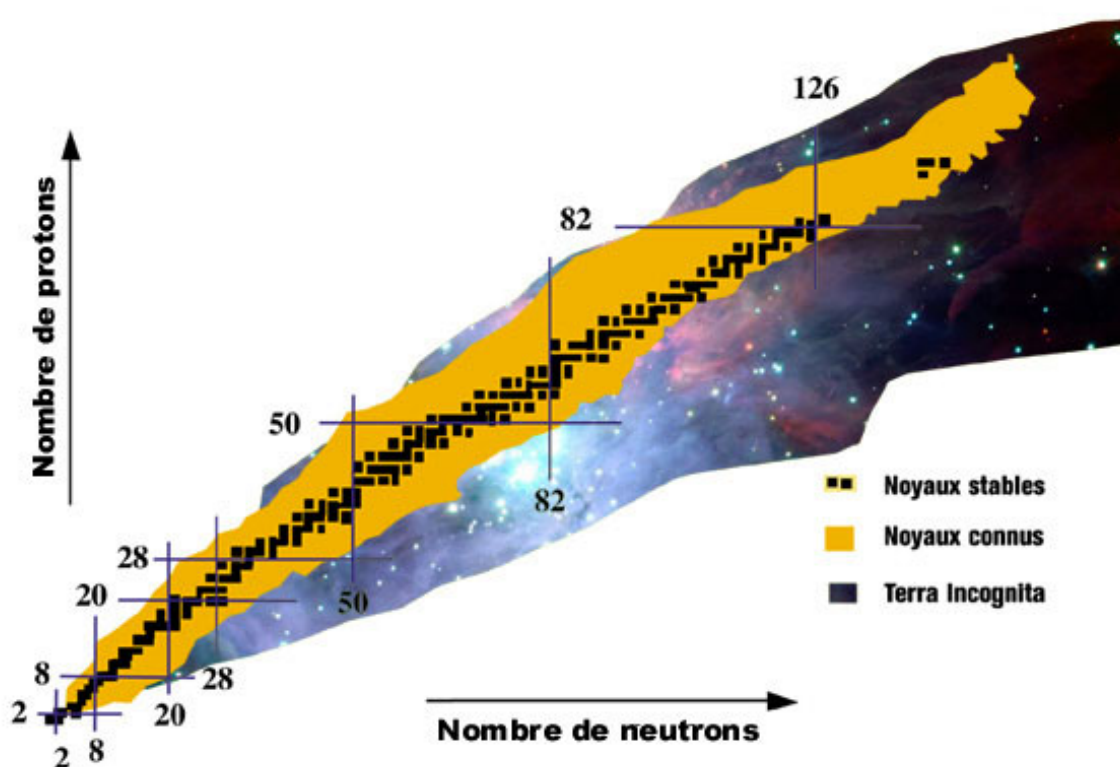


Figure n° 1 : la vallée de stabilité et "la terra incognita"

Source : GANIL

Sur ce graphique sont également figurées des lignes pour des nombres de protons ou de neutrons précis (2, 8, 20, 28, ...). Ce sont les nombres magiques. Quand un noyau est constitué d'un nombre magique de nucléons, il présente une stabilité beaucoup plus grande que les autres noyaux. Nous verrons que c'est une propriété qui ne se vérifie pas forcément au-delà des noyaux stables. Sur cette carte des noyaux on voit apparaître une zone beaucoup plus vaste - figurée ici en vert - que cette vallée de stabilité : il s'agit des quelque 5000 à 7000 noyaux - dits « exotiques » - en opposition aux 300 noyaux stables - qui devraient pouvoir exister si l'on en croit les calculs théoriques. Cette incertitude sur leur nombre, 5000 à 7000, montre déjà toute notre ignorance. Cette vaste zone dont on ne connaît encore pas grand chose est appelée « terra incognita ».

La zone plus réduite – ici en jaune – correspond aux noyaux exotiques que l'on a déjà su synthétiser en laboratoire - au GANIL en particulier – et sur lesquels on a déjà quelques informations.

Les propriétés d'un noyau, sa taille, sa forme, la distribution des nucléons qui le composent, ses modes de décroissance, ... sont autant de quantités que l'on peut prédire par le calcul mais qui parfois se trouvent contredites par l'expérience.

On a, par exemple, découvert ces dernières années des noyaux à halo c'est à dire des édifices dans lesquels la distribution des nucléons n'est pas homogène du tout mais, bien au contraire, ou un cœur dur est entouré de quelques nucléons orbitant à très grande distance. On observe ainsi un noyau de Li 11 (11 nucléons) dont la taille est celle d'un plomb 208 (208 nucléons) ! De tels noyaux à « halo » n'étaient en rien prédits par le calcul. Des surprises de ce type, ont été rencontrées déjà un certain nombre de fois dans ce début d'exploration des noyaux exotiques et l'on peut gager que l'avenir nous en réserve bien d'autres.

Étudier ces noyaux exotiques c'est donc une nécessité absolue pour comprendre le noyau et l'interaction forte qui lie les nucléons qui le constituent.

Mais au-delà de ces préoccupations de physique nucléaire fondamentale, la connaissance des noyaux exotiques est indispensable pour notre compréhension de l'histoire de l'Univers.

La synthèse des différents éléments qui constituent aujourd'hui notre Univers ne s'est en effet pas faite depuis le « big-bang⁹ », des éléments les plus légers, par agrégation successive de nucléons le long de la vallée de stabilité pour synthétiser vers les noyaux les plus lourds. Cette synthèse des éléments s'est au contraire faite essentiellement par des chemins explorant très largement cette carte autant du côté des isotopes riches en neutrons que ceux riches en protons.

Les chemins de cette nucléosynthèse dépendent bien sûr fortement des propriétés des étapes successives et donc des noyaux exotiques qu'elle va emprunter (d'où le fond étoilé utilisé pour figurer la zone inconnue des noyaux exotiques).

Donc, pour être capable de retracer cette histoire de l'Univers, et comprendre l'abondance des éléments telle que l'on peut l'observer aujourd'hui, il est indispensable de connaître les propriétés des différents noyaux qui jalonnent cette synthèse.

1.2 - Dynamique et Thermodynamique des Réactions

Les réactions entre ions lourds aux énergies "GANIL"¹⁰ sont un outil unique pour chauffer, comprimer et faire subir de multiples contraintes aux noyaux afin d'étudier leurs propriétés thermodynamiques.

Pour la première fois des noyaux portés à plus de 100 milliards de degrés ont été observés montrant que le noyau peut supporter des excitations extrêmes allant au-delà des limites prédites de cohésion. Le GANIL a ainsi permis de mettre en évidence la naissance d'un mécanisme nouveau, l'explosion du système en une

⁹ Théorie du "big-bang" : théorie selon laquelle tout l'univers serait issu d'une gigantesque explosion qui aurait eu lieu il y a environ 15 milliards d'années. Le big-bang n'a généré que les noyaux les plus légers (en synthétisant les protons).

¹⁰ Plus l'énergie des particules d'un faisceau est grande, plus les détails auxquels elles sont sensibles sont petits. En allant des énergies les plus élevées au plus faibles, on "voit" tout d'abord les quarks, les nucléons, les noyaux et enfin l'atome ou tout du moins la partie purement électrique du noyau. C'est ce principe qui détermine la "bonne énergie" pour former puis étudier les noyaux chauds : entre 50 et 100 MeV par nucléon : précisément le domaine du GANIL.

multitude de fragments pouvant conduire jusqu'à la vaporisation totale du noyau en ses constituants élémentaires.

Les avancées expérimentales et théoriques dans notre compréhension des systèmes nucléaires fortement perturbés ont ouvert de nouvelles voies de recherche. À très haute énergie d'excitation, les évolutions rapides du système nous imposent de déterminer la dynamique de la réaction et de tester l'existence d'équilibres thermiques et chimiques. Ces études sont essentielles pour valider toute conclusion sur l'équation d'état de la matière nucléaire et pour ainsi déterminer son diagramme de phase. De nouveaux outils permettant de mesurer l'équation d'état ont été proposés récemment par le groupe théorique du GANIL. Les faisceaux de noyaux exotiques du GANIL permettront une première exploration, en termes de mélange de protons et de neutrons, de la matière chaude et dense.

Dans les conditions normales, un noyau est assimilable à un liquide alors qu'à très haute température et pression il a le comportement d'un gaz. La signature d'une transition entre ces deux états, une transition de phase, est recherchée depuis de nombreuses années. L'observation de telles transitions présente un intérêt théorique qui va bien au-delà de la physique nucléaire puisqu'elles n'ont encore jamais été observées dans un système fini (petit nombre de constituants) comme le noyau. De nouvelles signatures des transitions de phase dans de tels systèmes ont été proposées par le groupe théorique du GANIL. Appliquées aux données expérimentales elles ont permis l'observation de chaleur massique négative. Ce serait une mise en évidence directe d'une transition de phase dans un système fini. La Physique nucléaire est la première discipline à rapporter une telle observation.

De nombreux outils théoriques ont été développés pour non seulement décrire les propriétés des transitions de phases dans les petits systèmes et en extraire les comportements critiques mais aussi pour maîtriser la dynamique de l'excitation et de la désexcitation de ces systèmes en rapide évolution. La synergie entre expérience et théorie a permis d'importants progrès dans la capacité de description des réactions nucléaires violentes comme la spallation¹¹ et la fragmentation.

L'intérêt de ces études est incontestable pour comprendre et mesurer les propriétés de la matière à très haute température et densité et donc pour mettre à l'épreuve notre description du noyau mais il est également indéniable pour la cosmologie puisqu'on a ainsi accès à un état de la matière qui doit exister dans le cœur des supernovae et des étoiles à neutrons¹².

¹¹ La spallation est une réaction nucléaire mettant en jeu un noyau cible et une particule, le plus souvent un proton, accélérée jusqu'à une énergie de quelques centaines de mégaélectronvolts (MeV) à quelques gigaélectronvolts (GeV). À ces énergies, la particule incidente "voit" les nucléons du noyau (protons et neutrons) et les heurte individuellement, alors qu'à plus basse énergie, elle ne serait sensible qu'au noyau dans son ensemble, et qu'à plus haute énergie, elle verrait les constituants des nucléons, les quarks.

¹² Après avoir épuisé leur combustible, les étoiles géantes voire supergéantes (de 6 à 8 fois plus massives que le soleil selon les astrophysiciens) terminent leur existence en explosant : on donne à ce phénomène le nom de **supernova**. Lors d'un tel cataclysme cosmique, l'intérieur de l'étoile en fin de vie atteint des températures extrêmes de l'ordre du milliard de degrés. À de telles températures, la composition chimique de la matière se trouve transformée. Au centre de ce qui reste de la supernova va subsister un corps stellaire extrêmement dense appelé "**étoile à neutrons**".

2°/ LES AUTRES DISCIPLINES CONCERNÉES

Dès l'origine, l'utilisation des faisceaux du GANIL par d'autres disciplines a été envisagée. Cela s'est traduit, notamment, par la création du CIRIL, laboratoire commun CEA-CNRS-Université.

La recherche fondamentale faite autour du CIRIL et avec les faisceaux du GANIL va de l'étude des collisions ion – atome et ion – molécule aux recherches sur la stabilité des matériaux sous excitation électronique intense.

Les études sur **la collision ion - atome** portent sur la dynamique de la collision, le transfert d'énergie, l'échange de charge, l'excitation électronique et l'ionisation.

Les études sur **la collision ion - molécule** donnent accès à la dynamique de la fragmentation des molécules après une ionisation multiple et excitation.

À travers **l'Interaction ion - matériau** les différentes phases de l'interaction sont étudiées, à savoir :

- les transferts d'énergie entre le projectile et la cible et la relaxation de cette énergie dans la cible,
- les mécanismes de mise en mouvement des atomes de la cible,
- la réponse du matériau à cette excitation intense et les transformations structurales induites. Les matériaux concernés sont extrêmement divers : métaux, oxydes, polymères, eau et matériaux du vivant.

Les Polymères constituent un domaine d'application avec l'étude de l'effet de la densité d'ionisation sur l'endommagement des matériaux organiques.

La compréhension des phénomènes liés aux fortes densités d'ionisations dans les polymères permet de répondre à un certain nombre de demandes émanant des différents partenaires du réseau COMOR¹³ (COMportement des Matériaux ORganiques sous rayonnements ionisants) auquel appartient le CIRIL qui portent sur la différence dans l'endommagement, le vieillissement des câbles électriques des centrales, des tubes de transfert de la poudre MOX ou encore du porogène dans la fabrication du MOX¹⁴... Ces travaux ont été menés au CIRIL dans le cadre d'une thèse. Notons qu'actuellement, le CIRIL mène, pour le compte de la COGÉMA, une série de travaux sur l'émission de gaz dans les fûts de déchets radioactifs contenant des polymères.

¹³ Réseau monté par le CEA il y a 5-6 ans pour établir des liens entre recherche appliquée et recherche fondamentale.

¹⁴ Contrairement au combustible nucléaire de base fabriqué uniquement avec de l'uranium, le combustible MOX (pour Mélange d'Oxydes d'uranium et de plutonium) contient une faible proportion de plutonium mélangé avec de l'uranium. La proportion de plutonium varie selon le type de combustible : elle est généralement comprise entre 3 et 10 % (source COGEMA).

Concernant **la Chimie sous rayonnement**, il s'agit d'étudier l'effet de la densité d'ionisation sur la radiolyse de l'eau. Des expériences ont par exemple été réalisées pour simuler la production de d'hydrogène par des neutrons rapides dans l'eau de refroidissement d'ITER¹⁵.

Enfin, **la Radiobiologie** est un domaine d'application prometteur et porte sur l'effet des forts pouvoirs d'arrêt au niveau cellulaire et moléculaire.

Les ions lourds induisent des dommages graves ; pour ce type d'irradiation, les mécanismes biologiques de réparation sont beaucoup moins efficaces. L'étude des conséquences radiobiologiques des ions lourds au GANIL concerne essentiellement les cassures de l'ADN et la survie cellulaire. Des irradiations d'animaux (radiothérapie par ions lourds) et de plantes sont également réalisées.

Cette activité va fortement se renforcer après la création d'un laboratoire d'accueil de radiobiologie dont le bâtiment, au sein du GANIL, a été achevé au printemps 2002 et qui sera mis en service dans le courant de l'année.

3°/ LA "MOISSON" SCIENTIFIQUE DU GANIL

Début 2002, la production scientifique du GANIL depuis sa création s'élève à 140 thèses françaises et à 1400 publications dans des revues scientifiques à comité de lecture. Ne sont pas prises en compte dans ce chiffre les très nombreuses contributions aux conférences dans lesquelles les physiciens présentent les résultats du GANIL. Par ailleurs, le GANIL édite en outre une revue destinée à l'ensemble de la communauté internationale intitulée "Les Nouvelles du GANIL" et, tous les deux ans, une compilation des principaux résultats obtenus dans le laboratoire.

En outre, le Très Grand Équipement a organisé à ce jour 12 Conférences Internationales et 30 Ateliers nationaux et internationaux et 27 Prix scientifiques ont été décernés pour des travaux effectués au GANIL.

On relèvera ici qu'un rapport de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques paru en 2000 sur "les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron et le rôle des TGE dans la recherche publique ou privée en France et en Europe" a mis en évidence les atouts du GANIL et les avancées en matière de recherche sur les noyaux exotiques, les noyaux à halos de neutrons et sur la connaissance de la genèse des éléments dans l'univers (cf. annexe n°3).

¹⁵ ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est un projet international faisant appel à de nombreuses collaborations dans la communauté scientifique mondiale visant à mettre au point un réacteur à fusion expérimental.

QUELQUES DÉCOUVERTES SCIENTIFIQUES RÉCENTES AU GANIL

● Une première mondiale : la découverte du nickel 48 au GANIL - (1999)

Au cours d'une expérience qui a duré une dizaine de jours au GANIL, une équipe internationale de physiciens a mis en évidence, en septembre 1999, l'existence d'un nouveau noyau atomique : le nickel 48. Deux noyaux de nickel 48 ont en effet pu être produits et identifiés sans ambiguïté parmi les milliards de milliards de noyaux issus des collisions produites au sein de l'accélérateur.

Considéré vraisemblablement comme le dernier des noyaux doublement magiques* qui restait à observer, le nickel-48 était recherché depuis une dizaine d'années pour ses caractéristiques rares, d'où son caractère précieux dans la compréhension du monde subatomique.

* doublement magique : Le nombre de protons est doublement magique (cf. définition dans l'encadré sur les noyaux exotiques) et le nombre de neutrons l'est également mais ils peuvent être différents : exemple du plomb 208 qui a 126 neutrons et 82 protons.

● Première expérience effectuée avec le faisceau de noyaux exotiques de SPIRAL : la nucléosynthèse étudiée dans un miroir - (2001)

Le 27 septembre 2001 le premier faisceau produit par SPIRAL était composé d'un isotope n'existant pas sur terre : le néon 18 et entrainé en collision avec une cible d'hydrogène solide. Le dispositif expérimental était prêt pour observer ces collisions d'un genre nouveau. Moins d'une semaine plus tard, le pari était gagné : le sodium 19, "noyau miroir"*** de l'oxygène 19, a dévoilé sa structure. Ces états et leurs homologues doivent permettre aux chercheurs une meilleure compréhension de la nucléosynthèse : les réactions thermonucléaires qui créent les éléments dans l'univers.

** le "noyau miroir" d'un noyau est celui qui lui correspond quand on change les neutrons en protons et vice versa.

● La mise en évidence du "quadrineutron" - (2002)

Une analyse minutieuse des données recueillies au GANIL avec le multidétecteur franco-britannique Charissa et le détecteur de neutrons franco-belge Demon a livré de fortes indications révélant l'existence d'un noyau atomique lié constitué de quatre neutrons. Si elle était confirmée, cette découverte aurait d'importantes implications en physique nucléaire en remettant notamment en cause les modèles actuels de l'interaction nucléon-nucléon.

● La mise en évidence de la radioactivité "deux protons" dans le fer 45 - (2002)

Suite aux expériences menées au GANIL et au GSI en Allemagne, une équipe internationale de physiciens a démontré début 2002 qu'un noyau très excédentaire en protons peut se désintégrer par émission de deux protons ayant une durée de vie très longue, et par conséquent, directement mesurable. Activement recherché par la communauté des physiciens nucléaires depuis 40 ans, cette découverte devrait permettre d'ouvrir une nouvelle voie à l'observation des forces régnant à l'intérieur d'un noyau atomique.

B - LA RECHERCHE APPLIQUÉE ET L'OUVERTURE VERS LE MONDE INDUSTRIEL

1°/ PRINCIPALES APPLICATIONS

Pour encourager la recherche appliquée et l'insérer dans le pôle « Interactions Ions Lourds Matière » le GANIL et le CIRIL ont créé le « Groupe des Applications de la Recherche avec des Ions » (GARI) qui a pour mission première de favoriser le développement de la recherche appliquée auprès du GANIL.

La déclinaison des effets des ions lourds dans la matière permet d'introduire les thèmes qui sont développés. Quand un ion lourd traverse la matière, trois mécanismes principaux peuvent avoir lieu indépendamment ou simultanément :

- l'excitation des électrons du matériau,
- le transfert direct d'énergie cinétique aux atomes du matériau irradié,
- l'implantation d'atomes étrangers (stables ou radioactifs) à l'intérieur du matériau.

Le GANIL offre de nombreuses possibilités de simulation en laboratoire de l'endommagement des matériaux que ce soit ceux concernant le cycle du combustible, des éléments de structure d'un réacteur jusqu'au stockage des déchets, ou l'électronique spatiale.

Concernant l'endommagement sous irradiation des matériaux utilisés dans l'ensemble du cycle du combustible, les simulations représentent un avantage en raison à la fois de leur faible coût par rapport à des irradiations en réacteur et à la faible radioactivité des échantillons irradiés.

L'intérêt des ions du GANIL est de deux ordres : un endommagement extrêmement rapide par rapport à celui créé dans les réacteurs nucléaires (20 ans de vie d'une cuve en 2 jours d'irradiation) et une activation des matériaux négligeable.

Le vieillissement des matériaux utilisés dans les réacteurs ou dans le cycle du combustible est un des domaines pour lequel les ions accélérés peuvent contribuer à la compréhension des phénomènes mis en jeu. Des irradiations ont déjà été réalisées dans le cadre de l'endommagement neutronique des aciers de cuve et de structure et de la corrosion sous irradiation des gaines de combustible. L'étude de la dégradation des polymères, dans le cycle du combustible ou en situation accidentelle dans les réacteurs, est un sujet pour lequel les ions apporteront une contribution significative.

Le stockage des déchets radioactifs et l'incinération des actinides¹⁶ sont également deux domaines extrêmement ouverts tant au CEA qu'au CNRS et font d'ailleurs l'objet de deux Groupements de Recherche PRACTIS et NOMADE. Nombre de ces études pourraient être réalisées avec les ions délivrés par les cyclotrons injecteurs CØ, qui s'avèrent particulièrement bien adaptés pour reproduire les dommages dus aux particules alpha et aux fragments de fission (cf. encadré ci-dessous). Pour ce qui est de la tenue des matrices d'incinération des actinides ou de stockage, des expériences ont déjà été réalisées et se poursuivent. Elles ont ainsi permis de tester la tenue sous irradiation de nombreux matériaux potentiellement utilisables comme matrice d'incinération ou de stockage. Un pré-choix parmi ces matériaux est ainsi possible. Par ailleurs, pour quelques-uns de ces matériaux, des études plus approfondies sont entreprises afin d'élaborer une modélisation du comportement des céramiques sous irradiation par des fragments de fission.

Il faut souligner également que l'implantation de noyaux radioactifs permet d'étudier, de façon simple, la diffusion d'impuretés dans les matrices de stockage de déchets radioactifs.

Un nouvel outil au service de la recherche appliquée : IRRSUD

Grâce à ses injecteurs, le GANIL a la possibilité d'accélérer des ions lourds (du carbone à l'uranium) dans la gamme 0,5-1 MeV par nucléon. C'est à dire des ions représentatifs des particules d'irradiation du cycle du combustible (α de quelques MeV et fragments de fission de plusieurs dizaines de MeV) pour simuler des combinaisons d'effet de collisions nucléaires et électroniques. Ainsi, a-t-on doté les cyclotrons injecteurs d'une nouvelle ligne appelée IRRSUD qui permet d'utiliser l'un des injecteurs pendant que l'autre alimente le GANIL. Cette ligne est équipée d'un dispositif d'irradiation. Le besoin de faisceau dans ce domaine a clairement été montré par le dépôt de plusieurs propositions d'expériences par les partenaires du nucléaire.



¹⁶ À côté des produits de fission, d'autres éléments contribuent à la radioactivité du cœur des centrales nucléaires : ce sont les « actinides ». Ces noyaux plus lourds que l'uranium, sont générés par des captures de neutrons qui n'ont pas été suivies des fissions. Les actinides tirent leur nom de l'actinium (Z=89), un métal lourd qui précède de peu l'uranium dans la table de Mendeleïev car ils possèdent des propriétés chimiques voisines. L'uranium, qui existe à l'état naturel, est aussi un actinide.

Depuis l'obtention des premiers faisceaux, au milieu des années 80, il a été cherché la meilleure manière de valoriser les atouts du GANIL et la première voie choisie a été de tenter une ouverture vers le monde industriel. Cela a conduit à la création du Service des Applications Industrielles des Faisceaux (SAIF) vers la fin des années 80. Les grandes lignes des activités de ce service ont fait l'objet d'une étude de marché et de stratégie au début des années 90 et les résultats de cette enquête ont servi de trame pour les objectifs de ce service. Le GANIL discute par exemple, en ce moment même, d'un contrat avec la NASA (National Aeronautics and Space Administration) pour la qualification de composants électroniques durcis aux rayonnements et destinés à l'espace¹⁷. Ce service devrait poursuivre ce type d'activités dans les prochaines années. Cependant, afin d'aller au-delà d'une simple prestation de service, il est nécessaire de renforcer la recherche en physique appliquée en s'appuyant sur les compétences locales en matière d'interaction ion - matière.

2°/ LA VALORISATION INDUSTRIELLE - L'ESSAIMAGE

Trouver des applications industrielles directes d'un Très Grand Équipement dédié principalement à la recherche fondamentale est, par nature, complexe mais il faut savoir que la valorisation des savoir-faire et des moyens du GANIL a cependant donné lieu à des transferts de technologie par essaimage.

Dans le domaine de valorisation des ressources technologiques du GANIL, il faut citer les développements réalisés dans les sources d'ions à résonance électronique cyclotronique, dites sources ECR de l'acronyme anglais « Electronic Cyclotron Resonance ». Ceux-ci ont conduit au dépôt de trois brevets. Un de ces brevets a fait l'objet d'un contrat de licence avec la société PANTECHNIK.

Le marché des sources est soutenu depuis plusieurs années et semble pouvoir être étendu, par cette société, au domaine des implanteurs ioniques utilisés dans l'industrie électronique.

Au cours des quinze dernières années, quatre entreprises ont été créées autour des activités du GANIL.

La première société, BIOPORE, a produit des membranes microporeuses tirant profit de la modification des matériaux plastiques lors de bombardement ionique. Malgré la bonne qualité des produits manufacturés, cette société n'a pu survivre localement, principalement à cause de difficultés de rentabilité et de l'âpreté d'un marché qui exige des compétences périphériques.

Les deux autres sociétés ont été quant à elles créées à partir de la valorisation des techniques d'accompagnement que les ingénieurs et techniciens ont dû développer pour concevoir et réaliser ce complexe d'accélérateurs, comme les

¹⁷ L'interaction d'ions lourds énergétiques permet de simuler partiellement le rayonnement cosmique auquel sont soumis les composants électroniques embarqués à bord de satellites. L'ensemble des expériences menées au GANIL a montré que, pour des composants de petite taille (de l'ordre du μm) fortement intégrés, un unique impact peut engendrer des perturbations de plusieurs composants simultanément.

techniques du vide, la technologie des sources d'ions pour PANTECHNIK, l'électronique d'instrumentation pour GAN'ELEC.

Après cinq années d'existence, GAN'ELEC a dû cesser ses activités après l'effondrement de son marché et une partie de ses activités a été reprise par PANTECHNIK.

Autre société, X-IONS, utilisait un procédé de marquage sur semi-conducteurs par interaction d'un faisceau d'ions lourds multichargés de très basse énergie. En cours de liquidation judiciaire, cette société pourrait renaître sous un autre nom.

PANTECHNIK, société anonyme appartenant à 98% à Eurisys Mesures, est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation de certains équipements et de sources d'ions. Par ailleurs, le GANIL loue du temps de faisceau à des industriels pour le test de matériaux divers, pour simuler, par exemple, le rayonnement cosmique auquel sont soumis les composants électroniques embarqués à bord des satellites artificiels et stations orbitales. Les clients sont de grandes firmes nationales ou internationales car il n'existe pas, en Basse-Normandie, d'entreprises susceptibles d'avoir recours à un équipement de pointe aussi puissant et performant que le GANIL.

3°/ LA CRÉATION D'ENTREPRISES À FORTE COMPOSANTE TECHNOLOGIQUE : NORMANDIE INCUBATION

L'association « Normandie Incubation » a été créée le 26 juillet 2000 par l'Université de Caen Basse-Normandie, l'Institut des Sciences de la Matière et du Rayonnement (ISMRA) et le GANIL. En mars 2000, ces établissements fondateurs ont répondu à un appel d'offre du Ministère de la Recherche « incubation et capital d'amorçage des entreprises technologiques » et obtenu son agrément déclenchant ainsi le soutien financier de l'État pendant trois ans.

Normandie Incubation est une structure régionale qui a pour but de :

- promouvoir et développer les actions de sensibilisation et de formation des étudiants et des chercheurs à la création d'entreprises technologiques,
- développer et accompagner, au sein d'une structure commune, la création d'entreprises technologiques, par une assistance technologique assurée par des laboratoires d'accueil,
- transformer le potentiel technologique d'un projet en valeur économique, en apportant au projet, directement ou indirectement, un appui technique, managérial, financier et tout soutien nécessaire à sa maturation,

À ce jour, huit projets ont été sélectionnés par l'incubateur sur dix expertisés. Cinq autres projets sont en phase de pré-incubation et seront prochainement soumis au Comité de sélection. Ces projets concernent aussi bien les sciences de la vie que les sciences de l'ingénieur ou les technologies de l'information et de la communication.

Ces projets mobilisent douze laboratoires de recherche qui participent à leurs développements technologiques¹⁸. Précisons que six projets ont déjà conduit à la création d'une entreprise dont une a quitté le dispositif d'incubation.

L'accompagnement des projets entraîne systématiquement des collaborations étroites avec les dispositifs régionaux d'aide à la création d'entreprise et avec divers partenaires socio-économiques régionaux dont les modalités se font au cas par cas. Plusieurs conventions ont déjà été signées avec différents organismes : le réseau de développement technologique régional (RDT-BN), la couveuse d'entreprise ou encore la délégation régionale d'EDF.

Normandie Incubation s'appuie systématiquement sur les pôles et les plateformes technologiques régionales afin d'y développer la fonction "incubation d'entreprises technologiques" en leur sein.

Plus largement, en matière de transferts de technologie, il faut noter que le GANIL est partie prenante en Basse-Normandie à la fois du Réseau de Diffusion Technologique (RDT) et du réseau GRAVIR (Groupe Régional d'Action pour la Valorisation Industrielle de la Recherche).

III - DES MACHINES ET DES HOMMES

A - DES ÉQUIPEMENTS POUR "VOIR" L'INVISIBLE

Pour étudier le noyau de l'atome, il faut le perturber ou même le "casser" en le bombardant d'autres noyaux lancés à très grande vitesse. Ce sont les effets de ces collisions qui sont analysés au GANIL. Les chercheurs disposent pour cela de détecteurs équipés d'une électronique complexe leur permettant de mesurer les fragments et les rayonnements issus des impacts entre noyaux. Les informations recueillies sont traduites en données numériques, lesquelles seront ultérieurement analysées par les chercheurs.

Dans des tubes et des enceintes où règne un vide très poussé, le faisceau d'ions est accéléré et dirigé par un habile croisement de champs électriques et de champs magnétiques. L'ensemble accélérateur du GANIL est ainsi constitué de plusieurs cyclotrons dont les aimants maintiennent les ions sur des trajectoires circulaires. Par une multitude de petites accélérations électriques, les ions finissent par atteindre la moitié de la vitesse de la lumière¹⁹ avant de percuter les noyaux "cibles" immobiles dans les salles d'expériences.

Le succès du GANIL tient, non seulement à la qualité des faisceaux qu'il délivre mais également, à la richesse des équipements expérimentaux qu'il met à la disposition de la communauté scientifique. Pour preuve de cette reconnaissance, le

¹⁸ Ce début d'activité de l'incubateur correspond au prévisionnel de l'activité de l'incubateur, soit l'accueil de 18 projets sur les trois premières années de fonctionnement (6 nouveaux projets par an).

¹⁹ Un observateur fixe placé à n'importe quel endroit du GANIL verrait en une seule seconde défilier 13 millions de "paquets d'ions". Quant au temps nécessaire pour qu'un ion partant de la source d'ions arrive dans la salle d'expérience, il est inférieur à 0,1 millième de seconde.

GANIL enregistre aujourd'hui six fois plus de demandes d'expériences du monde entier que de temps de faisceau disponible pour les accueillir ! Victimes du succès du GANIL, certains laboratoires se voient obligés de patienter parfois plusieurs années avant d'y mener une expérience.

Pour mesurer les propriétés des noyaux, pour sonder ces objets infiniment petits (de l'ordre de 10^{-14} mètre) il faut mettre en œuvre toute une installation lourde. De manière très schématique, comme cela est figuré ici, on peut fabriquer une **cible** composée des noyaux que l'on veut étudier et "l'éclairer" avec un **faisceau** de particules issus d'un **accélérateur**.

Un **détecteur**, ou la plupart du temps un ensemble complexe de **détecteurs**, permet de caractériser les produits de la réaction du **faisceau** avec la **cible** et d'en déduire ainsi les propriétés du noyau à étudier. Ce principe n'est bien sûr applicable que si le noyau à étudier est stable.

Pour l'étude des noyaux exotiques qui ont une durée de vie trop courte pour envisager d'en faire une **cible**, on procède de manière inverse : on utilise une **cible** de nature connue et c'est le **faisceau** qui est constitué des noyaux intéressants.

C'est pour cette raison qu'il faut développer des **accélérateurs** de noyaux exotiques comme **SPIRAL** pour explorer notre fameuse "terra incognita".

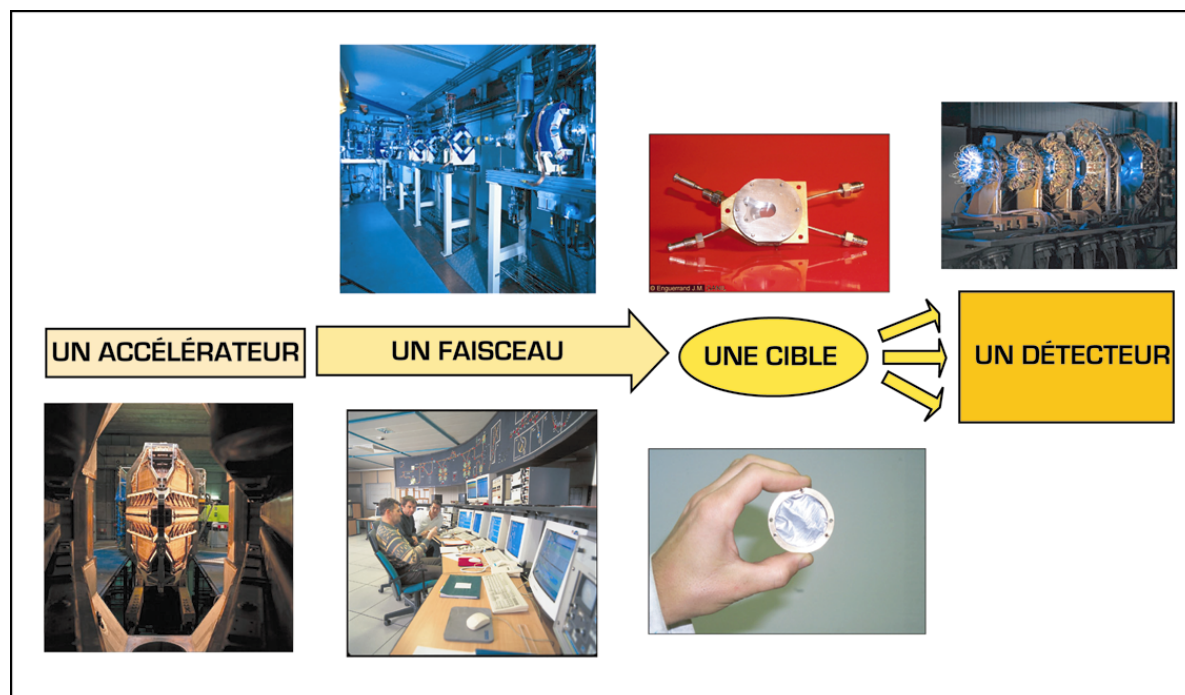


figure n° 2 : Principe d'une expérience de physique nucléaire

Source : GANIL

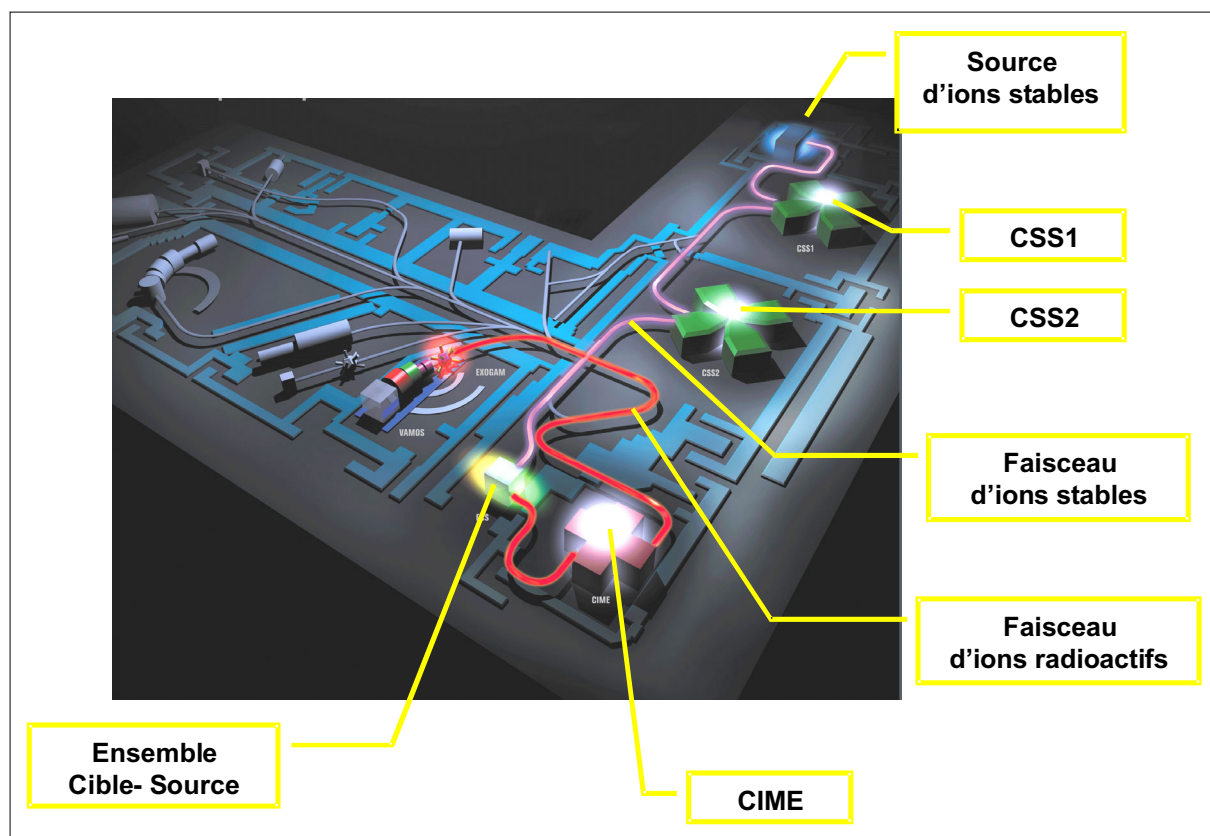
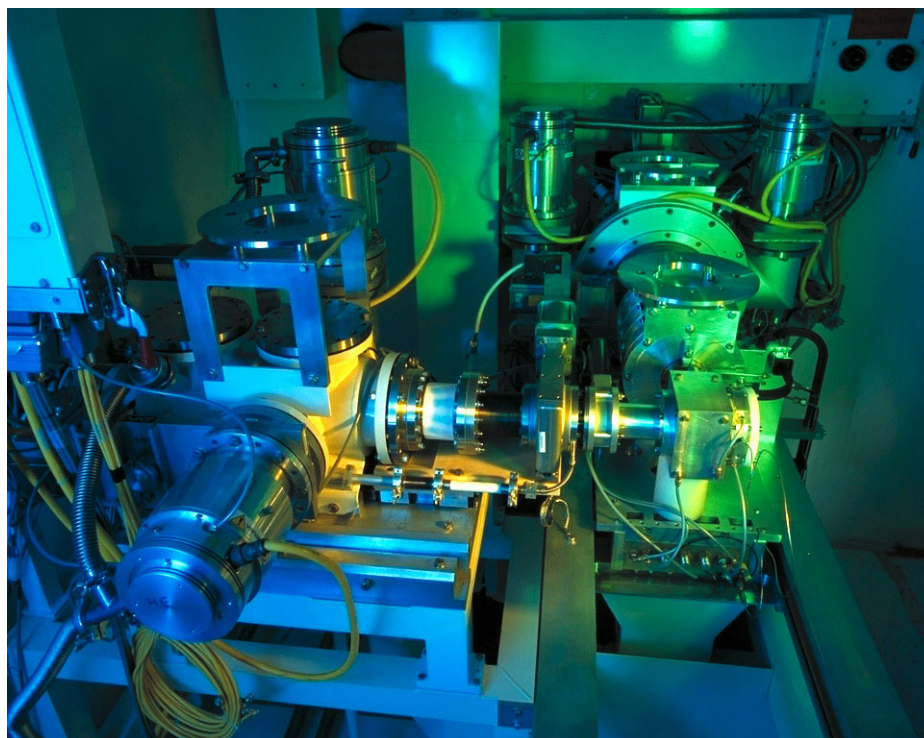


Figure n°3 : Vue générale des accélérateurs et des équipements expérimentaux du GANIL et principe de fonctionnement de SPIRAL

Document GANIL



Ensemble Cible Source de SPIRAL

Cliché : GANIL

L'annexe n°4 décrit un peu plus en détail l'ensemble des accélérateurs et équipements expérimentaux du GANIL présentés sur la figure n°3 mais il paraît toutefois opportun d'insister une nouvelle fois sur SPIRAL, dernière installation entrée en fonctionnement en septembre 2001.

Le schéma de la figure 3 montre comment, avec ce nouvel équipement, les ions stables sont produits par l'une des sources GANIL puis accélérés par les deux cyclotrons CSS1 et CSS2 mais au lieu d'être dirigé vers les aires expérimentales, ce faisceau d'ions stables est envoyé vers une cible de carbone (ensemble cible-source) où il vient se fracasser. Parmi la multitude de noyaux produits, un certain nombre de noyaux radioactifs sont intéressants à étudier. Ces noyaux radioactifs sont ionisés dans une source puis dirigés vers le nouveau cyclotron CIME (Cyclotron d'Ions Moyenne Énergie) qui les accélère à l'énergie souhaitée. Le faisceau est ensuite dirigé vers l'une des salles pour réaliser l'expérience prévue.

B - LES MOYENS HUMAINS ET BUDGÉTAIRES

À la fin 2001, l'effectif permanent au GANIL était de 236 personnes dont 135,5 postes dépendant du CNRS, 99,5 agents relevant du CEA et un poste de l'université, auxquels il convient d'ajouter un nombre important (non répertorié dans les tableaux ci-dessous) de physiciens extérieurs la plupart du temps étrangers. Le reste des effectifs était composé d'étudiants, thésards, contrats à durée déterminée et contrats en alternance. Signalons en outre pour mémoire la présence de 62 stagiaires dont 49 universitaires.

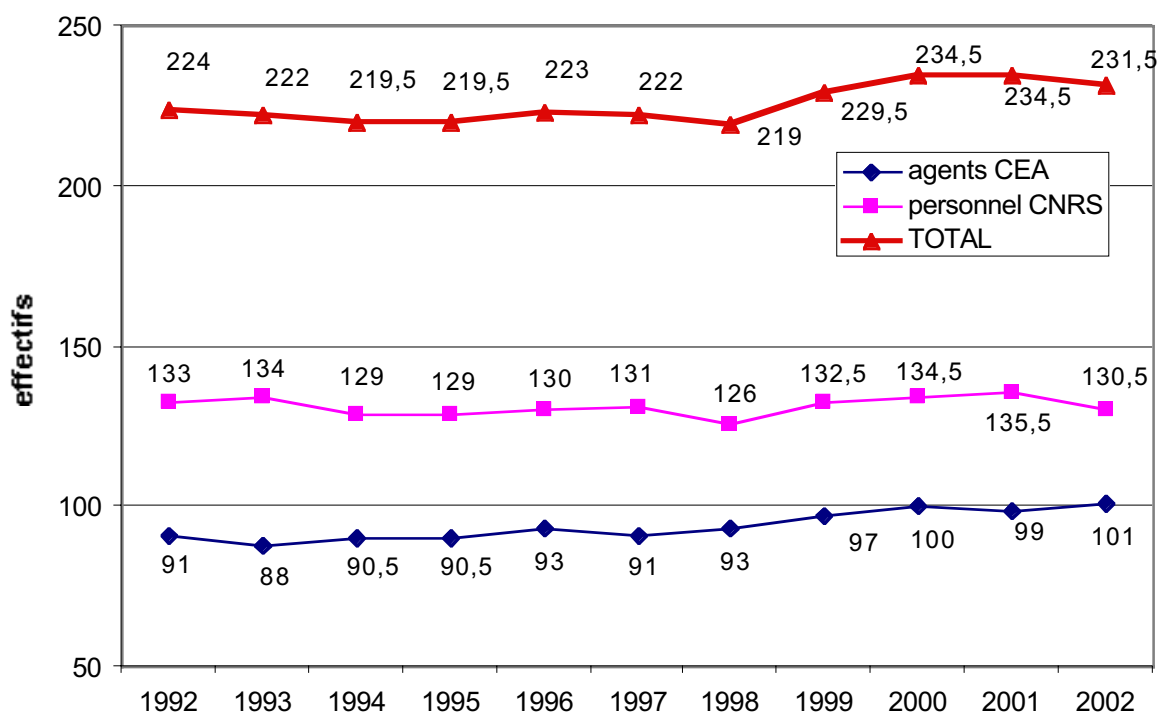
	CNRS			Univ.	CEA	CEA autres	Total
	ITA ²⁰	TPN ²¹	Cherch.				
Cherch. Phys			12	1	10		23
Ing. & Cadres	39,5	9			35		83,5
Tech. & Emp.	73	2			54		129
Médecin						0,5	0,5
Total	112,5	11	12	1	99	0,5	236

Tableau n° 1 : Effectifs agents permanents au 31/12/2001

Source : GANIL

²⁰ ITA : Ingénieurs, Techniciens et Administratifs.

²¹ TPN : Corps d'ingénieurs particulier créé pour la physique nucléaire.



Graphique n° 1 : Évolution des effectifs du GANIL par organisme et par statut

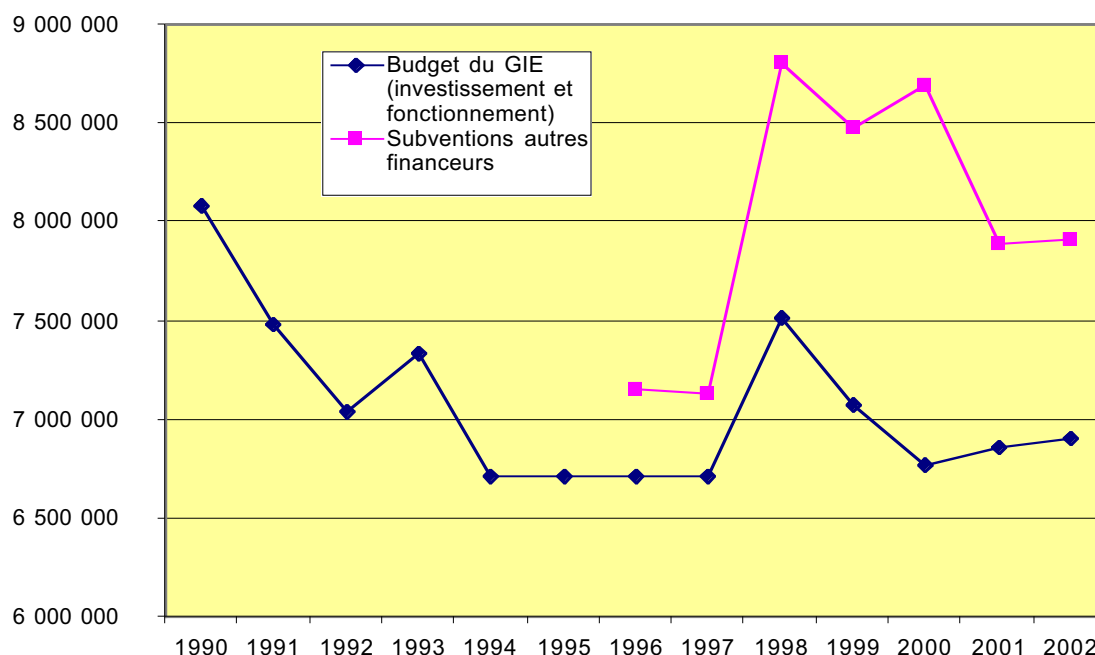
Source : GANIL

Concernant les postes permanents, il faut préciser que le Groupement d'Intérêts Économiques (GIE) pour sa part ne gère pas de personnel ; celui-ci est en fait mis à disposition par les deux tutelles CEA et CNRS. À ce propos, il convient d'insister sur les efforts fournis depuis l'origine par les tutelles qui ont permis de doter le GANIL d'un effectif constamment croissant.

S'agissant du budget du GANIL, on constatera globalement une baisse notable de la dotation des membres du GIE au cours de la dernière décennie reflétant les difficultés de la physique "lourde" en France. Il est par contre à noter que cette baisse est compensée par la part croissante de la région et de l'Europe dans le budget de l'installation (cf. graphique n°2).

En 2000, les dépenses totales relatives au GANIL (personnel compris) s'élevaient à 22,26 millions d'euros selon le ministère de la recherche.

en euros courants



Graphique n° 2 : Évolution du budget du GIE (investissement et fonctionnement) et des autres financeurs²²

Source : GANIL

IV - POSITIONNEMENT DU GANIL AU NIVEAU NATIONAL ET EUROPÉEN DU POINT DE VUE SCIENTIFIQUE

A - LA PLACE DU GANIL EN FRANCE

1°/ POSITIONNEMENT SUR LE PLAN EXPÉRIMENTAL

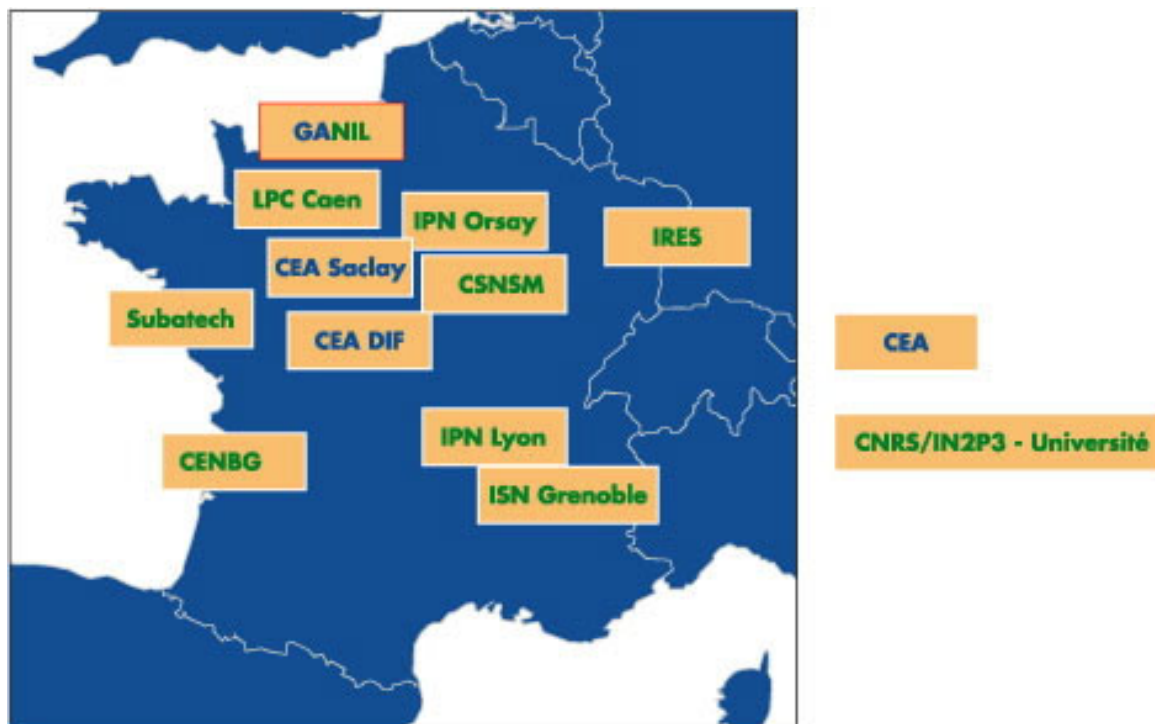
En France, les travaux de recherche fondamentale en physique nucléaire sont menés dans différents laboratoires de l'Université, du CNRS ou du CEA. La carte ci-dessous situe les principaux d'entre eux.

Il faut savoir que les campagnes expérimentales se déroulent auprès d'installations françaises, européennes, voire américaines ou japonaises.

Pour ce qui est des installations françaises, à côté de quelques machines de taille plus modeste (Bordeaux, Orsay, Bruyères-le-Châtel), deux installations importantes sont labellisées « grande installation européenne ». Il s'agit du GANIL et du Vivitron à l'Institut de Recherches Subatomiques (IRES) de Strasbourg. Accélérateur électrostatique Van de Graaff de type tandem, ce dernier étant amené à

²² Pour le Conseil Régional, il s'agit du budget accordé dans l'année considérée et pour les subventions accordées dans le cadre de contrats Union Européenne, il s'agit du montant reçu dans l'année considérée.

cesser ses activités en 2003, GANIL restera dès lors la seule installation de physique nucléaire de dimension internationale sur le territoire français. Signalons que l'activité du CERN, organisme international situé à la frontière franco-suisse, est essentiellement centré sur la physique des particules à haute énergie.

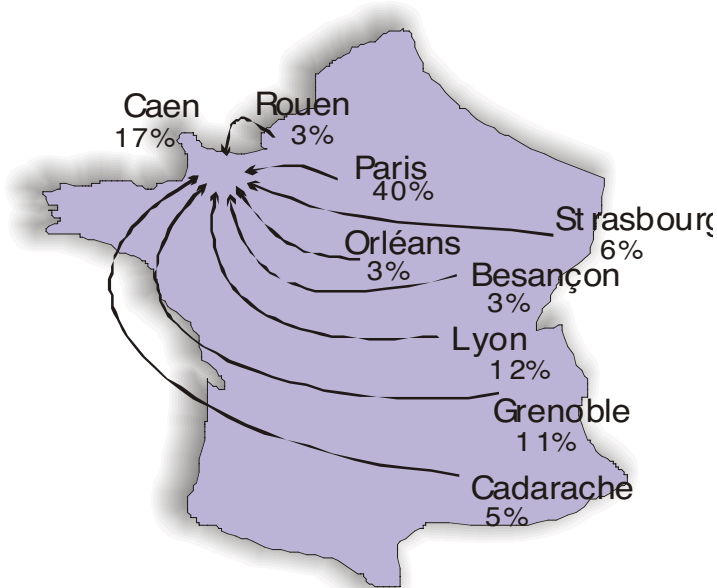


Carte n° 1 : Les laboratoires de physique nucléaire en France

De même, en physique des « ions rapides » (physique atomique, physique du solide,...) après la fermeture de l'AIM à Grenoble en 2001, le GANIL constitue le principal instrument de cette communauté.

En ce qui concerne les recherches interdisciplinaires²³, le GANIL est devenu avec l'ensemble de ses faisceaux un lieu unique où toute la gamme d'ions et d'énergie est accessible à cette communauté scientifique. En effet, ces dernières années, le GANIL, en collaboration avec le CIRIL, a mis en place plusieurs équipements qui ont renforcé son importance pour ces recherches. Ce sont les lignes de basse énergie (LIMBE) pour la physique atomique, le laboratoire de radiobiologie et la ligne IRRSUD pour les recherches sur les matériaux du nucléaire. Ces trois équipements qui sont actuellement uniques en France, jouent un rôle important dans la structuration et le dynamisme des communautés concernées

²³ Les recherches interdisciplinaires portent sur 10 % du temps du faisceau principal et +25 % en parasite du faisceau principal (grâce à IRRSUD) et en proportions variables, 1500 heures par an.



Carte n° 2 : Provenance des chercheurs des laboratoires français accueillis pour les recherches interdisciplinaires au GANIL.

Actuellement le GANIL, toutes activités confondues, sert une communauté forte de 700 utilisateurs environ, dont 60% de français issus d'une cinquantaine de laboratoires.

Ce nombre d'utilisateurs est essentiellement limité par la quantité de faisceau que le GANIL peut délivrer chaque année. La demande exprimée au Comité d'Expériences chargé de la sélection scientifique des projets est de cinq à six fois supérieure aux possibilités.

Il est à noter que l'un des axes majeurs de développement du laboratoire est la mise en place de plusieurs faisceaux en parallèle afin d'être à même de satisfaire une plus large communauté d'utilisateurs.

Le GANIL offre à ces équipes les faisceaux d'ions lourds bien sûr, mais également des équipements expérimentaux d'analyse et de détection de tout premier plan ainsi que le support technique indispensable (mécaniciens, électroniciens, informaticiens, spécialistes du vide et de la cryogénie, ...) à l'installation, à la mise au point et au bon déroulement des expériences.

Le GANIL fournit également l'intendance nécessaire au bon déroulement des campagnes expérimentales (Service d'accueil, Bibliothèque, Maison d'Hôtes, Restaurant, ...).

2°/ FORMER ET INFORMER

En dehors de cet aspect de recherche fondamentale, le GANIL joue, au plan national comme au plan régional, un rôle déterminant dans la formation des scientifiques comme dans l'information du grand public.

Sur le plan de la formation, le GANIL contribue largement à l'enseignement de la physique nucléaire avec, selon les années, une moyenne de 20 à 30 Thésards et Post-Docs et quelque 60 stagiaires par an.

À ce propos, la formation par la recherche s'exerce tant à l'extérieur du laboratoire par des enseignements spécialisés (école d'ingénieurs, université) qu'en son sein grâce à l'accueil permanent de stagiaires, doctorants et Post-Docs. Les travaux scientifiques élaborés au GANIL ont donné, rappelons-le, lieu à 140 thèses de l'enseignement supérieur dans différents laboratoires français dans les spécialités suivantes : physique nucléaire, physique des ions rapides, physique des accélérateurs, informatique.

Sur un plan régional, il faut noter l'étroite collaboration qui a pu se développer avec l'ISMRA (Institut des Sciences de la Matière et du Rayonnement) qui a des relations privilégiées avec le grand accélérateur via, en particulier le CIRIL, le LERMAT (Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux) ou le LPC (Laboratoire de Physique Corpusculaire), ce dernier participant directement à la mise au point, à la réalisation et au dépouillement d'expériences menées au GANIL sur les propriétés macroscopiques de la matière nucléaire comme sur la structure du noyau.

Cette collaboration a ainsi permis de développer de grandes compétences dans la conception des détecteurs de rayonnements, des systèmes d'acquisition de données et de leur traitement informatique, compétences qui permettent à Caen d'être reconnu sur le plan de l'imagerie (domaine qui fait l'objet, avec les Technologies de l'Information et de la Communication, d'un pôle scientifique et technologique)²⁴.

Concernant l'information, il faut rappeler dans ce chapitre la mission de vulgarisation scientifique du GANIL dont l'objectif est de faire partager avec le plus grand nombre les résultats de la recherche.

Outre le rôle du GANIL en matière de formations supérieures notamment en liaison avec l'ISMRA et l'Université, les actions du Très Grand Équipement en matière de vulgarisation scientifique lui ont valu plusieurs prix et récompenses. Dans la perspective de faire partager avec le plus grand nombre les résultats de la recherche, il constitue un membre actif du réseau bas-normand CCSTI-Relais d'Sciences présidé d'ailleurs actuellement par M. CHOMAZ, physicien-théoricien du GANIL.

L'éventail d'actions menées dans ce cadre, le partenariat suivi avec les instances pédagogiques et sa forte implication dans les activités de culture scientifique, tant nationale que régionale, ont valu au GANIL de recevoir en 1997 le premier prix de culture scientifique décerné par le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement²⁵.

²⁴ Inscrit au IV^e Contrat de Plan État-Région 2000-2006.

²⁵ Pour preuve de cet effort de communication et de vulgarisation, une grande partie du site internet du GANIL s'adresse justement au grand public et présente en des termes simples l'équipement et la recherche qui s'y déroulent : <http://www.ganil.fr/public/index.html>

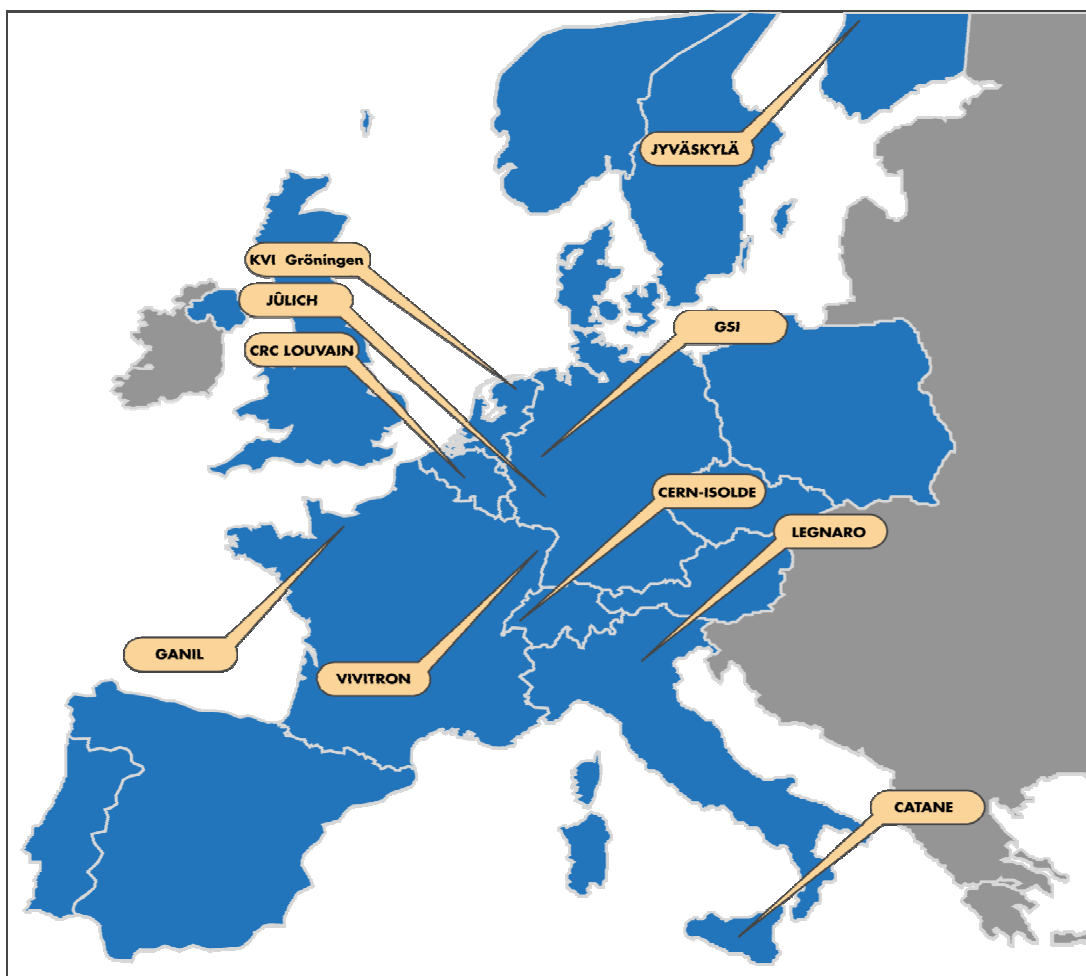
Les opérations portes ouvertes/Science en Fête ont accueilli entre 1983 et 2001, 21 600 personnes, les portes ouvertes dédiées aux lycéens ont impliqué au total sur la même période 125 établissements de l'Académie de Caen et 16 200 lycéens ainsi que les visites sur rendez-vous qui ont concerné 8000 personnes.

Le GANIL mène également des actions spécifiques destinées au grand public, aux jeunes et aux enseignants à travers des ateliers scientifiques, des conférences dans les lycées, des concours...

Enfin, parmi les actions ponctuelles grand public interviennent notamment des expositions dont l'une, intitulée "Voyage au cœur de la matière" à l'Hôtel de Ville de Caen en 1998 avait rencontré un vif succès.

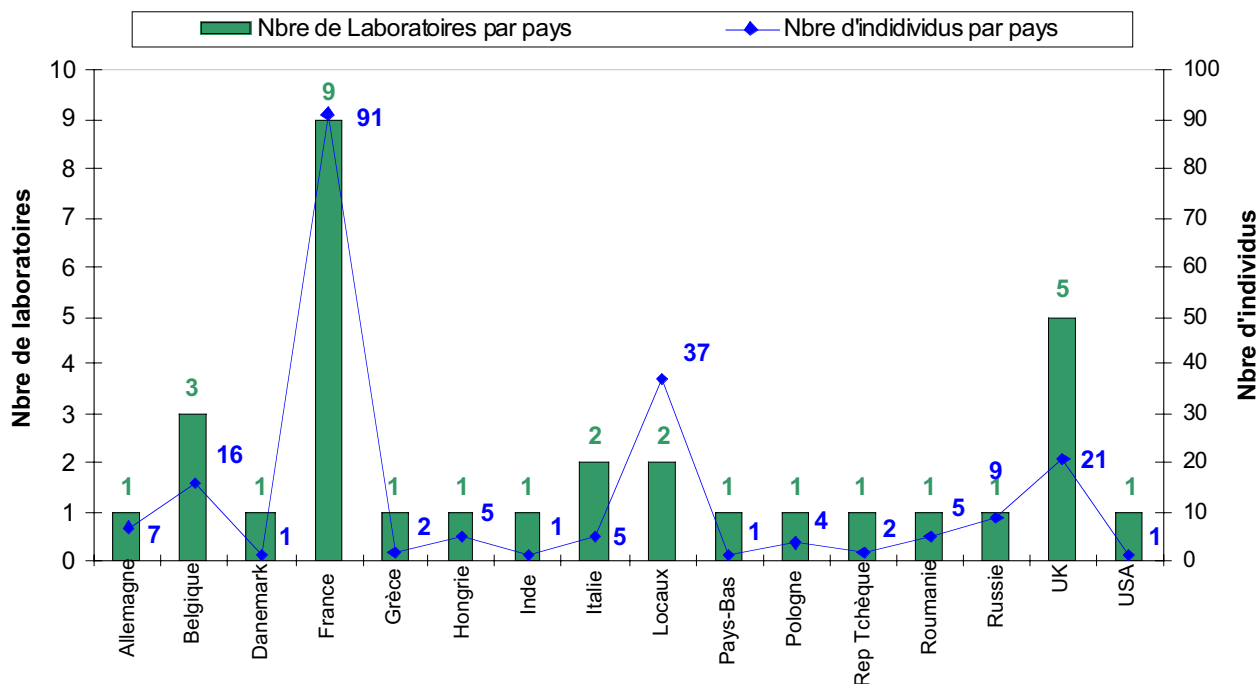
B - LA PLACE DE GANIL EN EUROPE

Parmi les installations européennes de physique nucléaire (présentées sur la carte n° 3), le GSI à Darmstadt (Allemagne) et le GANIL se distinguent nettement par les qualités et la diversité des faisceaux qu'ils offrent comme par l'importance de la communauté d'utilisateurs dont ces deux installations peuvent se prévaloir.



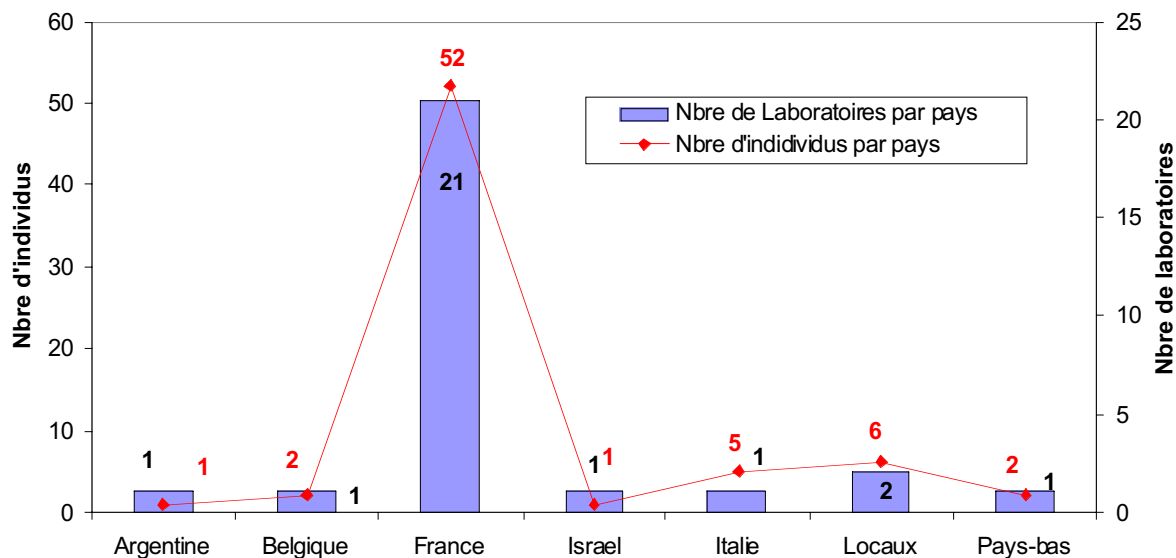
Carte n° 3 : Grandes installations de physique nucléaire en Europe

V - LA COMMUNAUTÉ DES UTILISATEURS



Graphique n° 3 : Expérimentateurs de Physique Nucléaire venus au Ganil sur la période du 1^{er} janvier au 31 décembre 2001

Source : GANIL



Graphique n° 4 : Expérimentateurs de Physique Non Nucléaire venus au Ganil sur la période du 1^{er} janvier au 31 décembre 2001²⁶

Source : GANIL

²⁶ En abscisses, la colonne "France" exclut les expérimentateurs locaux. En revanche, le terme "Locaux" concerne essentiellement les équipes des LPC ISMRA et GANIL.

Les physiciens - la plupart du temps, dans le cadre d'une large collaboration internationale - souhaitant effectuer une expérience auprès du GANIL, déposent une proposition auprès de l'un des Comités d'Expériences (Physique Nucléaire ou Physique Interdisciplinaire) qui se réunit tous les six mois.

À la seule vue des mérites scientifiques, ce Comité établit un ordre de priorité qui permet au Coordonnateur Faisceau du GANIL de préparer le planning. Il faut rappeler que la demande de temps de faisceau est entre cinq et six fois supérieure aux possibilités démontrant à l'envie l'attrait de l'instrument

La communauté est forte de quelque 700 utilisateurs, avec une moyenne de 400 chaque année, issus de 130 laboratoires provenant de 30 pays différents (cf. graphiques n° 3 et 4). entre 1999 et 2001. Le nombre moyen annuel de présence cumulée de visiteurs extérieurs équivalait au total à 7641 jours.

DEUXIÈME PARTIE :

LES DÉVELOPPEMENTS À MOYEN ET LONG TERMES

Dans la mesure où les expériences actuelles comme les nouveaux dispositifs expérimentaux développés pour exploiter SPIRAL sont le fruit de larges collaborations européennes, il paraît légitime, dans le cadre d'un espace européen de la recherche, que l'avenir du GANIL soit de répondre, à terme, aux besoins de la communauté scientifique européenne. À ce propos, l'avenir à moyen comme à long terme est discuté avec nos partenaires dans le cadre des RTD (Research Technological Development) du 5^{ème} PCRD (Programme Cadre de Recherche et Développement européen).

Pour le moyen terme (2007-2008), le développement envisagé est une extension de SPIRAL (SPIRAL II) qui fera, bien sûr, l'objet de collaborations européennes mais restera majoritairement national. Pour une échéance plus lointaine, le projet EURISOL est en revanche dès l'origine conçu comme une Installation Européenne.

I - LE MOYEN TERME : L'EXTENSION SPIRAL II

L'ensemble SPIRAL qui vient de démarrer au GANIL est une machine de première génération particulièrement bien adaptée à la production et à l'accélération de noyaux radioactifs légers et moyennement lourds (de l'hélium au krypton) à des énergies de 2 à 25 MeV par nucléon.

Dès l'origine du projet SPIRAL, une seconde phase avait été envisagée afin d'étendre la gamme des faisceaux produits vers les noyaux lourds comme le schématise la figure n° 4.

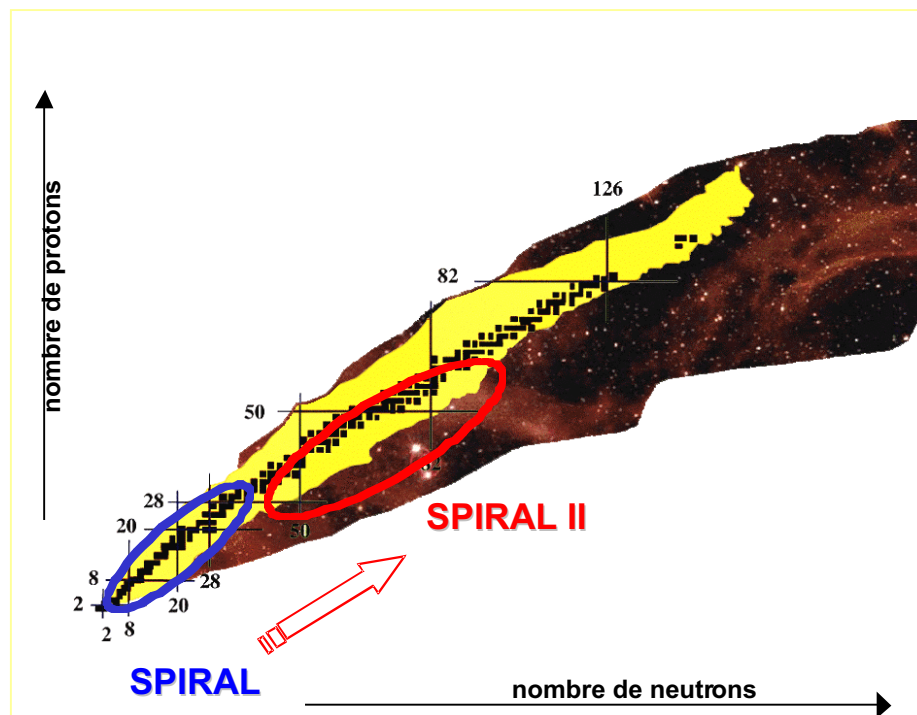


Figure n° 4 : Les champs d'investigations de SPIRAL et de SPIRAL II

A - DESCRIPTION DU PROJET

Les noyaux de cette région de masse peuvent être produits par la fission d'une cible d'uranium. Nous verrons, dans les paragraphes suivants, comment réaliser cette fission mais voyons d'abord les possibilités offertes par des faisceaux produisant des noyaux rares dans cette région de masse.

La production de faisceaux d'isotopes rares, riches en neutrons de masses moyennes à lourdes permet d'aborder toute une gamme de problématiques particulièrement intéressantes à condition que l'intensité des faisceaux produits soit suffisante. Le projet présenté ici se propose d'atteindre - a minima - 10^{13} fissions par seconde. De nombreuses discussions ont été organisées tant avec la communauté française qu'internationale et un groupe de travail animé par B. Blank (CENBG) en a tiré des conclusions que l'on peut trouver dans le rapport d'Avant Projet Sommaire SPIRAL II.

Contentons-nous ici de citer quelques-uns des sujets considérés dans ce rapport :

- Étude de la limite de stabilité des noyaux riches en neutrons,
- Fermetures de couches loin de la stabilité et plus généralement validité du modèle en couches loin de la stabilité,
- États de haut spin produits avec des fragments de fission,
- Recherche et production de noyaux super-lourds,
- Astrophysique Nucléaire, processus de nucléosynthèse,
- Thermodynamique du noyau.

Les sujets mentionnés ici ne représentent que quelques-uns des thèmes typiques de physique nucléaire que ces faisceaux de produits de fission permettraient d'aborder.

Bien sûr, les activités pluridisciplinaires du GANIL ainsi que l'utilisation des faisceaux d'ions pour des recherches appliquées seraient fortement renforcées par un tel projet.

Pour ne mentionner que deux aspects nouveaux :

- l'utilisation du flux important de neutrons créé auprès de la cible de production serait très intéressante dans de nombreux domaines. Citons par exemple l'étude des matériaux proche du cœur des réacteurs nucléaires (combustible, matériaux de gainage et de structure, matrice de transmutation) qui subissent de fortes irradiations par des neutrons rapides. La connaissance des effets de ces irradiations sur les propriétés d'usage des matériaux fait partie des enjeux de sûreté des installations nucléaires et la mise en place d'un poste d'irradiation neutronique auprès de SPIRAL II permettrait d'améliorer sensiblement la qualité des recherches sur la stabilité des matériaux du nucléaire,
- l'étude des plasmas denses. Les faisceaux d'ions lourds intenses sont en effet un outil idéal pour produire des plasmas denses, confinés dans un solide, et les étudier. Au contraire d'autres sources de production de ces plasmas (par exemple sources de lasers intenses,.....), ils ont un avantage spécifique : on connaît de façon précise, tant spatialement que temporellement, la déposition de l'énergie. On pourra alors étudier précisément la réponse hydrodynamique de la matière hautement excitée, les transitions de phase sous onde de choc qui sont des états extrêmes de la matière dans l'univers.

1°/ CHOIX DU FAISCEAU PRIMAIRE

Différentes particules peuvent être envisagées pour faire fissionner l'uranium. Les mieux adaptées sont les deutons²⁷ convertis en neutrons et les électrons. Un faisceau de deutons d'une énergie de quelques dizaines à une centaine de MeV ou des électrons d'environ 50 MeV sont capables de générer les quelque 10^{13} fissions par seconde visées.

Pour l'accélérateur de ces différentes particules, diverses solutions sont envisageables : cyclotron "chaud", cyclotron supraconducteur, linéaire "chaud", linéaire supraconducteur, ...

²⁷ Le noyau de deutérium, ou deuton, est à la physique nucléaire ce que l'atome d'hydrogène est à la physique atomique. Formé d'un neutron et d'un proton, la compréhension de sa structure est indispensable à la description des noyaux à partir de l'interaction nucléon-nucléon.

Ces options ont été très minutieusement examinées tout d'abord dans le cadre d'une RTD européenne (SPIRAL phase II) coordonnée par le GANIL et qui rassemblait un certain nombre de laboratoires européens (GANIL, IPN Orsay, JYFL Jyväskylä, KVI Groningen, Louvain-la Neuve). Depuis 1999, dans le cadre de ce programme, c'est la possibilité de produire des fragments de fission en utilisant un faisceau de deutons qui a été étudiée théoriquement et expérimentalement avec un programme piloté par l'IPN d'Orsay, qui a permis d'effectuer des mesures à différentes énergies et de valider ainsi les prévisions théoriques.

Plus récemment, la possibilité d'utiliser un faisceau d'électrons et donc la photofission comme moyen de production d'isotopes rares est apparue comme séduisante.

Un groupe de travail mis en place, en octobre 2000 a été chargé de remettre fin 2001 un Avant Projet Sommaire de SPIRAL II. Sa mission était, entre autres de comparer la solution « driver deutons » et la solution « photofission ».

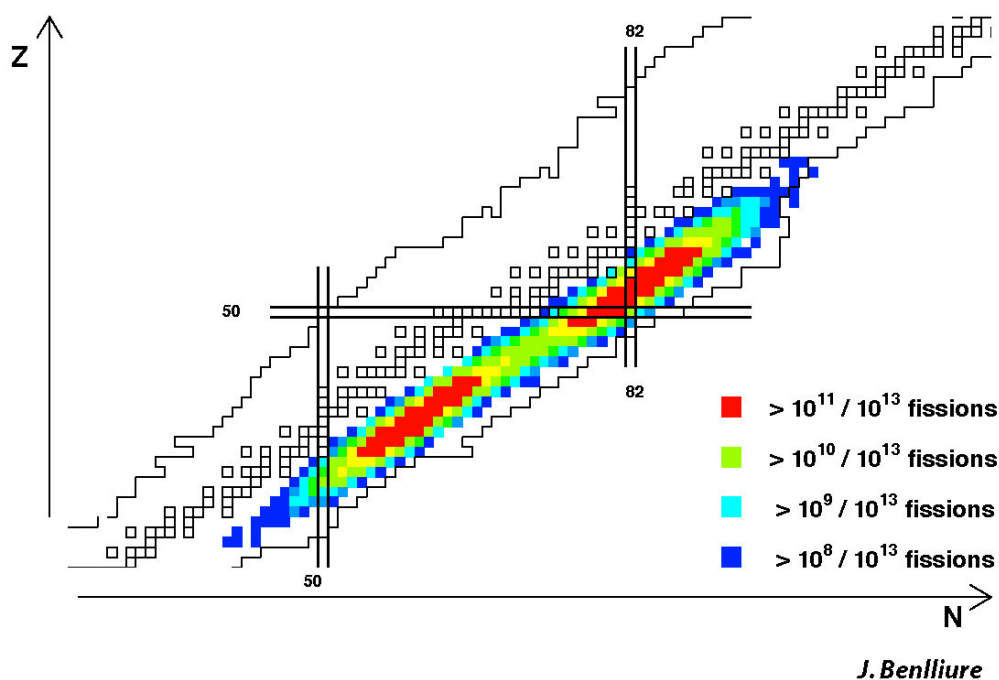


Figure n° 5 : La distribution des noyaux obtenus par la fission d'une cible d'uranium induite par un faisceau de deutons de 40 MeV

Source : GANIL

Pour de nombreuses raisons liées tant à la faisabilité technique, qu'aux performances obtenues, aux possibilités d'évolution et au positionnement par rapport à l'avenir à long terme, c'est la solution d'un accélérateur linéaire supraconducteur de deutons de 40 MeV qui a été retenue.

On notera que le Conseil Scientifique du GANIL réuni le 5 juin 2002 s'est prononcé favorablement sur le projet SPIRAL II et "a soutenu fortement et à l'unanimité" l'option deutons (cf. annexe n°5)

2°/ LE SCHÉMA GÉNÉRAL

Le principe de cet équipement consiste en un accélérateur dédié, LINAG qui produit un faisceau de deutons de très forte intensité et d'une énergie de 40 MeV qui va se fracasser sur une cible de carbone et produire un flux de neutrons lesquels, font fissionner une cible d'uranium. Les noyaux rares ainsi produits sont triés et amenés, soit vers une salle de basse énergie, soit vers le cyclotron CIME déjà en fonctionnement dans le cadre de SPIRAL pour être post-accélérés vers les salles d'expériences du GANIL. Dans une étape ultérieure il pourrait être envisagé d'injecter ces noyaux rares dans les cyclotrons existants (C0, CSS1 et CSS2) du GANIL pour les amener à des énergies plus élevées (cf. schéma général).

Notons que ce schéma permet d'envisager plusieurs faisceaux en parallèle. On peut, par exemple, offrir des faisceaux de produits de fission à basse énergie avec SPIRAL II pendant que GANIL et SPIRAL fournissent des faisceaux stables ou des faisceaux exotiques légers. Cet aspect « multi-faisceaux » est primordial et augmentera le temps de faisceau disponible.

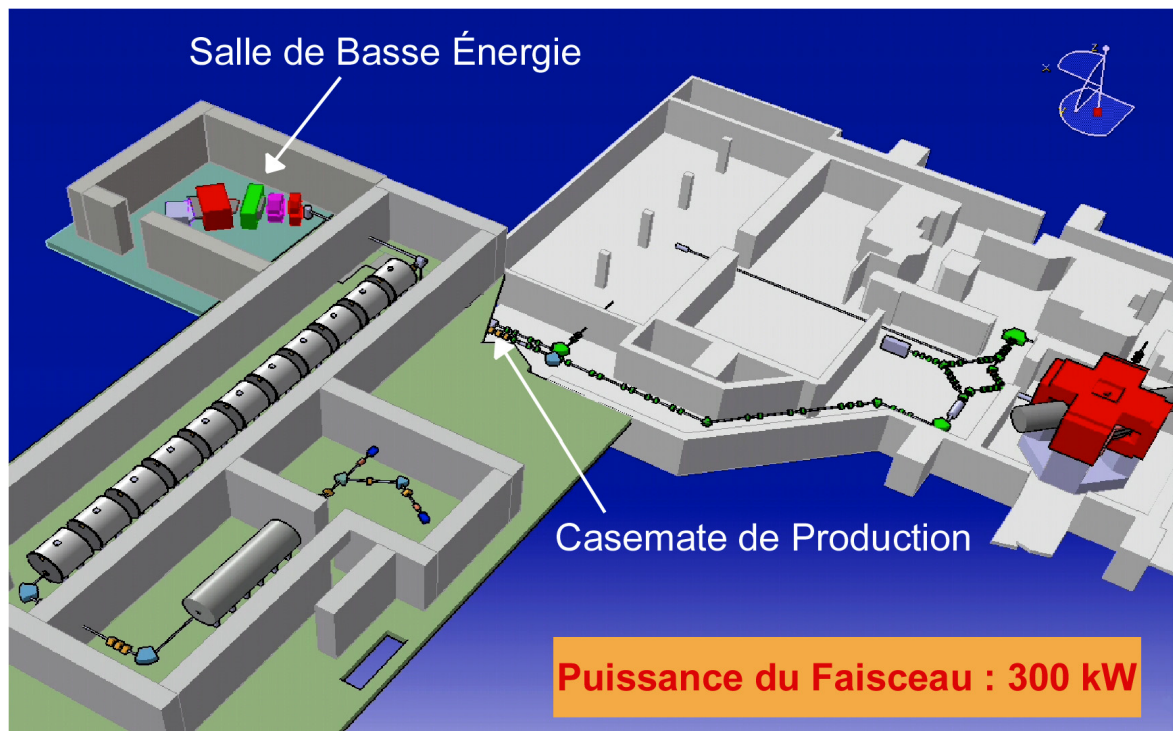
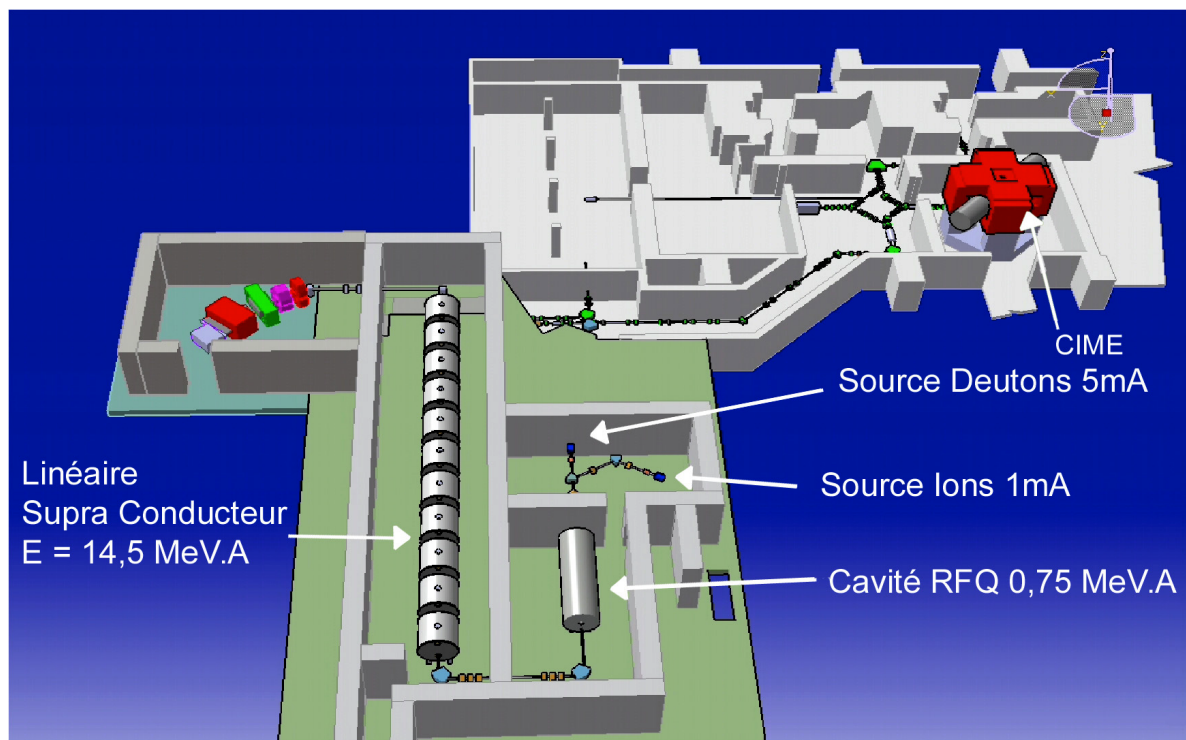
3°/ L'ACCÉLÉRATEUR PRIMAIRE (« DRIVER »)

L'accélérateur permettant de fournir les faisceaux de deutons souhaités est schématisé ci-dessous. Il serait constitué d'une source de deutons, d'une cavité radiofréquence (RFQ) et de cavités accélératrices supraconductrices (QWR).

Un tel accélérateur pourrait également, par la simple adjonction d'une source d'ions différente - une des sources du GANIL actuel, dans un premier temps - fournir des faisceaux stables de haute intensité (≤ 1 mA) d'ions lourds à des énergies supérieures à la barrière coulombienne. Des réactions de fusion engendrant des évaporations de particules avec des sections efficaces très faibles pourraient permettre d'étudier la formation de noyaux super lourds ou de noyaux $N=Z$ proches de la limite de stabilité.

Les produits de fission quant à eux pourraient être obtenus par plusieurs méthodes :

- utilisation d'un convertisseur de neutrons en amont de la cible fissile de carbure d'uranium qui permet d'atteindre 10^{13} à 10^{14} fissions/s peuvent être atteints en fonction du volume de la cible de production, sans dépôt excessif de chaleur.
- bombardement direct d'une cible de carbure d'uranium par un faisceau de deutons de 40MeV. Un taux de 10^{13} fissions par seconde peut être atteint, dans ce cas, avec une dissipation de 12kW dans la cible fissile.
- utilisation de la méthode IGISOL, c'est-à-dire l'association d'un convertisseur et d'une cible mince fissile dans de l'hélium gazeux. L'utilisation du convertisseur-cible évite l'ionisation du gaz d'Hélium, qui empêche l'extraction efficace des ions. Cette méthode permet une extraction très rapide et sans sélectivité chimique. Les intensités de faisceaux secondaires obtenus aujourd'hui sont encore limitées mais d'importants efforts sont entrepris dans de nombreux laboratoires pour améliorer ce point.



Figures n° 6 a et 6 b : le schéma général d'implantation de SPIRAL II

Source : GANIL

4°/ LA POST-ACCÉLÉRATION

Un premier étage de post-accélération des isotopes rares produits sera constitué par CIME mais, s'agissant d'accélérer maintenant des noyaux lourds, l'énergie maximale sera de l'ordre de 5 ou 8 MeV par nucléon.

Cette étape permet d'aborder tout un éventail d'expériences de physique depuis les énergies les plus basses jusqu'à la barrière Coulombienne. Pour aller au-delà et accéder au régime des réactions de transfert, c'est 10 à 20 MeV par nucléon qu'il faut atteindre puis, pour ce qui est de l'étude de la matière nucléaire de l'ordre de 40 MeV par nucléon.

Pour atteindre ces énergies, plusieurs solutions sont envisageables : l'injection dans les accélérateurs actuels (CSS1 et CSS2) du GANIL ou la réalisation d'un post-accélérateur spécifique. Ces différentes options seront étudiées dans une étape ultérieure.

B - LES ASPECTS TECHNOLOGIQUES ET LES MOYENS NÉCESSAIRES

Ce projet fait appel, en particulier, pour le « driver », à des techniques de pointe. Cet accélérateur, capable de fournir un faisceau continu de 5mA de deutons d'une énergie de 40MeV sera constitué :

- d'une source de deutons de haute intensité de type ECR proche de SILHI, la source de protons développée dans le cadre du projet français IPHI (projet de R&D visant au développement d'un accélérateur de haute intensité),
- d'un injecteur RFQ (cavité radiofréquence) à 87,5 MHz dont la technique de fabrication (inox plaqué cuivre) nouvelle permet une réalisation rapide et largement moins coûteuse que les techniques classiques,
- d'une succession de cavités supraconductrices à 4,2 degrés Kelvin qui seront soit en niobium pur soit en cuivre plaquée niobium. Cette seconde technique semble plus prometteuse en particulier quant au coût mais nécessiterait un plus gros investissement de départ en laboratoires de tests et de montage dédiés.

Ces techniques sont maîtrisées dans certains laboratoires français (IPN Orsay, DAPNIA-Saclay,...) ou étrangers (Legnaro-Italie, Argonne-USA, JAERI-Japon,...) mais devront être développées pour ce projet, ce qui maintiendra ou amènera ainsi les laboratoires participants au meilleur niveau mondial dans le domaine des accélérateurs de haute intensité.

Ce projet devrait mobiliser dans l'ensemble des laboratoires de physique nucléaire français l'équivalent de 80 physiciens, ingénieurs et techniciens à plein temps pendant 4 à 5 ans. Il nécessite de plus, d'étroites collaborations avec nos partenaires européens (GSI, Legnaro, Daresbury-G.B....).

Le budget d'investissement nécessaire est de l'ordre de 40 Millions d'Euros étalés sur quatre ans.

C'est donc un budget consolidé de l'ordre de 80 Millions d'Euros que requière ce projet.

II - L'AVENIR À LONG TERME : EURISOL

Au préalable, il convient de préciser qu'il existe deux grands types de procédés mis en œuvre pour produire des faisceaux exotiques :

- la fragmentation à haute énergie
- la méthode ISOL

Dans le premier cas, un faisceau de noyaux stables lourds de haute énergie (typiquement 1 A.GeV) est fragmenté par choc sur une cible mince. Toutes sortes de noyaux sont ainsi formés. On peut ensuite les filtrer par une succession de champs magnétiques et électriques comme c'est fait à l'heure actuelle sur LISE. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'étudier des noyaux de très courte durée de vie. L'inconvénient, c'est qu'ils sont formés à haute énergie (1 A.GeV) ce qui ne permet pas tous les types d'expériences nécessaires.

Dans l'autre cas, comme sur SPIRAL par exemple, un faisceau d'énergie intermédiaire produit des noyaux exotiques dans une cible épaisse. Ceux-ci sont ensuite ionisés et ré-accélérés par un autre accélérateur. L'inconvénient est, cette fois, qu'il faut un certain temps pour extraire les atomes de la cible de production et les ioniser. On aura donc pas accès aux très courtes durées de vie. Par contre, on est totalement maître de l'énergie finale du faisceau exotique ce qui autorise toute une palette de d'expériences.

Comme nous allons le voir dans les paragraphes suivants, la nécessité de construire des accélérateurs de faisceaux radioactifs de seconde génération fait l'objet d'un consensus scientifique mondial.

Les États-Unis ont pris l'option de bâtir un projet unique utilisant les deux techniques de productions - méthode ISOL à basse énergie et fragmentation à haute énergie. L'Europe, quant à elle, a choisi de développer deux machines complémentaires utilisant chacune l'une de ces deux méthodes.

Nous allons voir que si le GSI en Allemagne est le candidat naturel à développer la machine de haute énergie, le GANIL serait un candidat de choix pour EURISOL, la machine basée sur la technique ISOL.

À long terme, la physique nucléaire européenne devrait être concentrée autour de ces deux installations. Être le site « hôte » d'EURISOL constitue donc un enjeu majeur pour la physique nucléaire française si elle veut maintenir et développer son rôle de leader dans le domaine.

Toutefois, comme chacun sait, les accords internationaux sont toujours longs et parfois difficiles à mettre en place en particulier pour des projets d'une telle ampleur. Nous verrons ici que si la décision de construction d'EURISOL devait être retardée, les options techniques choisies pour SPIRAL II permettent d'envisager des évolutions très intéressantes.

A - LES CHOIX DE LA COMMUNAUTÉ DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE EN EUROPE ET DANS LE MONDE

Au niveau international, a eu lieu en 1999 une réflexion à l'initiative de l'**OCDE**, à travers l'organisation d'un Forum Megasciences sur la physique Nucléaire. A été considérée comme prioritaire la construction d'installations de seconde génération de faisceaux d'isotopes rares de deux types tout à fait complémentaires (production de faisceaux d'isotopes rares à haute et basse énergies) en Amérique, Europe et Asie (cf. annexe n°1).

L'année suivante, **NuPECC** (Nuclear Physics European Collaboration Committee), Comité d'experts de l'ESF (European Science Foundation) a effectué un travail de réflexion en profondeur sur les perspectives en physique nucléaire en Europe. Dans ce cadre, la priorité a été donnée au développement d'installations de seconde génération pour la production de faisceaux d'isotopes rares (cf. annexe n°2).

Toutes ces recommandations sont d'ores et déjà prises en compte dans de nombreux projets comme le montre le schéma ci-dessous :

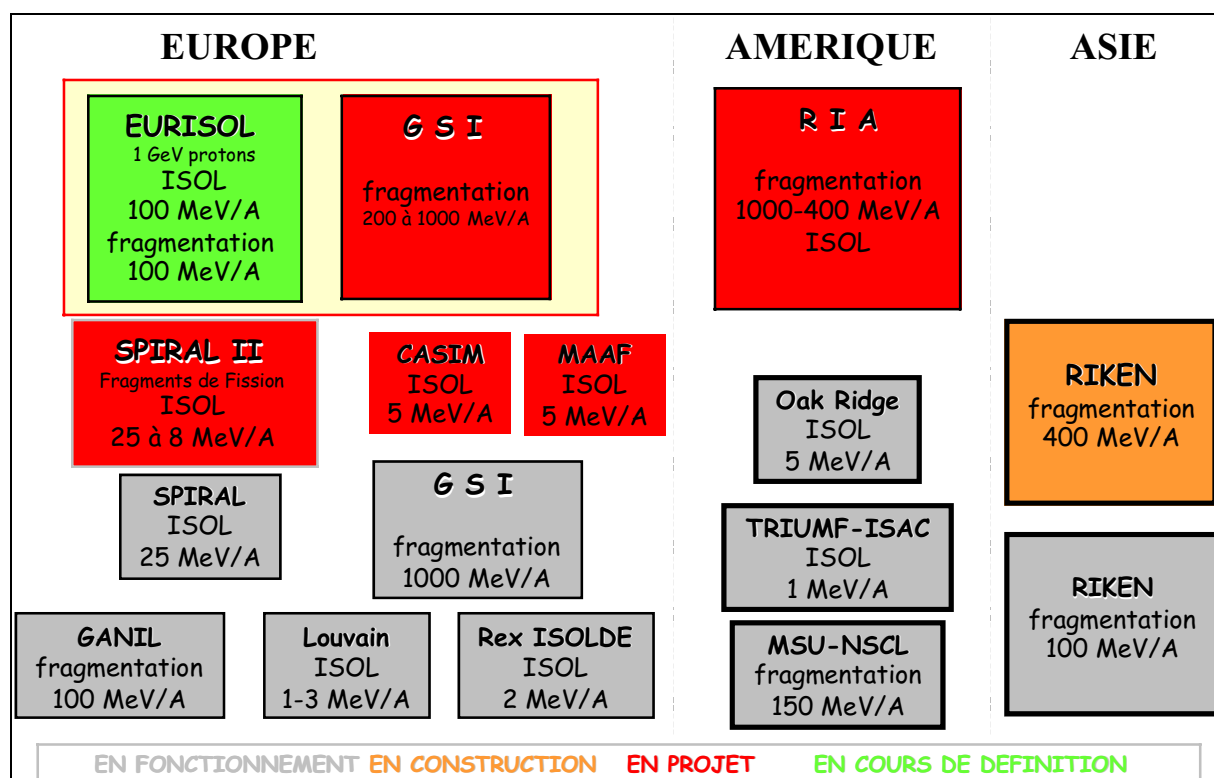


Tableau n°2 : les équipements actuels et les projets d'installations de seconde génération de production de faisceaux d'isotopes rares à haute et basse énergies.

(MeV/A = MeV par nucléons)

Source : GANIL

Sur ce tableau sont figurés, pour les trois continents, les installations produisant des faisceaux exotiques. On a distingué les installations existantes (en gris), en construction (en violet), les projets (en bleu) et les machines en cours de définition (en vert). Pour ce qui est des projets, SPIRAL II est longuement décrit dans ce rapport. MAAF est un projet allemand. Il s'agit de produire des fragments de fission, comme pour SPIRAL II, mais dans un réacteur et non pas grâce à un accélérateur. Ce réacteur situé près de Munich n'a pas encore reçu l'autorisation de démarrage. La date d'une mise en service éventuelle de MAAF est donc difficile à préciser mais en tout état de cause lointaine. Comme, de plus, la post accélération de ces noyaux exotiques n'est envisagée que jusqu'à 5 MeV par nucléons et que l'installation ne comporte aucun des équipements expérimentaux dont est pourvu le GANIL, il ne s'agit pas vraiment d'un concurrent à SPIRAL II.

CASIM est un projet anglais couplant une installation de protonthérapie et une production de noyaux exotiques grâce à un faisceau primaire de protons de 200 MeV. Ce projet n'a pas encore reçu le feu vert des autorités britanniques et il est peu probable qu'il le reçoive jamais.

EURISOL et GSI sont décrits dans ce rapport. RIA est la réponse américaine aux recommandations de l'OCDE. Il s'agit d'un projet regroupant dans une même installation les deux méthodes de production, fragmentation à haute énergie et méthode ISOL. Cette machine très ambitieuse n'a pas encore reçu le feu vert des autorités américaines mais se trouve bien placée dans l'ordre des grands projets américains. ISAC à Triumf (Canada) utilise dès à présent des faisceaux de protons de $20\mu\text{A}$ à 500 MeV avec la méthode ISOL et envisage une augmentation progressive de l'intensité et de l'énergie de post-accélération. À Riken (Japon) une augmentation aussi bien de l'énergie que de l'intensité est en cours.

Notons qu'en Grande-Bretagne ainsi qu'en Italie (Legnaro), des projets de haute intensité des faisceaux de protons à 200 MeV pour l'un et à basse énergie pour l'autre sont également en gestation.

B - LA MACHINE DE FRAGMENTATION À HAUTE ÉNERGIE : LE PROJET DE GSI

Suivant les recommandations de NuPECC et tenant compte de la spécialité développée depuis de longues années, GSI s'est immédiatement porté candidat à devenir cette machine de seconde génération utilisant la fragmentation à haute énergie comme moyen de production.

GSI est en effet actuellement le seul accélérateur dans le monde qui offre les faisceaux d'ions radioactifs secondaires aux énergies au-dessus de 200 MeV par nucléon. Ceci ouvre des possibilités uniques pour la physique des noyaux loin de la stabilité, utilisées déjà aujourd'hui par une large communauté internationale.

Avec le nouveau projet, une augmentation considérable des intensités des faisceaux secondaires (jusqu'à 10 000) est envisagée. Ceci sera obtenu par une augmentation d'un facteur 100 de l'intensité du faisceau primaire et d'un facteur 100 par l'amélioration et le changement du schéma d'accélération après la cible de

production. Les intensités ainsi obtenues pour les noyaux de masses intermédiaires et des noyaux lourds sont proches des intensités des faisceaux de fragments attendus à RIKEN et à RIA. Pour les fragments lourds, les énergies de faisceau plus élevées disponibles à GSI vont permettre une meilleure séparation de différents faisceaux isotopiques.

C - LA MACHINE ISOL DE SECONDE GÉNÉRATION : EURISOL

La méthode de fragmentation à haute énergie envisagée à GSI ne permettant d'explorer qu'une partie des expériences nécessaires et, suivant en cela les recommandations de NuPECC et du Forum Megasciences de l'OCDE, la communauté européenne a entrepris l'étude d'une machine de seconde génération basée sur la méthode ISOL. Cette étude est menée dans le cadre du RTD Européen EURISOL (2000-2003) coordonné par le GANIL et regroupant de grands laboratoires étrangers comme Chalmers University, Louvain, GSI, INFN, IPN Orsay, SPhN Saclay, ISOLDE-CERN, Jyväskylä, et le Rutherford Appleton Lab²⁸..

Ce travail doit aboutir, fin 2002, à l'élaboration d'un rapport présentant un avant-projet sommaire et à la recommandation d'un certain nombre d'études techniques jusqu'en 2006, date à laquelle le choix d'un site devrait être effectué. La construction pourrait alors démarrer pour un fonctionnement en 2010 ou 2012.

EURISOL tel qu'envisagé aujourd'hui est donc constitué d'un « driver », d'un ensemble cible-source et d'un post-accélérateur permettant d'atteindre 100 MeV par nucléon.

Pour ce qui est du « driver », l'option de référence est un accélérateur de protons de très haute intensité (5mA) et d'une énergie de 1 à 2 GeV. L'option « driver électron » est également étudiée ainsi que la possibilité d'accélérer un certain nombre d'ions lourds-légers dans l'accélérateur de protons.

L'ensemble cible-source constitue quant à lui le point le plus délicat en termes de sûreté comme c'est déjà le cas pour SPIRAL. Étant données les quantités d'éléments radioactifs qui y seront produits, le schéma envisagé est celui de blocs interchangeables par télémanipulation comportant le convertisseur deutons-neutrons, la cible de production en carbure d'uranium et la source chargées d'ioniser les produits de fission avant post-accélération.

La post-accélération quant à elle pourrait être confiée à un cyclotron (chaud ou supraconducteur) ou à un linéaire supraconducteur. Cette dernière option semble la plus intéressante, en particulier pour sa grande souplesse et pour son rapport prix/transmission très favorable.

²⁸ réf : <http://www.ganil.fr/eurisol/>

Tous les éléments constitutifs de ce projet (accélérateur primaire, ensemble cible-source, post-accélérateur) nécessitent des développements technologiques importants mais sont des extrapolations raisonnables de ce qui est possible aujourd'hui à condition que des efforts conséquents de R&D soient entrepris rapidement. Le post accélérateur envisagé en particulier est un accélérateur linéaire supraconducteur à ions lourds qu'il faut développer. Or, l'accélérateur primaire (driver) proposé pour SPIRAL II est précisément du même type. Il est de plus faible énergie mais il suffirait de le prolonger par l'adjonction d'un certain nombre d'éléments supplémentaires pour obtenir les caractéristiques attendues.

On voit ainsi clairement que SPIRAL II est une excellente étape technique vers EURISOL et s'insère dans une stratégie globale qui devrait permettre à la France d'être un candidat sérieux pour EURISOL face aux autres candidats européens.

D - SOLUTION ALTERNATIVE

Si toutefois le contexte international était tel qu'une décision sur la construction d'EURISOL se trouve retardée ou même que le projet soit abandonné, les choix techniques fait pour SPIRAL II permettent d'envisager une évolution très intéressante de l'installation.

En effet, l'accélérateur primaire proposé pour SPIRAL II est un accélérateur linéaire rompant ainsi avec la grande tradition du GANIL qui n'a développé jusqu'ici que des cyclotrons. Ces derniers sont en général d'un coût moindre au départ mais interdisent, par principe, des évolutions importantes. L'énergie maximale d'accélération est, par exemple, fixée pour une charge des ions donnée. L'intensité maximale de faisceau qu'ils peuvent supporter est, elle aussi limitée pour des problèmes d'extraction du faisceau. Tout au contraire, un accélérateur linéaire peut augmenter considérablement son énergie maximale par l'adjonction de cavités accélératrices supplémentaires. Le driver choisi de SPIRAL II est le résultat d'une étude nommée LINAG Phase 1 limité dans cette version à 40 MeV de deutons et 14 MeV par nucléons pour des ions semi-lourds mais prévoit d'ores et déjà, dans sa version complète (LINAG), d'atteindre 100 MeV par nucléons ouvrant ainsi tout un pan de physique nouvelle.