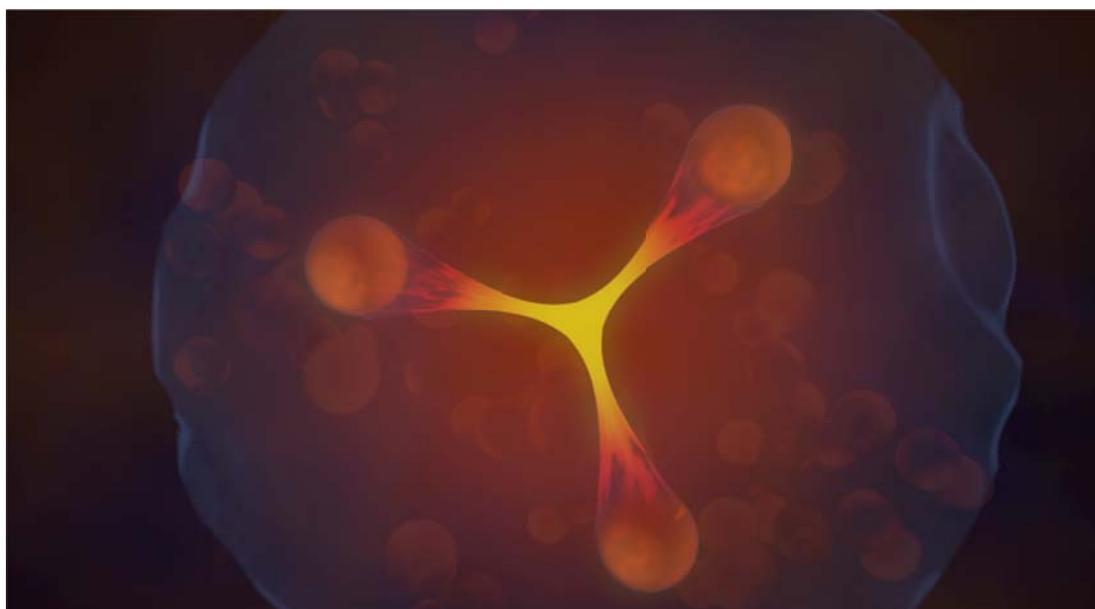




## Inauguration de Spiral2 au Ganil

*Jeudi 3 novembre 2016 à Caen*

### DOSSIER DE PRESSE



Vue d'artiste représentant l'intérieur d'un proton © Frédéric Durillon/Animéa/CEA

**La France double ses capacités expérimentales  
en physique nucléaire**

#### Contacts presse

---

**CNRS** : Priscilla Dacher  
T 01 44 96 46 06 – [priscilla.dacher@cnrs-dir.fr](mailto:priscilla.dacher@cnrs-dir.fr)

**CEA** : François Legrand & Guillaume Milot  
T 01 64 50 20 11 – [francois.legrand@cea.fr](mailto:francois.legrand@cea.fr) / [guillaume.milot@cea.fr](mailto:guillaume.milot@cea.fr)



## SOMMAIRE

- I. **Pourquoi un nouvel accélérateur au Ganil ?**
  - a. Des exemples de découvertes obtenues grâce au Ganil
  - b. Les avancées scientifiques attendues
  - c. Un environnement local, national et international favorable - Les partenaires du projet
  - d. Les accélérateurs comparables à Spiral2 dans le monde
  
- II. **L'installation et les équipements de Spiral2**
  - a. L'accélérateur Spiral2 et les salles d'expériences
  - b. De Spiral à Spiral2
  - c. Le campus Jules Horowitz
  - d. Infographie « Tout s'explique »
  
- III. **Les futures phases de développement du projet**
  - a. Calendrier et financement
  - b. Desir, l'installation basse énergie de Spiral2
  - c. Spiral2 : phase 2
  
- IV. **L'impact environnemental du projet**
  - a. Risques radiologiques
  - b. Risques environnementaux et sanitaires
  - c. Sécurité conventionnelle
  
- V. **L'impact socio-économique et la valorisation des recherches à Spiral2-Ganil**
  - a. Applications industrielles
  - b. Membranes microporeuses
  - c. Hadronthérapie
  - d. R&D et qualification de composants pour le domaine spatial
  - e. Industrie nucléaire
  - f. Radionucléides pour le diagnostic, la thérapie et la recherche biomédicale
  - g. Transfert de technologies
  - h. Création d'entreprises
  
- VI. **Les partenaires**
  
- VII. **Quelques visuels disponibles gratuitement pour la presse**

*D'autres visuels sont disponibles sur demande auprès des services de presse CNRS et CEA.*  
*Pour consulter le reportage photos en intégralité : <http://phototheque.cnrs.fr/p/353-1-1-0/>*
  
- VIII. **Lexique**



## I. POURQUOI UN NOUVEL ACCELERATEUR AU GANIL ?

À la pointe de la recherche sur les noyaux exotiques (n'existant pas à l'état naturel sur Terre), le Grand accélérateur national d'ions lourds, plus couramment appelé Ganil, est une très grande infrastructure de recherche commune au CNRS et au CEA située sur les communes d'Epron (environ 21 hectares), de Caen (10,5 ha) et d'Hérouville-Saint-Clair (4,3 ha). C'est aujourd'hui l'un des cinq grands laboratoires au monde permettant la synthèse et l'étude des propriétés de ces nouveaux noyaux. Ce domaine, émergeant dans les années 1980, s'est révélé être une véritable mine d'informations.

### Le Ganil en chiffres

- 30 millions € de budget (y compris les salaires) ;
- 250 permanents (physiciens, ingénieurs, techniciens, administratifs...);
- 700 chercheurs provenant de 30 pays différents et de 65 laboratoires et universités étrangers sont accueillis chaque année pour y faire des expériences et assister aux colloques et séminaires ;
- 3 020 articles scientifiques impliquant des chercheurs du Ganil depuis sa création.

Nos connaissances sur la structure du noyau atomique, sur ses propriétés thermiques et mécaniques, et sur les noyaux exotiques ont été profondément remises en cause par les résultats obtenus ces dernières années au Ganil avec de profondes conséquences sur notre compréhension du Cosmos.

### Des exemples de découvertes obtenues grâce au Ganil

- Par des expériences sur les noyaux atomiques à 20 neutrons et 14, 16 ou 20 protons, des chercheurs du Ganil ont démontré pour la première fois, en mars 2014, qu'une propriété structurale du noyau atomique dépend fortement de la densité de matière au centre du noyau. L'effet a été caractérisé dans un noyau atypique, le silicium-34, dont les mêmes physiciens ont récemment prouvé dans un travail récemment publié dans la revue *Nature* que son centre était anormalement creusé. Les physiciens s'attendent à ce que dans les noyaux super-lourds, le nombre très élevé de protons se traduise par la formation d'une « bulle » similaire à l'intérieur de ces noyaux, s'accompagnant de modifications de leur structure et impactant la position de l'îlot de stabilité recherché de longue date. Reste à le prouver ou... à l'infirmer, ce qui sera possible avec Spiral2.

### Aller à la quête des noyaux super-lourds

En mars dernier, l'Union internationale de chimie pure et appliquée a validé officiellement la découverte des éléments 113, 115, 117 et 118, enrichissant ainsi le tableau de Mendeleïev (qui organise les éléments chimiques connus) de quatre nouveaux éléments. Grâce à Spiral2, le Ganil pourra s'engager dans la quête et l'étude des éléments dits « super-lourds », car comptant plus de 104 protons. Surtout, les physiciens comptent les scruter dans les moindres détails et révéler tous les secrets de ces noyaux super-lourds : quelles sont leurs propriétés physiques et chimiques ? Jusqu'à combien de protons et de neutrons un noyau atomique peut-il compter ?

- En mai 2015, des physiciens utilisant les sources d'ions du Ganil ont découvert un nouveau processus responsable de la production d'électrons de très faible énergie lors de la collision d'ions avec des molécules. Un phénomène qui peut avoir des implications significatives en radiobiologie. La future salle d'expériences S<sup>3</sup> permettra de mieux étudier les processus de collision atomique entre faisceaux d'ions stables très intenses.

- Et un dernier exemple dans le domaine de la santé : en mars dernier, grâce aux faisceaux délivrés par le Ganil, une équipe de chercheurs d'autres laboratoires français a pu mieux évaluer les effets de

l'irradiation d'une hadronthérapie (traitement des cancers par faisceaux de protons et ions carbone notamment) par rapport aux radiothérapies conventionnelles (traitement par rayons X). Spiral2 offrira



L'opportunité de poursuivre ce type d'études dans le domaine de la santé. L'impact des neutrons sur le vivant ainsi que la production de radio-isotopes susceptibles d'être utilisés en médecine nucléaire seront des axes de recherche de la salle d'expériences NFS, dont la mise en service est prévue mi 2017.

### Le Ganil en dates

- 1976 : Création par le CNRS et le CEA
- 1983 : Première expérience
- 1992 : Augmentation de l'intensité des faisceaux d'ions
- 2001 : Premier faisceau de Spiral
- 2005 : Démarrage du projet Spiral2
- 2006 : Signature de la convention Spiral2
- 2011 : Début de la construction de Spiral2
- 2014 : Livraison des bâtiments de Spiral2
- Déc 2015 : Premier faisceau de protons pré-accélééré dans l'injecteur de Spiral2
- Second semestre 2017 : Premières expériences à Spiral2

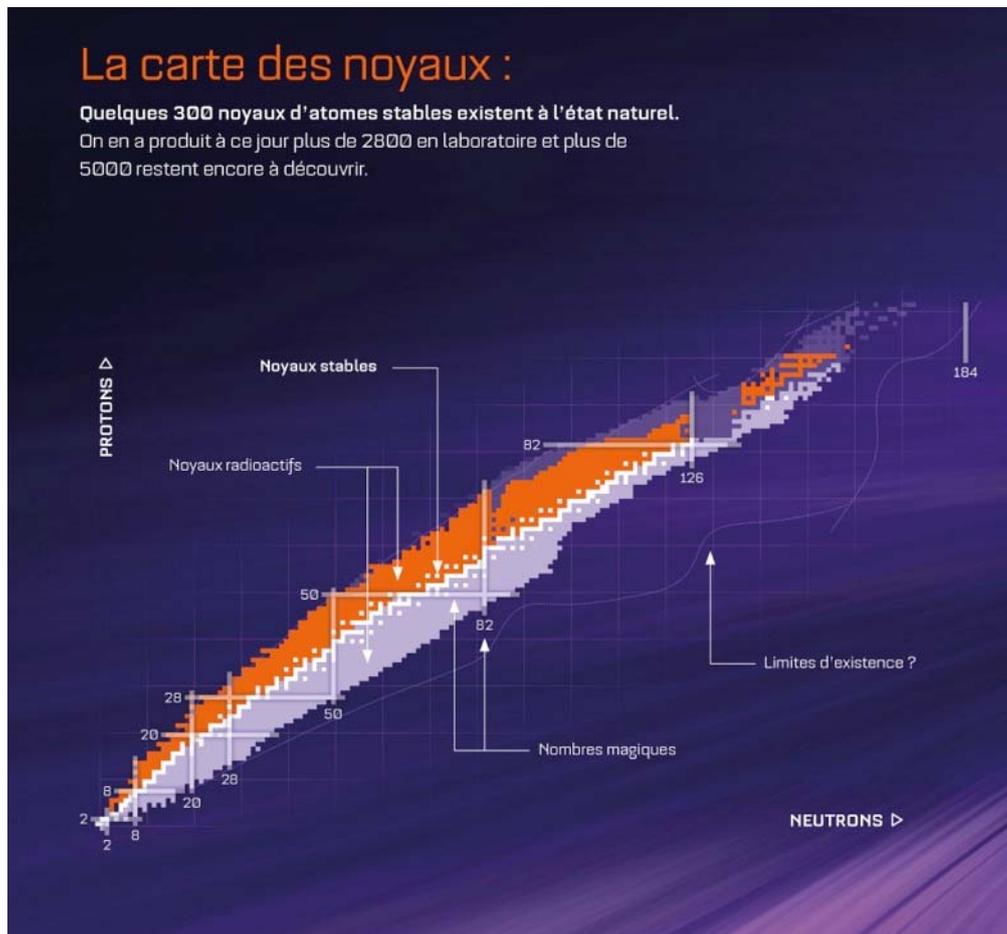
Avec Spiral2 (acronyme de « Système de production d'ions radioactifs accélérés en ligne de 2<sup>ème</sup> génération »), le CNRS et le CEA se dotent d'une installation plus puissante que l'existant, permettant la production de noyaux exotiques plus lourds et plus riches en protons. Cette nouvelle installation assurera la compétitivité du Ganil au niveau international dans les années à venir, offrant à la France et à l'Europe une longueur d'avance technologique et scientifique.

## Les avancées scientifiques attendues

D'une manière générale, Spiral2 vise à étudier le noyau atomique, soit le cœur de l'atome, qui constitue toute matière, sous toutes les coutures et dans des conditions extrêmes, que ce soit en termes de déséquilibre entre le nombre de protons et le nombre de neutrons (comme par exemple des noyaux déficients en neutrons ou au contraire très riches en neutrons), ou bien d'énergie d'excitation, ou encore de température ou de pression. Ce sera un outil précieux pour percer l'intimité de la matière. De plus, s'intéresser aux propriétés du noyau c'est aussi interroger nos origines et en savoir davantage sur les sources de production d'énergie et de matière dans notre Univers.

- **Explorer la terre inconnue de la carte des noyaux**

Spiral2 permettra de sonder **les limites d'existence des noyaux** en suivant leur nombre de protons et de neutrons. C'est particulièrement important car cela permet d'étudier la manière dont les nucléons se répartissent en couches successives dans ces noyaux extrêmes et de sonder les forces nucléaires à l'œuvre. Il existe en effet différents scénarios de création de la matière, mais tous dépendent des propriétés des noyaux les plus exotiques, pour la plupart encore inconnus.



©Unik studio

Chaque case de cette carte représente un noyau positionné en fonction du nombre de ses neutrons, "d'ouest en est" (en abscisse), et de ses protons, "du sud au nord" (en ordonné) :

- les cases blanches sont les 291 noyaux que l'on trouve à l'état naturel sur Terre ;
  - les zones orange et gris clair délimitent les 2 800 noyaux synthétisés en laboratoire à ce jour.
- Au-delà, figurent les noyaux prédits par la théorie comme existant dans l'Univers. Entre 5 000 et 7 000 restent encore à découvrir...

**A noter :** Les chiffres portés correspondent aux **nombre magiques de protons ou de neutrons** qui donnent aux noyaux une stabilité accrue. La structure des noyaux les plus exotiques semble d'ailleurs faire fi de ces nombres magiques. Spiral2 permettra de suivre systématiquement leur évolution jusqu'aux limites d'existence des noyaux afin de comprendre ce phénomène encore non élucidé.

Les intensités des faisceaux d'ions lourds de Spiral2 permettront au Ganil de devenir **compétitif dans la course aux noyaux super-lourds** (comptant plus de 104 protons). Il s'agira notamment de déterminer leurs propriétés physiques et chimiques ainsi que leurs états moléculaires.

Un autre sujet d'étude majeur concernera **les forces de cohésion nucléaire** à l'œuvre dans le noyau. Les propriétés des noyaux exotiques, leur cohésion, leur taille, les niveaux excités, leur forme, ... sont déterminés par les équilibres subtils entre les forces qui y règnent. Grâce à un important effort de modélisation, les résultats de Spiral2 aideront à décrire ces forces, en particulier dans les noyaux riches en neutrons. En effet, étudier la collision de noyaux exotiques accélérés avec des noyaux stables permettra de sonder les propriétés des forces de cohésion des nucléons au sein du noyau et d'étudier leur évolution dans des conditions extrêmes de température ou de densité.



- **Scruter les interactions fondamentales**

Les noyaux exotiques se transforment en espèces plus stables grâce à la radioactivité bêta. Ils peuvent ainsi être utilisés pour étudier les propriétés fondamentales de l'interaction faible qui est l'origine de ce phénomène.

- **Astrophysique nucléaire**

Les noyaux exotiques sont produits lors de réactions nucléaires dans l'Univers. Pour comprendre l'origine des éléments et leur abondance sur Terre, il faut connaître les propriétés des noyaux exotiques et des réactions nucléaires dont ils sont issus. Étudier des réactions nucléaires avec des faisceaux d'ions légers stables ou radioactifs intenses permettra de percer l'origine des éléments lourds dans l'Univers (nucléosynthèse).

Les protons et les neutrons d'un noyau forment un liquide d'une densité "extraordinaire". Un tel liquide enrichi en neutrons constitue le cœur des supernovæ et des étoiles à neutrons. Spiral2 recréera cette matière sur Terre lors de réactions avec des noyaux très riches en neutrons, que l'on trouve habituellement dans les étoiles et les supernovæ.

- **La physique nucléaire pour la santé (1)**

Les neutrons et les ions délivrés à Spiral2 permettront l'étude de voies alternatives et innovantes de production de radio-éléments à usage médical. En complément des techniques de proton/hadronthérapie (traitement des cancers en utilisant des faisceaux d'ions), des études seront par ailleurs menées pour étudier l'influence des neutrons sur le vivant.

- **D'autres applications (1) de Spiral2 interviendront**, par exemple pour tester la résistance de composants électroniques aux radiations. Spiral2 contribuera également à la mesure de données nucléaires qui participeront à rendre l'énergie nucléaire encore plus sûre et respectueuse de l'environnement. Ces données seront utiles en particulier pour les réacteurs de fission de nouvelle génération, la technologie de la fusion et la transmutation des déchets nucléaires.

*(1) Pour aller plus loin : se reporter à la partie V sur l'impact socio-économique et la valorisation des recherches à Spiral2-Ganil.*

## Un environnement local, national et international favorable - les partenaires du projet

Depuis sa création en 1976, le Ganil a toujours été très soutenu par les collectivités locales dont la région Basse-Normandie et aujourd'hui la Normandie. Spiral2 est financé par le CNRS, le CEA, la région Normandie, le département du Calvados, l'agglomération Caen la Mer et la ville de Caen, avec le soutien de l'Union européenne, via le projet européen Spiral2 Phase Préparatoire, et des collaborations internationales (*pour le budget : se reporter à la partie III sur les futures phases de développement du projet*).

### Au niveau national

Priorité nationale du CNRS et du CEA en physique nucléaire, Spiral2 est le fruit de collaborations à la fois techniques et scientifiques entre de nombreux laboratoires français, européens et internationaux. Depuis le début du projet, outre le Ganil bien entendu, sont impliqués en France :

- **dix laboratoires associés au CNRS** : le Centre d'études nucléaires de Bordeaux Gradignan (CNRS/Université de Bordeaux), le Centre de sciences nucléaires et de sciences de la matière (CNRS/Université Paris-Sud), l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (CNRS/Université de Strasbourg), l'Institut de physique nucléaire de Lyon (CNRS/Université Claude Bernard Lyon1), l'Institut de physique nucléaire d'Orsay (CNRS/Université Paris-Sud), le Laboratoire de l'accélérateur linéaire (CNRS/Université Paris-Sud), le Laboratoire de physique corpusculaire de Caen (CNRS/Unicaen/Ensicaen), le Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies (CNRS/UPMC/Université Paris Diderot), le Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (CNRS/Grenoble INP/Université de



Grenoble) et le Laboratoire de physique subatomique et des technologies associées (CNRS/Université de Nantes/Ecole des Mines de Nantes) ;

- **au CEA**, plusieurs laboratoires de la Direction de la recherche fondamentale et de la Direction des applications militaires sont impliqués aussi bien dans la conception des composants de Spiral2 que dans les programmes d'expériences.

D'autres services du CEA et laboratoires du CNRS ont apporté leurs expertises et leur soutien en particulier dans le domaine de la sûreté nucléaire et dans le développement du programme scientifique.

### Sur le plan international

Le Ganil a toujours eu une tradition d'accueil de physiciens étrangers : sa communauté scientifique se compose de près de 700 chercheurs qui y mènent régulièrement des expériences et assistent à des séminaires et colloques. De plus, 23 pays ont collaboré à Spiral2 : l'Allemagne, la Belgique, la Bulgarie, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, l'Espagne, les Etats-Unis, la Finlande, la Grèce, la Hongrie, l'Inde, Israël, l'Italie, le Japon, la Pologne, la République Tchèque, la Roumanie, le Royaume-Uni, la Russie, la Suède, la Suisse et la Turquie. Une vingtaine d'accords bilatéraux ont ainsi été signés depuis 2002.

### Les accélérateurs comparables à Spiral2 dans le monde

Différents pays ont lancé ces dernières années de grands projets pour la recherche en physique nucléaire. **Cinq accélérateurs complémentaires de Spiral2**, tant par le type de noyaux étudiés que par leurs modes de production sont en cours de construction :

- Air au Canada et HIE-Isolde au Cern qui devraient être finalisés courant 2017,
- Fair, le projet allemand mené par GSI, qui devrait être dédié à la physique nucléaire mais aussi à la physique hadronique et à la physique des particules, et Spes, le projet italien, seraient mis en service mi 2019,
- les États-Unis développent Frib qui devrait être opérationnel en 2022.

Le lancement en 2017 de Spiral2 ouvrira ainsi une ère nouvelle en recherche fondamentale et appliquée sur le noyau de l'atome, en permettant à la France d'occuper le devant de la scène internationale.



## II. L'INSTALLATION ET LES EQUIPEMENTS DE SPIRAL2

### L'accélérateur Spiral2 et les salles d'expériences

Spiral2 comprend un accélérateur linéaire de particules (le linac) pour des études de physique nucléaire fondamentale et des recherches interdisciplinaires ainsi que trois salles d'expériences baptisées NFS, S<sup>3</sup> et Desir. Cette installation produira des faisceaux uniques au monde, en particulier en termes d'intensité. Ce sont les interactions de ces faisceaux avec des cibles déterminées qui généreront les noyaux exotiques que les physiciens nucléaires veulent étudier.

L'installation compte 8 000 câbles représentant une longueur totale de 240 km et s'étend sur 7 200 m<sup>2</sup>, soit autant que les installations d'origine du Ganil. L'ensemble est enterré, pour des raisons de radioprotection, à environ 10 mètres de profondeur. La chaleur produite dans l'ensemble des équipements est dissipée dans six tours aéroréfrigérantes de 13 mètres de hauteur d'une capacité totale de 7,6 MW (1).

#### Les sources : générer des ions

Les opérateurs de Spiral2 disposent de deux sources différentes pour produire soit des ions légers (protons, deutons et particules alpha) soit des ions lourds (du carbone à l'uranium).

Chaque source dite ECR (Electron Cyclotron Resonance) est composée d'une cavité sous vide dans laquelle on injecte des atomes sous la forme d'un gaz (un gaz pur ou composé de plusieurs types d'atomes, ou une vapeur métal chauffée). La cavité est soumise à un fort champ de micro-ondes qui provoquent des collisions entre les électrons libres et les atomes de gaz, conduisant à l'ionisation des atomes du gaz. Particules chargées par excellence, les ions sont sensibles aux champs électrique et magnétique. À la sortie de la source ECR, leur énergie cinétique est alors, au maximum, de 60 keV (1).

#### Mettre en forme les ions sous la forme d'un faisceau, les accélérer et les guider

À la sortie de la source, les ions sont soumis à une série de champs électromagnétiques qui les regroupe par paquets et les accélère sur un parcours linéaire de 40 mètres : les ions passent d'abord, par une cavité en cuivre pur, dans un électroaimant à quatre pôles (dits « quadripôles ») dans lequel une onde radiofréquence les regroupe en paquets. Leur énergie cinétique peut monter jusqu'à 750 keV par unité de masse.

Ils sont ensuite accélérés en traversant 26 cavités supraconductrices composées de niobium qui portent leur énergie cinétique jusqu'à 40 MeV pour les deutons (33 MeV pour les protons).

Cet accélérateur produit des **faisceaux d'une puissance allant jusqu'à 200 kW** (1), bien supérieure à celle des faisceaux du Ganil actuel.

#### Les cryomodules

Les douze premiers cryomodules comprennent une cavité supraconductrice chacun, les sept suivants en comptent deux chacun. Les cavités sont le siège d'un champ électromagnétique intense nécessaire à l'accélération du faisceau d'ions. Les cryomodules ont été développés spécifiquement pour Spiral2 par les équipes du CEA et du CNRS expertes dans le domaine des cavités supraconductrices, les mêmes qui ont participé à la conception et à la mise au point des composants de l'accélérateur du LHC, au Cern.



## Refroidir les cavités supraconductrices

L'installation cryogénique de Spiral2 permet de maintenir les cavités des cryomodules dans l'état supraconducteur à une température de fonctionnement de  $-269^{\circ}\text{C}$ , proche du zéro absolu. Elle comprend un liquéfacteur d'hélium. Il utilise de l'azote liquide comme pré-refroidisseur et fonctionne avec des fluides et des échangeurs dans une enceinte à vide. Il a pour fonction de produire de l'hélium liquide à une température de 4,5 K pour alimenter les cryomodules et maintenir les cavités supraconductrices à leur température de fonctionnement.

## Guider le faisceau vers les salles d'expériences

Tout au long de leur parcours, dans le linac puis vers les salles d'expériences, le faisceau d'ions est focalisé par des aimants quadrupolaires et guidés par des aimants dipolaires. Le faisceau d'ions est transporté dans des tubes maintenus sous un vide très poussé ( $10^{-11}$  bar (3)).

## Les salles d'expériences

Spiral2 dispose de trois grandes salles comportant des dispositifs d'expérimentation.

- Neutrons : Les protons et les deutons accélérés par le linac peuvent générer des faisceaux de neutrons extrêmement intenses par réaction avec une cible ou bien interaction avec un convertisseur. L'installation NFS (Neutrons For Science) utilise ces neutrons pour des expériences de physique fondamentale et de nombreuses applications.
- Noyaux plus lourds que l'uranium : Le linac de Spiral2 accélérera des faisceaux d'ions stables de très haute intensité. Ces intensités inégalées ouvrent de nouvelles opportunités dans de nombreux domaines de la physique, notamment celui des noyaux très lourds et « super-lourds » n'existant pas sur Terre. Le séparateur  $S^3$  (Super Séparateur Spectromètre) est dédié à l'étude de ces noyaux.
- Coupler les faisceaux de Spiral + Spiral 2 : L'installation Desir (Désintégration, excitation et stockage des ions radioactifs) utilise les faisceaux de basse énergie issus de Spiral (faisant partie de l'installation d'origine du Ganil) et en provenance de  $S^3$  (ou plus tard du bâtiment de production de Spiral2). En combinant des techniques de spectroscopie, de spectrométrie de masse et de mesures à l'aide de pièges à ions, ces faisceaux permettent d'aborder des questions de physique nucléaire, de physique de l'interaction faible et d'astrophysique.

## Convertir le faisceau avant les expériences (Phase 2)

Dans la seconde phase du projet Spiral2, le complexe sera équipé d'une salle dite « bâtiment de production » permettant de coupler les installations Spiral2 et Spiral. Le faisceau du Linac de Spiral2, par irradiation d'une cible, produira des noyaux exotiques lourds et riches en neutrons (du zirconium au mercure) à basse énergie. Une source d'ions permettra ensuite d'ioniser et d'accélérer ces nouveaux noyaux, qui seront caractérisés, triés et transportés vers l'installation Desir ou vers l'installation Spiral existante pour y subir une post-accelération avant leur envoi dans les salles d'expériences.

## De Spiral à Spiral2

Le nouveau complexe scientifique est baptisé Spiral2 alors qu'il est basé sur un accélérateur linéaire. Il vient en complément de Spiral dont l'acronyme est « Système de production d'ions radioactifs accélérés en ligne », Spiral est le premier ensemble de production et d'accélération de noyaux exotiques construit en France (2001).



L'acronyme Spiral est aussi un clin d'œil à la forme de la trajectoire des ions radioactifs post-accélérés dans Cime, le cyclotron de Spiral. L'installation Ganil d'origine délivre des faisceaux d'ions lourds, du carbone à l'uranium.

Spiral2 permettra de **délivrer des faisceaux d'ions légers (protons, deutons, hélium...), et des ions lourds avec une intensité plus de 10 fois supérieure à celle disponible aujourd'hui**. Les intensités peuvent notamment aller jusqu'à 5 mA pour les faisceaux légers et 1 mA pour les ions lourds, ce qui placera l'installation parmi les plus performantes au monde.

## Le campus Jules Horowitz

Un pôle scientifique pluridisciplinaire s'est progressivement constitué autour du Ganil composant le campus Jules Horowitz. Après la constitution d'un pôle scientifique pluridisciplinaire « Interaction ion-matière autour du Ganil » et afin d'accentuer les synergies entre les différents domaines de recherche, le Ganil est partie prenante du projet de "Pôle d'excellence nucléaire régional" reposant sur le triptyque Industrie-Formation-Recherche de la Normandie.

- (1) Pour avoir une idée des ordres de grandeur des puissances dissipées, elle s'élève environ à 1kW pour un fer à repasser et à 10 W pour une ampoule d'éclairage. 1 kW = 1000 W. 1 MW = 1000 kW. Une puissance de 1 watt correspond à un flux d'énergie de 1 joule par seconde.*
- (2) Pour des particules élémentaires ou des ions, l'énergie est souvent exprimée en électron-volt (symbole eV). 1 électron-volt est l'énergie cinétique que subit un électron au repos sous l'effet d'un champ électrique de 1 volt. 1 keV = 1000 eV. 1 MeV = 1000 keV*
- (3) 1 bar correspond à la pression atmosphérique au niveau de la mer (altitude 0 m)*



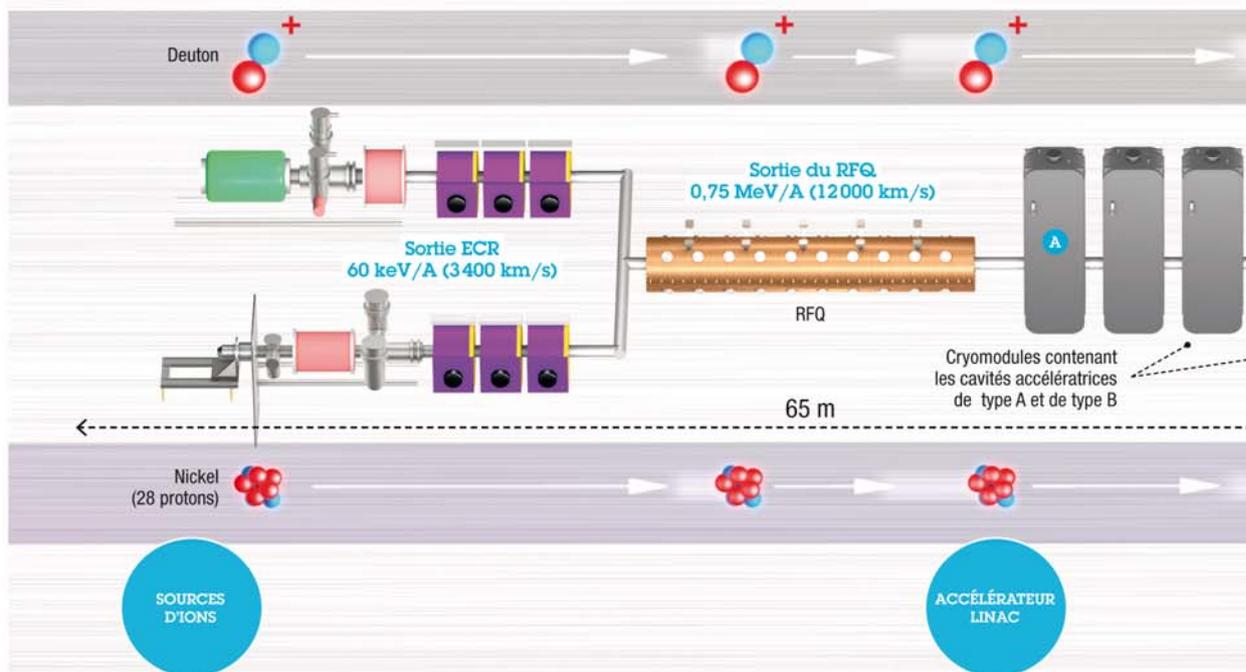
# Spiral2

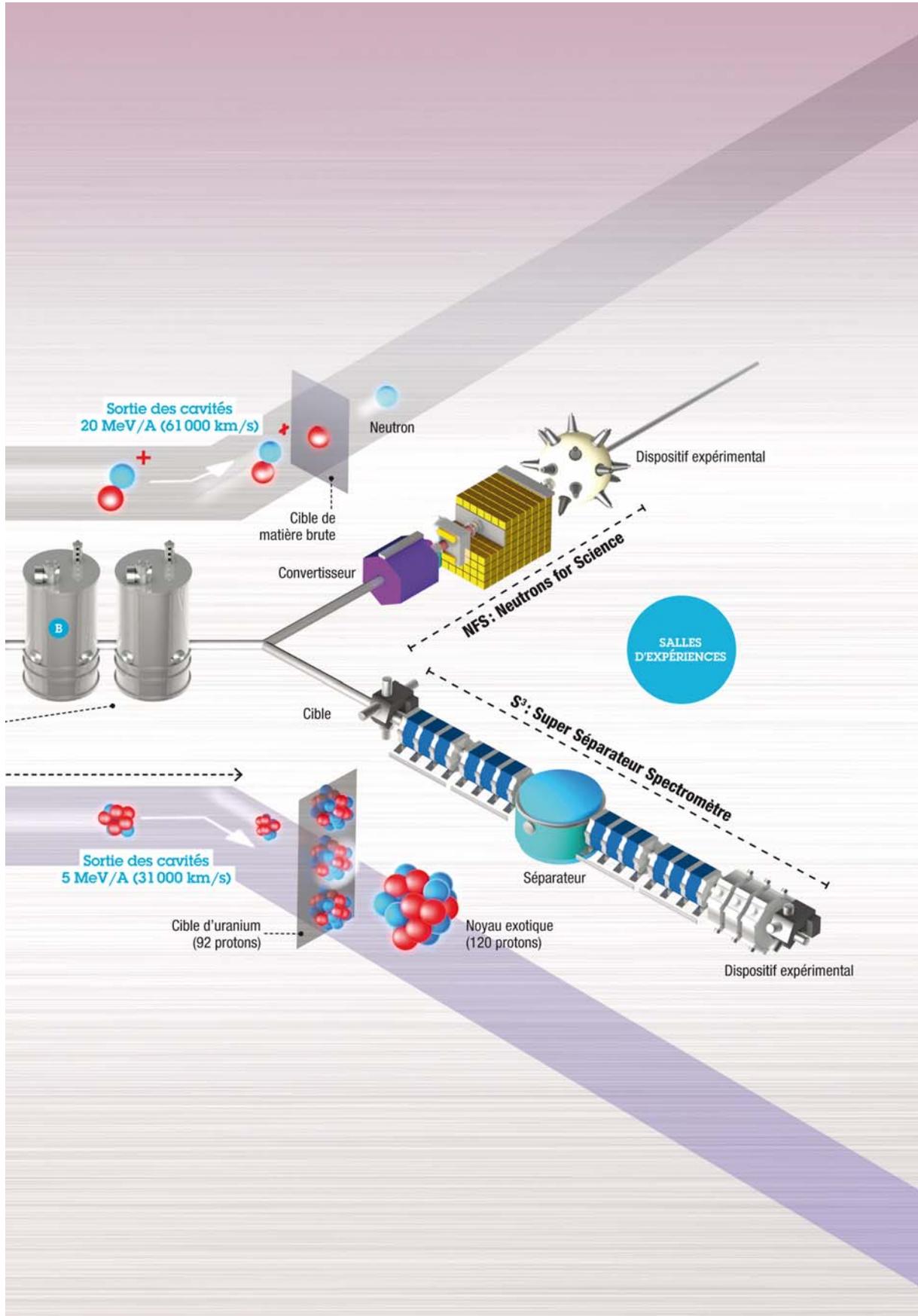
## PRINCIPE



Produits par deux sources d'ions, des faisceaux de particules chargées sont guidés et accélérés par les champs électriques et magnétiques d'un accélérateur linéaire, le Linac.

Ils sont ensuite acheminés dans des salles d'expériences où ils sont projetés sur des cibles de matière pour produire des neutrons ou des **noyaux exotiques** utilisés pour des études en physique fondamentale et appliquée.





### III. LES FUTURES PHASES DE DEVELOPPEMENT DU PROJET

#### Calendrier et financement

##### Les prochaines échéances-clés

**Second semestre 2017** : Début des expériences dans NFS qui délivrera des faisceaux de neutrons très intenses et énergétiques

**Mi 2018** : Début des expériences dans S<sup>3</sup> et fin de la phase 1

**2022** : Mise en service de Desir, la troisième salle d'expériences de Spiral2

**Après 2025** (sous réserve de financement) : Mise en service de la phase 2 de Spiral2 (bâtiment dit « de production »)

Les trois grandes étapes (sur le schéma ci-dessous, l'installation Spiral2 est en violet ; Spiral en blanc) :

- phase 1 (accélérateur, NFS et équipex S<sup>3</sup>) : mise en service seconde semestre 2017 – mi 2018
- phase 1+ (incluant l'équipex Desir) : mise en service 2022
- phase 2 : reportée après 2025

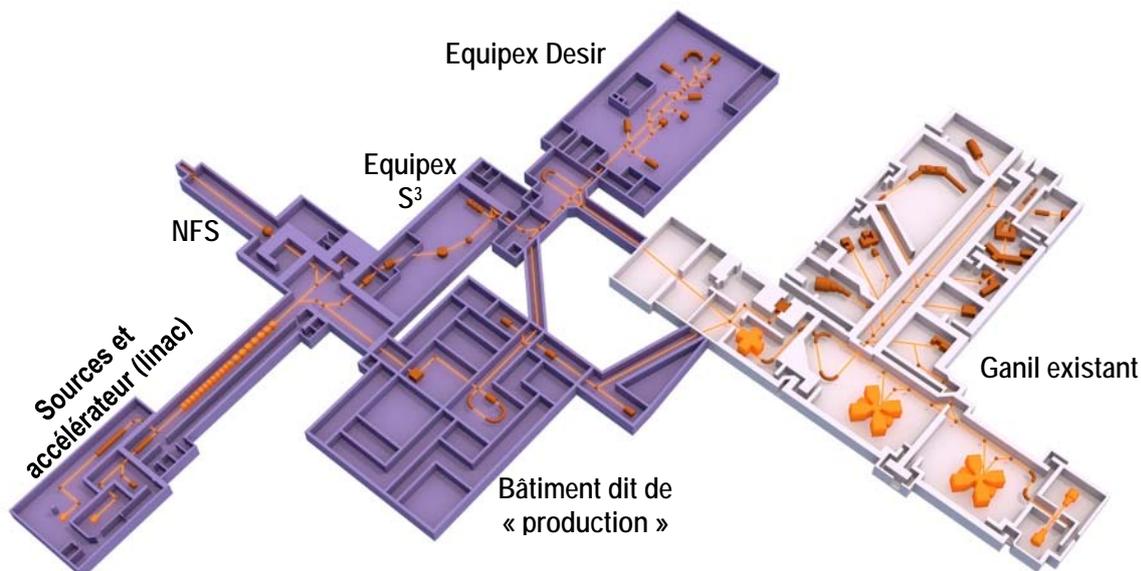


Schéma des installations Spiral2 (en violet) et Spiral (en blanc) © Unik studio.



## Budget

D'un total dépassant les 138,5 millions d'euros, le budget permettant le financement de la phase 1 et de l'équipex Desir dans Spiral2 (il n'inclut pas la phase 2) est ainsi réparti :

CNRS et CEA	38,66 M€
PIA1 (Equipex S <sup>3</sup> et DESIR)	17 M€
Conseil régional Normandie	28,18 M€
Conseil départemental du Calvados	12,84 M€
Communauté d'agglomération Caen la mer	5,56 M€
Ville de Caen	2,80 M€
CPER 2007-2013	2,28 M€
CPER 2015-2020	4,65 M€
CPIER 2015-2020	1,5 M€
7 <sup>e</sup> PCRD (Europe)	1,04 M€
GSI/FAIR (Allemagne)	16,40 M€
Autres (Inde, Suède, Belgique, Pologne, Rep. Tchèque, Allemagne, USA, Roumanie)	1 M€
Ganil	6,585 M€
<b>TOTAL</b>	<b>138,5 M€</b>

À ce montant, il faut ajouter la main d'œuvre fournie par le CNRS et le CEA, évaluée à 60 M€.

## Desir, l'installation basse énergie de Spiral2

Mis en service en 2022, Desir, dont l'acronyme signifie « Désintégration, excitation et stockage d'ions radioactifs », sera une grande salle d'expériences alimentée par les faisceaux de basse énergie issus de Spiral et Spiral2. En combinant des techniques de spectroscopie, de spectrométrie de masse et de mesures à l'aide de pièges à ions, ces faisceaux permettent d'aborder des questions de physique nucléaire, de physique de l'interaction faible et d'astrophysique.

Desir combinera ainsi des techniques innovantes de piégeage d'ions d'une sélectivité impressionnante permettant de préparer des faisceaux d'ions radioactifs ultra-purs à des dispositifs permettant d'étudier leur interaction avec des lasers et d'observer leurs modes de transformation. L'objectif est d'obtenir des informations inédites et ultra précises sur les propriétés fondamentales du noyau atomique.

Desir exploitera la très grande variété des faisceaux d'ions stables et radioactifs produits par les installations Spiral et Spiral2. Outre les avancées scientifiques attendues en matière de compréhension du noyau atomique, les recherches effectuées seront appliquées aux domaines de la production d'énergie, en caractérisant notamment les propriétés de décroissances des produits de la fission de l'uranium, et à l'étude des matériaux. Elles devraient également ouvrir de nouvelles perspectives en matière de valorisation industrielle.



## Spiral2 : phase 2

La phase 2 de Spiral2 permettra de produire des faisceaux d'ions radioactifs légers, ou riches en neutrons, à des intensités telles qu'une fois post-accélérés ils pourront être utilisés comme projectiles pour produire des noyaux plus exotiques encore.

Les faisceaux d'ions radioactifs légers, particulièrement utiles aux études d'astrophysique nucléaires, seront produits dans le bâtiment de production à l'aide des faisceaux d'ions stables très intenses de l'accélérateur linéaire (linac) de Spiral2. Les faisceaux d'ions radioactifs riches en neutrons seront eux produits en provoquant la fission de l'uranium à l'aide de neutrons, générés comme dans NFS par conversion d'un faisceau intense de deutons délivré par le linac.



## IV. L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PROJET

### *Risques radiologiques*

Les expériences menées au Ganil, et ce sera le cas aussi avec Spiral2, produisent des réactions nucléaires et des rayonnements ionisants. Cependant, les quantités de matière radioactive mises en œuvre sont extrêmement faibles (des milligrammes).

Lors du fonctionnement des accélérateurs de particules, l'interaction des particules accélérées avec les équipements interceptifs et les cibles d'expériences engendre d'intenses rayonnements ionisants. Les risques liés au faisceau ont donc des conséquences potentielles immédiates très élevées si une personne se trouve à proximité du faisceau pendant son fonctionnement mais *a contrario* ce risque majeur disparaît instantanément en arrêtant le faisceau. C'est pourquoi toutes les salles dans lesquelles circule le faisceau sont interdites aux opérateurs et expérimentateurs : leur accès est verrouillé tant que le faisceau est présent. De plus, l'ensemble des installations (accélérateurs, ligne de transport et dispositifs expérimentaux) est entouré de protections, en béton et en plomb, comme c'est le cas sur d'autres accélérateurs de particules, comme ceux du Cern, à Genève, ou du synchrotron Soleil, à Paris-Saclay. Enfin, les salles de Spiral2 dans lesquels le faisceau circule sont enterrées à environ 10 mètres de profondeur.

Un ensemble de contacteurs, d'alarmes et de détecteurs de rayonnement permettent de surveiller l'installation en permanence, depuis la salle de contrôle de Spiral2.

Certains équipements sont activés sous l'effet du faisceau, en particulier les « arrêts faisceau » ou certaines cibles utilisées dans les expériences. Ils présentent donc une radioactivité rémanente (c'est-à-dire qui reste présente après l'arrêt du faisceau). La gestion des accès à ces équipements fait l'objet d'un suivi strict qui implique, comme pour toute source radioactive, la mise en œuvre de protections radiologiques qui atténuent le flux de rayonnement, la réalisation de contrôles radiologiques préalables par du personnel qualifié en radioprotection, ainsi que la surveillance systématique de l'ambiance radiologique dans les locaux concernés par un réseau dense d'équipements de mesure.

L'ensemble des installations du Ganil (y compris Spiral2) relève du régime des Installations nucléaires de base (INB) et est, à ce titre, contrôlé par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). L'ensemble des mesures, des procédures et des équipements liés à la sûreté nucléaire et à la radioprotection fait l'objet d'études et de contrôles validés par l'ASN pour toutes les phases de vie de l'installation depuis la conception, avant la mise en service de l'installation et pendant son exploitation jusqu'à son démantèlement. Une Commission locale d'information pilotée par le Conseil départemental du Calvados, avec la participation des représentants des communes environnantes, est en place depuis le 29 décembre 2008. Elle assure une mission générale de suivi, d'information et de concertation auprès du public concernant les activités du Ganil.



Vue modélisée des bâtiments en surface de Spiral2 © Ganil.

#### *Risques environnementaux et sanitaires*

Le projet Spiral2 a fait l'objet d'une étude d'impact environnementale et sanitaire. Celle-ci conclue que « les impacts liés à la construction puis à l'exploitation du futur Ganil, constitué par les installations d'origines et par le projet Spiral2, seront très faibles et ne sont pas de nature à apporter des nuisances ».

Le Ganil dispose d'une autorisation de rejets d'effluents radioactifs et chimiques délivrée par l'ASN. Le laboratoire met en œuvre un plan de surveillance de l'environnement comprenant des mesures périodiques de la radioactivité et de certains polluants chimiques sur des échantillons prélevés dans l'environnement direct de l'installation.

L'impact radiologique annuel en fonctionnement normal de l'installation sur la population la plus exposée est inférieur à 4  $\mu\text{Sv}$ . Ce chiffre est plus de 100 fois inférieur à la limite réglementaire d'exposition du public fixée à 1000  $\mu\text{Sv}$  (soit 1 mSv) par an en France (code de la santé public). Ce chiffre peut aussi être comparé à l'exposition naturelle moyenne en France qui est d'environ 2400  $\mu\text{Sv}$  (2,4 mSv) par an.

#### *Sécurité conventionnelle*

Le Ganil, y compris Spiral2, est soumis à la réglementation générale de toute installation industrielle en ce qui concerne les risques conventionnels : risques d'origine électrique, mécaniques, cryogéniques, etc.



## V. L'IMPACT SOCIO-ECONOMIQUE ET LA VALORISATION DES RECHERCHES A SPIRAL2-GANIL

### *Applications industrielles*

Les premières applications industrielles des faisceaux du Ganil datent de 1988 avec les premières expériences de production de membranes microporeuses par irradiation de films polymères par des ions lourds et les premiers tests de tenue à l'irradiation de composants électroniques. Des entreprises du domaine de l'aérospatial ont également développé des programmes de R&D et de certification de composants grâce aux faisceaux du Ganil.

Un des objectifs du Ganil est d'augmenter le temps de faisceau mis à la disposition des industriels, sans réduire la part dédiée à la recherche fondamentale et à la R&D. Spiral2 va permettre d'accroître la capacité d'accueil d'expériences industrielles ou d'étendre le spectre de ces applications.

Par exemple, grâce à Spiral2, la R&D sur les radioisotopes innovants pour le domaine biomédical et la caractérisation de composants et matériaux soumis à des irradiations (aérospatial, fusion, etc...) va bénéficier de faisceaux intenses d'ions légers et de faisceaux de neutrons rapides.

### *Membranes microporeuses*

Les faisceaux d'ions du Ganil peuvent être utilisés pour créer des défauts contrôlés dans les films polymères, dans le but de fabriquer des membranes microporeuses (applications de filtration, en particulier dans le domaine biomédical et agroalimentaire). Le laboratoire a mis au point, en partenariat avec une entreprise belge, un équipement qui permet de produire 100 m<sup>2</sup> de membrane par heure. Les utilisateurs sont essentiellement des entreprises allemandes, belges, suédoises et chinoises.

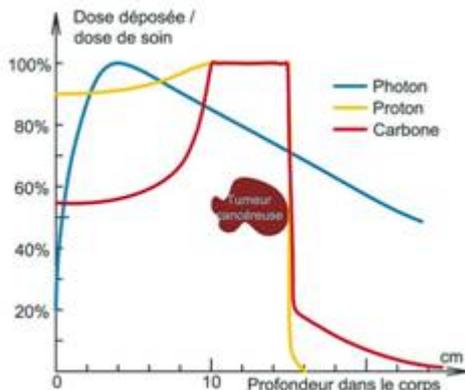
En 2015, une société biomédicale chinoise a lancé un programme de développement en vue de la production en grande quantité de membranes microporeuses au Ganil.

### *Hadronthérapie*

Depuis 2013, le Ganil consacre 150 à 180 heures par an à la R&D liée à la recherche en hadronthérapie (soin des cancers par des faisceaux de protons ou d'ions carbone). Par rapport à la radiothérapie par rayons X, gamma ou électrons, l'hadronthérapie doit permettre de renforcer l'irradiation des cellules tumorales tout en épargnant les tissus sains.

Lorsqu'on irradie un tissu vivant avec des électrons, rayons X ou gamma, l'énergie du faisceau est déposée tout au long de son parcours dans le tissu. Avec les ions comme les protons ou le carbone, la majeure partie de l'énergie est déposée à une profondeur dans le tissu qui dépend de l'énergie initiale du faisceau. Il est donc possible de traiter des tumeurs profondes en réduisant les dommages aux tissus sains. Les recherches menées au Ganil (dans le cadre du projet France-Hadron) visent à qualifier la méthode (radiobiologie, physique nucléaire, dosimétrie) en vue de son utilisation en recherche et en médecine.

Un centre baptisé Archade, dédié à la recherche en hadronthérapie, est en construction à proximité de Ganil. En lien direct avec le centre anti-cancer François Baclesse, il a pour objectif de faire émerger une filière, en Normandie, pour la conception et la commercialisation des dispositifs de hadronthérapie. La France est dotée de deux centres de traitement des cancers par faisceaux de protons (à Orsay et à Nice) mais ne dispose pas de centre de recherche pour le traitement par des faisceaux de carbone qui présentent l'avantage, par rapport aux protons, de concentrer encore plus l'énergie déposée dans la tumeur et pas dans les tissus superficiels.



*Schématisation des dépôts d'énergie de faisceaux en fonction de la profondeur de tissu irradié. Le dépôt d'énergie pour les photons (X ou gamma) est progressive, alors que pour les protons, et encore plus pour les ions carbone, le dépôt est maximal en profondeur, évitant de « brûler » les tissus superficiels à une tumeur © France Hadron.*

#### *R&D et qualification de composants pour le domaine spatial*

De nombreuses entreprises utilisent les faisceaux du Ganil pour tester la résistance au rayonnement de certains composants électroniques utilisés dans les véhicules spatiaux : Airbus/Atmel, Cnes, EADS, Esa, Infineon, Jaxa, ST Microelectronics.

#### *Industrie nucléaire*

Le Ganil est membre du Centre normand pour la science nucléaire et ses applications dans les domaines de l'énergie et de la santé "Nucleopolis", créé en 2010. Nucleopolis est un pôle de compétitivité qui compte des sociétés industrielles du nucléaire, des laboratoires de recherche et des établissements d'enseignement supérieur. Il a pour vocation de favoriser le développement économique par l'innovation, par l'amélioration des compétences et par la compétitivité des PME.

#### *Radionucléides pour le diagnostic, la thérapie et la recherche biomédicale*

Depuis 2014, le Ganil conduit des programmes de R&D sur la production de radionucléides qui peuvent être inclus dans des molécules biologiquement actives (des produits radiopharmaceutiques) utiles pour la recherche mais aussi en milieu clinique. Spiral2 permettra de fournir, pour ces projets, des faisceaux de protons, de deutons et d'ions lourds plus intenses que ceux dont les chercheurs disposent aujourd'hui.

#### *Transfert de technologies*

Le Ganil conduit avec ses partenaires industriels plusieurs transferts de technologie comme par exemple sur les sources d'ions (nombreuses applications : recherche, implantation ionique, développement de nouveaux matériaux, hadronthérapie, radioisotopes...) et d'autres technologies innovantes.

#### *Création d'entreprises*

Le Ganil est membre fondateur de l'incubateur d'entreprises "Normandie Incubation", en collaboration avec l'université de Normandie et l'Ecole d'ingénieurs Ensicaen. Normandie Incubation est financé par le Conseil régional de Normandie, le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et l'Union européenne (FEDER). Entre 2000 et 2014, Normandie Incubation a soutenu 85 projets de recherche qui ont conduit à la création de 66 entreprises et 365 emplois dans la région.



## VI. LES PARTENAIRES

Partenaires scientifiques : CNRS et CEA

Projet également fortement soutenu par :



*Liberté • Égalité • Fraternité*  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



UNION EUROPEENNE

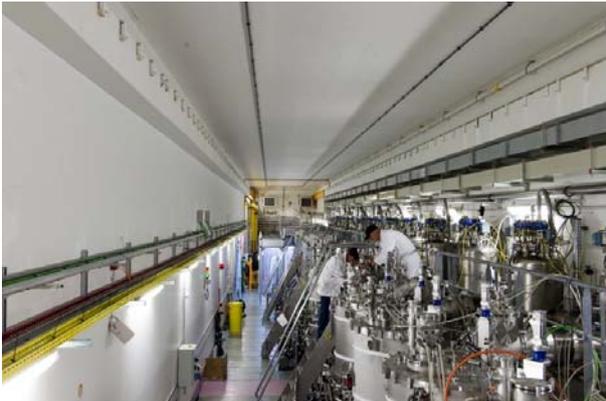


RÉGION  
NORMANDIE

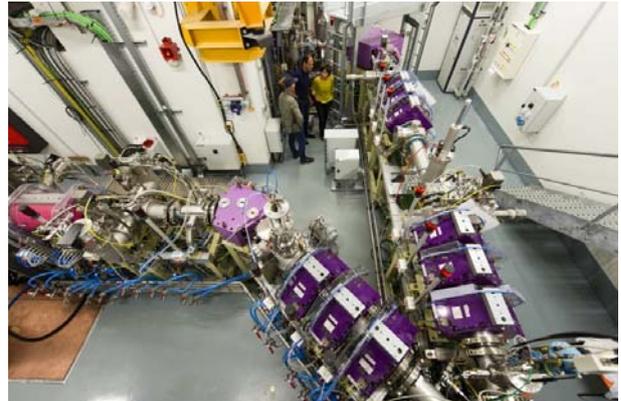


## VII. QUELQUES VISUELS DISPONIBLES

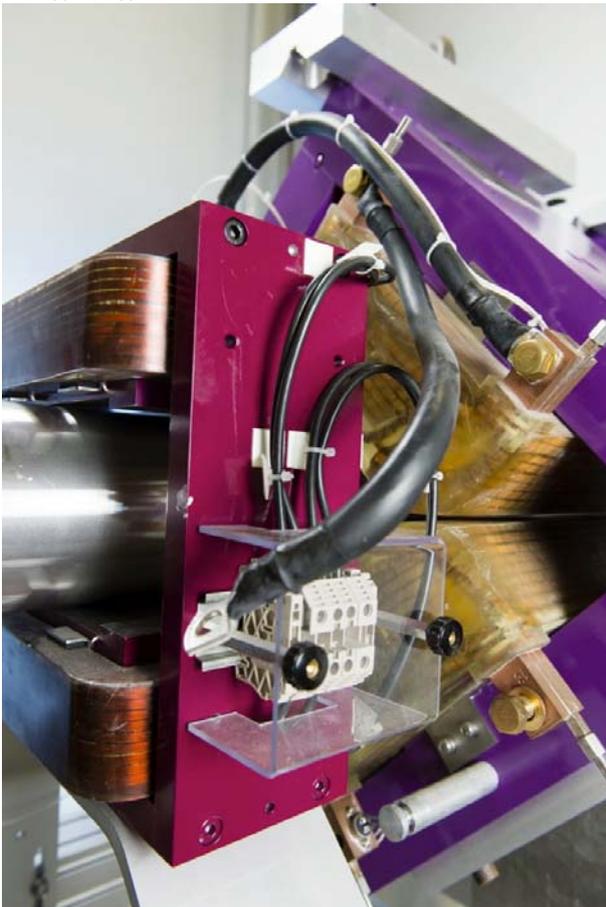
*D'autres visuels sont disponibles gratuitement pour la presse, sur demande auprès des services de presse CNRS et CEA.*



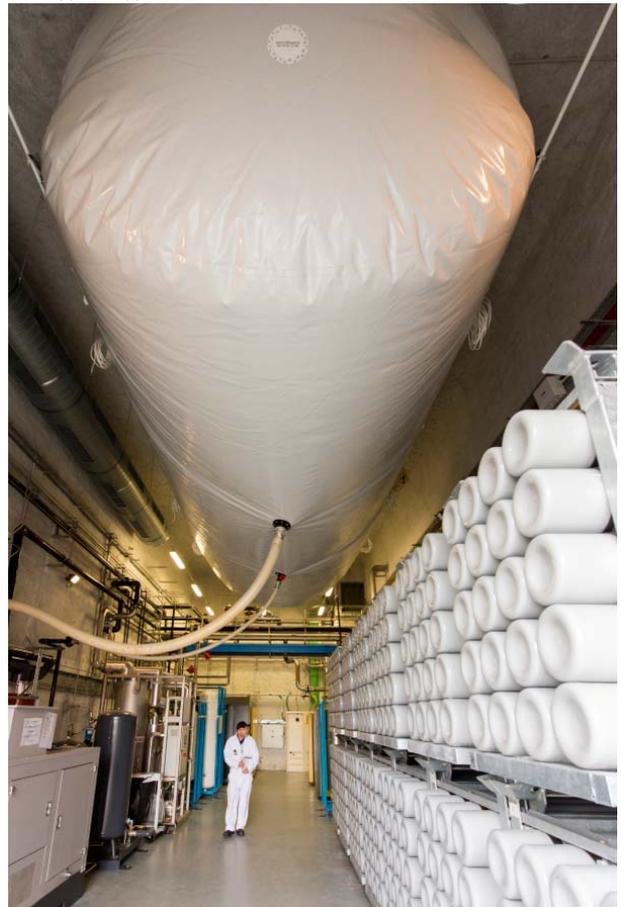
Vue du Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2 avec ses cryomodules supraconducteurs renfermant des cavités accélératrices.  
© Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Salle source de deutons / protons de Spiral2 (Système de production d'ions radioactifs en ligne de 2e génération).  
© Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Salle d'expérience NFS (Neutrons for science) en cours de montage à Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Usine cryogénique produisant de l'hélium liquide pour alimenter le Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Usine cryogénique produisant de l'hélium liquide pour alimenter le Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Vue du Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Vue d'une partie de la Ligne de transport haute énergie (LHE) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Vue d'une partie de la Ligne de transport haute énergie (LHE) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Bâtiment Spiral2 à Caen. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Bâtiment Spiral2 à Caen. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Cryomodules supraconducteurs renfermant les cavités accélératrices du Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Cryomodules supraconducteurs renfermant les cavités accélératrices du Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Cavité en cuivre pur RFQ (Radio Frequency Quadrupôle) dans le grand hall du Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Cavité en cuivre pur RFQ (Radio Frequency Quadrupôle) dans le grand hall du Linac (LINear ACcelerator) de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Poste de commande déporté (PCD) de Spiral2.  
© Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Salle haute fréquence de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



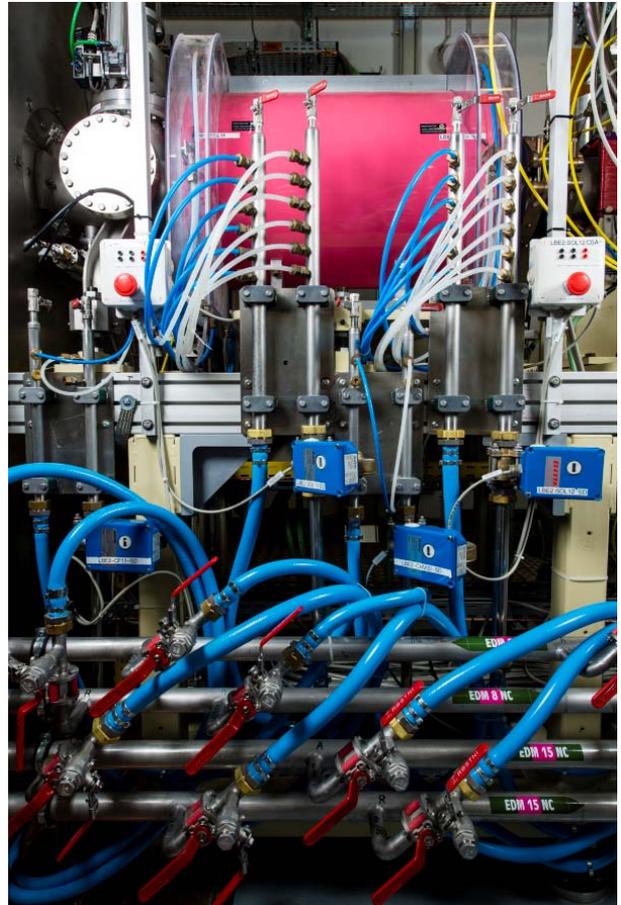
Vue des sources d'ions lourds et de deutons / protons de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Vue des sources d'ions lourds et de deutons / protons de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Vue des sources d'ions lourds et de deutons / protons de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Vue des sources d'ions lourds et de deutons / protons de Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS



Salle d'expérience NFS (Neutrons for science) en cours de montage à Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS

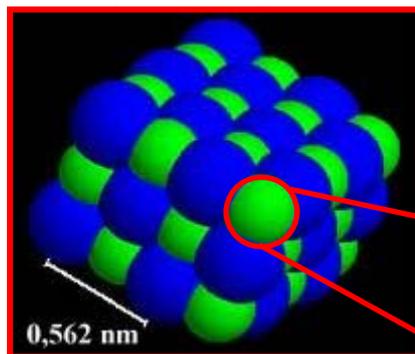


Salle d'expérience NFS (Neutrons for science) en cours de montage à Spiral2. © Philippe Stroppa/CEA/CNRS

## VIII. LEXIQUE

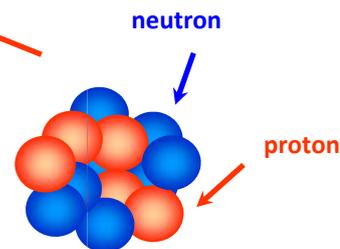
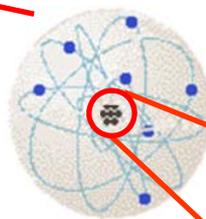
### Atome

Constituant élémentaire de la matière, qui est constitué d'un cœur de nucléons (protons et neutrons), entouré d'électrons.



Exemple du cristal de sel : un arrangement régulier d'atomes de sodium et de chlore.

L'atome : un cœur compact (le noyau) entouré d'électrons



Le noyau atomique : un ensemble de protons et de neutrons (protons et neutrons sont des nucléons)

### Électron

Particule fondamentale ponctuelle (son diamètre est considéré comme nul), d'une masse  $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$  kg, portant une charge  $-e$  ( $e$  étant la charge élémentaire)  $= -1,602 \times 10^{-19}$  C.

### Nucléon (proton ou neutron)

Les nucléons sont les composants des noyaux atomiques. Le proton est chargé électriquement, le neutron est neutre. C'est le nombre de protons qui définit la charge du noyau et donc l'élément (hydrogène pour 1 proton, carbone pour 6, silicium pour 14, etc.). La somme des nombres de protons et de neutrons donne le numéro atomique total  $A$ , qui définit la masse du noyau. Les nucléons sont des hadrons (ils sont faits de quarks) et plus précisément des baryons (ils comportent 3 quarks).

### Neutron

Électriquement neutre (comme son nom l'indique), il entre (avec le proton) dans la composition des noyaux atomiques, de masse  $m_n = 1,6749 \times 10^{-27}$  kg.

### Noyau

« Cœur » de l'atome, formé de nucléons de deux types : les protons et les neutrons.



### Proton

Il rentre (avec le neutron) dans la composition des noyaux atomiques, de diamètre  $d_p = 0,8 \times 10^{-15}$  m, de masse  $m_p = 1,6725 \times 10^{-27}$  kg et portant une charge  $+e = 1,602 \times 10^{-19}$  C. Les neutrons et les protons ne sont pas des particules élémentaires. On sait aujourd'hui qu'ils sont formés de quarks.

### Quark

Constituants ultimes des noyaux atomiques.

Les quarks s'assemblent pour former les hadrons, comme le neutron et le proton, qui forment la matière stable. Ils interagissent par les forces forte, faible et électromagnétique. La force forte, dite de couleur, interdit qu'ils se trouvent à l'état libre. Ils apparaissent toujours par groupes de deux (quark-antiquark) pour faire des mésons, tous instables, ou par groupe de trois pour faire des baryons (comme le proton et le neutron).