



# Les activités Accélérateurs de particules en France

# Les accélérateurs en chiffres

**+30 000**  
**accélérateurs**  
**de particules**

en opération à travers le monde

**+24 000**  
**patients traités**

par hadronthérapie en Europe

**+30 000**  
**produits finis**

fabriqués, stérilisés ou inspectés par an, à l'aide d'accélérateurs industriels dans le monde

**98%**  
**des doctorants**

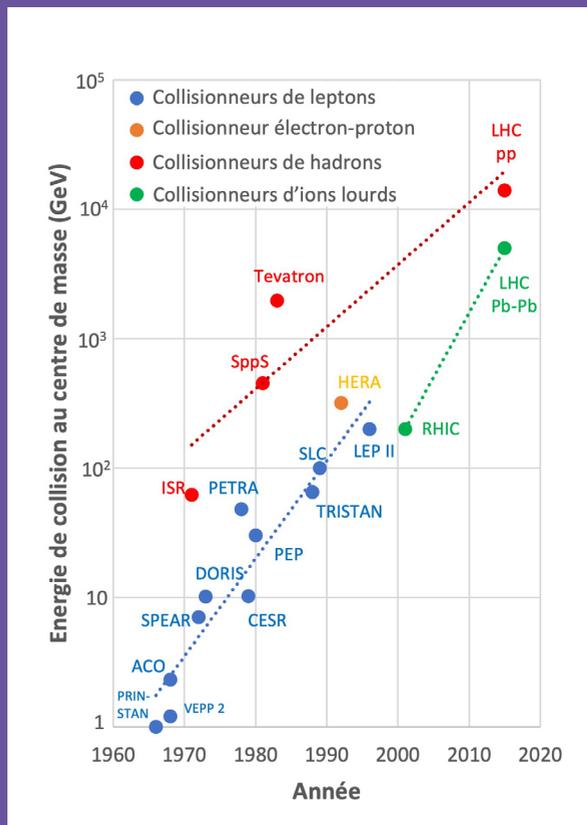
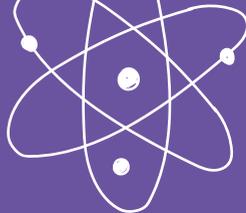
du domaine des accélérateurs trouvent un emploi directement après leur thèse

**+5000**  
**emplois en France**

en relation avec les accélérateurs dont environ 2 000 emplois dans une trentaine de sociétés (grands groupes et PME)

**1/3**  
**des Prix Nobel**  
**de Physique**

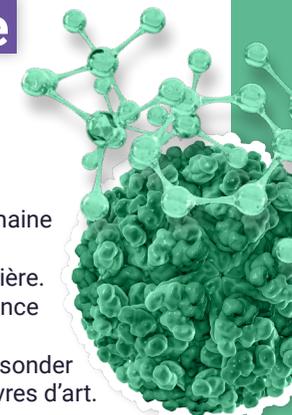
récompensés pour des travaux de recherche utilisant les accélérateurs



# Des instruments pour la science et pour la vie quotidienne

## » Recherche

- Les accélérateurs contribuent à l'étude d'événements rares dans le domaine de la physique des particules et de la physique nucléaire.
- La collision entre particules permet d'étudier les constituants de la matière. C'est au CERN, sur le LHC (Large Hadron Collider) qu'a été mis en évidence le boson de Higgs.
- Le rayonnement synchrotron peut être utilisé comme microscope pour sonder et analyser les matériaux, les cristaux, les semi-conducteurs ou les œuvres d'art. La lumière synchrotron contribue à élucider la structure 3D des protéines comme celle du virus Chikungunya.
- L'irradiation de cibles par un faisceau de particules permet la production de neutrons, de sonder les matériaux mais aussi l'analyse neutronique et la production d'isotopes radioactifs destinés à la médecine nucléaire.



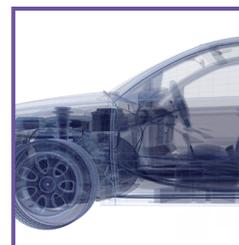
## Santé & Médecine

- Traitement des cancers
- Production de radio-nucléides pour l'imagerie médicale
- Recherche sur les maladies émergentes
- Recherche sur la résistance aux antibiotiques



## Industrie & Agroalimentaire

- Implantation d'ions pour l'électronique
- Durcissement de surfaces et de matériaux
- Soudage et découpe
- Traitement de déchets et du matériel médical
- Stérilisation



## Analyse & Contrôle des matériaux

- Patrimoine culturel
- Authentification d'œuvres d'art
- Inspection du fret
- Sécurité

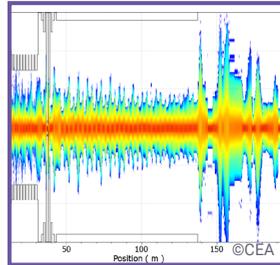
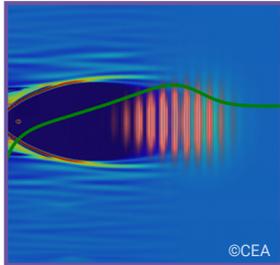
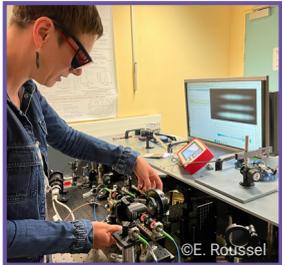
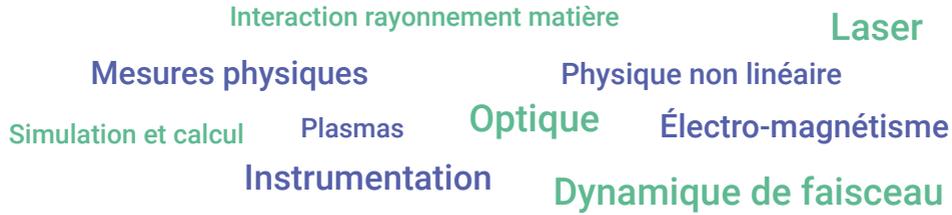


## Perspectives

- Énergie nucléaire plus propre et plus sûre
- Technologies pour la fusion
- Efficacité énergétique
- Batteries vertes

# Les domaines des accélérateurs

## » Physique des faisceaux



## » Domaines technologiques



# Formations spécialisées Accélérateurs

## » Master M2 Grands Instruments - Plasmas Lasers Accélérateurs Tokamaks (GI-PLATO), (Université Paris-Saclay)

Formation en science et physique fondamentale pour les grandes installations de recherche et les technologies associées : accélérateurs, lasers intenses, sources de rayonnement, tokamaks. Possibilité de participer à un Erasmus Mundus Consortium, appelé Lascala (Large Scale Accelerators and Lasers) réunissant quatre universités européennes : La Sapienza (Italie), Université de Szeged (Hongrie), Université de Lund (Suède) et Université Paris-Saclay (coordinateur).

## » JUAS (Joint University Accelerator School)

Formation pour les étudiants en sciences, technologies et applications des accélérateurs de particules. Deux cours de 5 semaines sont organisés chaque année par l'Institut Scientifique Européen (ESI).



**12 thèses de doctorat**  
**soutenues en moyenne par an**



juas  
Joint University Accelerator School



MASTER  
G.I.P.L.A.T.O



...ainsi que École des Accélérateurs IN2P3, Formations INSTN CAMARI, École IN2P3 d'instrumentation du «détecteur à la mesure», CERN Accelerator School (CAS)...

# Quatre grands complexes d'accélérateurs en France



01 - GANIL (Caen)

©GANIL\_DRAKODRONE - Olivier Navès

## Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (depuis 1976)

- Dédié à la recherche et aux applications industrielles utilisant des faisceaux d'ions
- SPIRAL2 : accélération H<sup>+</sup> (33 MeV, 165 kW), D<sup>+</sup> (40 MeV, 200 kW) et ions (intensités 10-100x plus élevées que sur les cyclotrons)
- 5 cyclotrons, 5000 heures de faisceau par an
- 3 faisceaux en parallèle, de 1 à 95 MeV/Nucléon, <sup>12</sup>C à <sup>238</sup>U

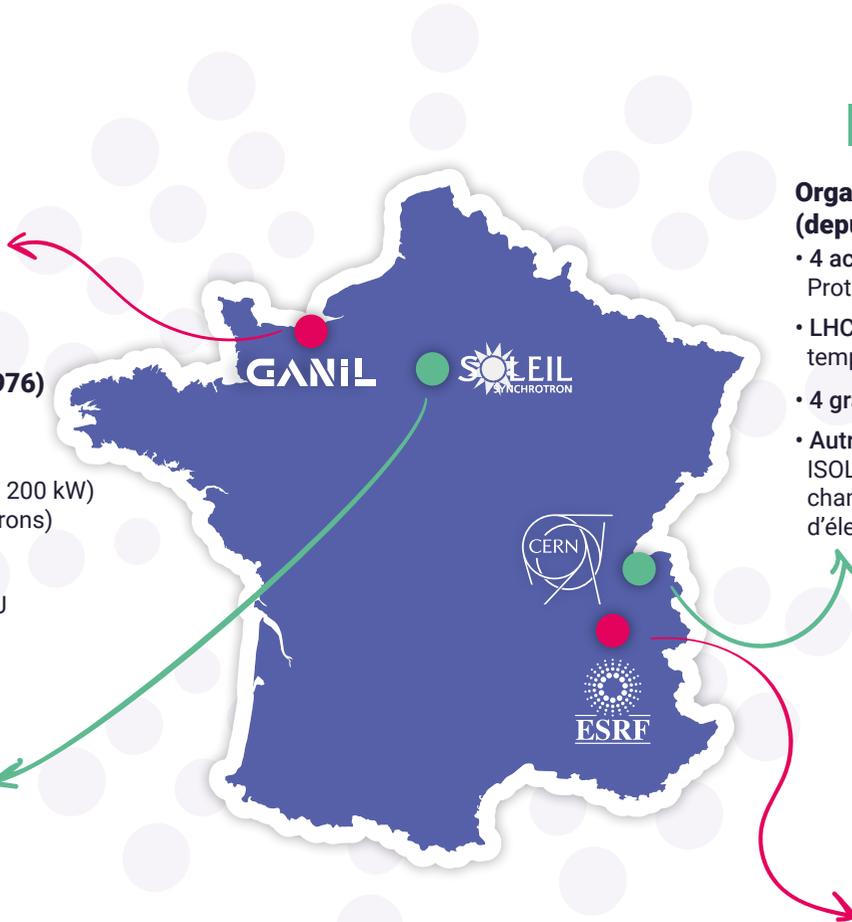


02 - SOLEIL (Saint-Aubin)

©Soleil

## Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE (depuis 2006)

- Source de lumière synchrotron de 3<sup>e</sup> génération
- Linac 100 MeV
- Booster 3 Hz
- Anneau de stockage 2,75 GeV, circonférence 354 m
- Emittance horizontale 3,7 nm.rad (upgrade 82 pm.rad)
- 29 lignes de lumière



03 - CERN (Genève-Prévessin)

©CERN

## Organisation européenne pour la recherche nucléaire (depuis 1954)

- 4 accélérateurs principaux : Linac 4, PSB : PS Booster, PS : Proton Synchrotron, SPS : Super Proton Synchrotron
- LHC : Large Hadron Collider 6,8 TeV, circonférence 27 km, température -271°C
- 4 grands détecteurs : ALICE, ATLAS, CMS et LHCb
- Autres machines : AD/ELENA : Décélérateur d'antiprotons, ISOLDE : Séparateur d'isotopes, AWAKE : Accélération par champ de sillage plasma, CLEAR : Accélérateur linéaire d'électrons



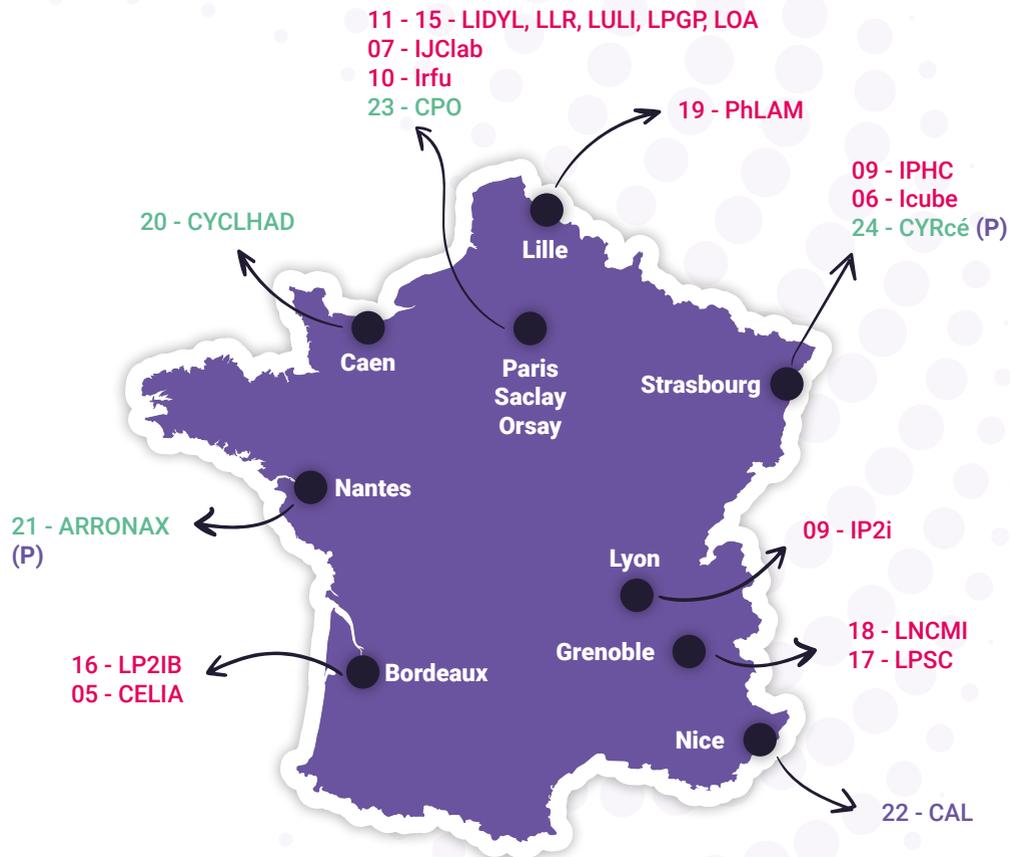
04 - ESRF (Grenoble)

©ESRF

## Installation européenne de rayonnement synchrotron (depuis 1989)

- Source de lumière synchrotron de 4<sup>e</sup> génération
- Linac 200 MeV
- Booster 4 Hz
- Anneau de stockage 6 GeV, circonférence 844 m
- Emittance horizontale 133 pm.rad
- 49 lignes de lumière

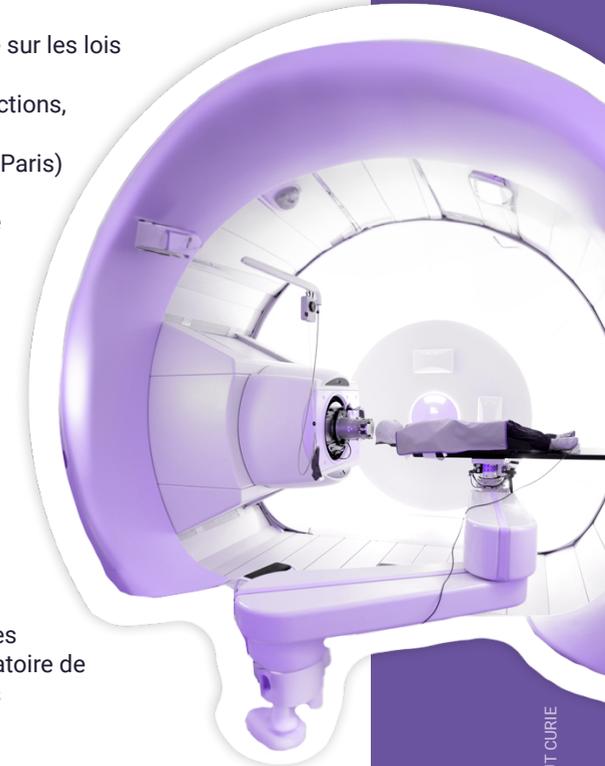
# Une recherche française riche et variée



■ Laboratoire / Instituts  
■ Santé  
■ (P) Plateformes

## » Laboratoires / Instituts

- 05 - CELIA** (UMR CNRS/Univ. Bordeaux) Centre Lasers Intenses et Applications
- 06 - Icube** (UMR CNRS/Univ. Strasbourg) Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie
- 07 - IJCLab** (UMR CRNS/Univ. Paris-Saclay) Laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie
- 08 - IP2I** (UMR CNRS/Univ. Lyon) Institut de Physique Nucléaire de Lyon
- 09 - IPHC** (UMR CNRS/Univ. Strasbourg) Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 10 - Irfu** (CEA-Saclay) Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers
- 11 - LIDYL** (CEA-Saclay) Laboratoire Interactions, Dynamiques et Lasers
- 12 - LLR** (UMR CNRS/Ecole Polytechnique Paris) Laboratoire Leprince-Ringuet
- 13 - LULI** (UMR CNRS/École Polytechnique -CEA-Univ. Sorbonne) Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses
- 14 - LPGP** (CNRS/Orsay) Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas
- 15 - LOA** (UMR CNRS/École Polytechnique -ENSTA Paris) Laboratoire d'Optique Appliquée
- 16 - LP2I** (UMR CNRS/Univ. Bordeaux) Laboratoire de Physique des Deux infinis
- 17 - LPSC** (UMR CNRS/Univ. Grenoble) Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie
- 18 - LNCMI** (CNRS/Grenoble) Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
- 19 - PhLAM** (UMR CNRS/Univ. Lille) Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules



## » Accélérateurs pour la santé

- 20 - CYCLHAD** (Caen) Centre d'hadronthérapie – Cyclotron
- 21 - ARRONAX (P)** (Nantes) Cyclotron haute intensité C70
- 22 - CAL** (Nice) Centre de protonthérapie – Centre Antoine Lacassagne
- 23 - CPO** (Orsay) Centre de protonthérapie – Institut Curie
- 24 - CYRCé (P)** (Strasbourg) CYclotron pour la RecherChe et l'enseigneMent

# Une recherche française riche et variée

30 - ALTO (P)  
32 - CLIQ  
33 - ELYSE (P)  
35 - JANNuS (P)  
36 - PHIL  
37 - MOSAIC

38 - ThomX  
48 - ELSA  
49 - NENUPHAR  
39 - APOLLON  
40 - ALIENOR (P)  
43 - Micronsonde LEEL (P)

44 - SAFIR (P)  
45 - HVEM (P)  
46 - SIRIUS (P)  
51 - New AGLAE

41 - CIRIL (P)

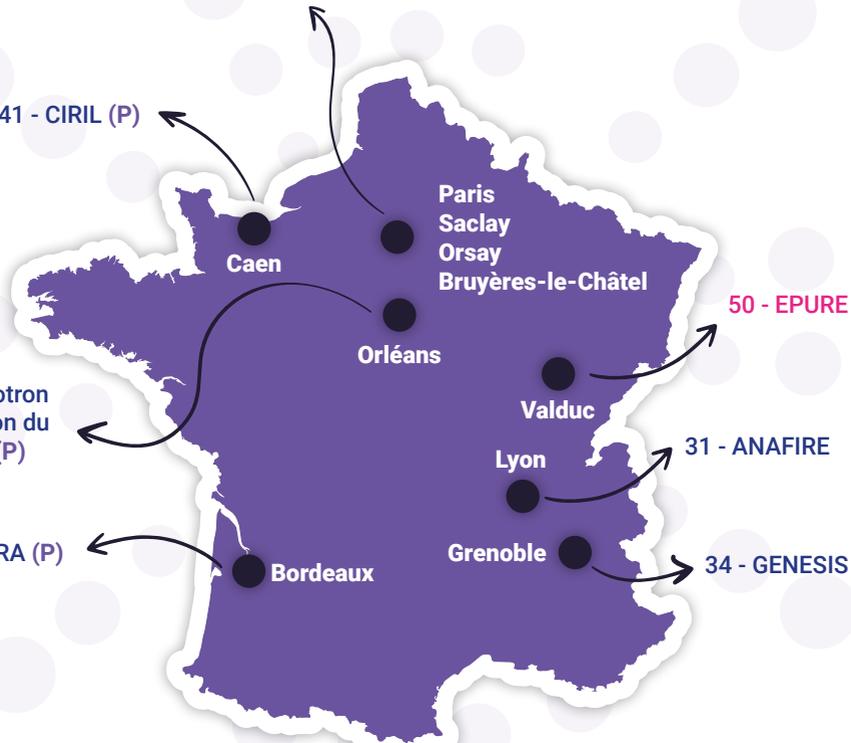
42 - Cyclotron & Pelletron du CEMHTI (P)

47 - AIFIRA (P)

50 - EPURE

31 - ANAFIRE

34 - GENESIS



■ Recherche  
■ Défense  
■ Patrimoine culturel  
■ (P) Plateformes

## >> Accélérateurs pour la recherche

30 - ALTO (P) (Orsay) Accélérateur Linéaire et Tandem à Orsay  
31 - ANAFIRE (Lyon) ANALyses et Faisceaux d'Ions pour la Radiobiologie et l'Environnement  
32 - CLIQ (Orsay) Laser à électrons libres  
33 - ELYSE (Orsay) Accélérateur d'électrons picoseconde  
34 - GENESIS (Grenoble) LPSC - Générateur de neutrons  
35 - JANNuS (Orsay-Saclay) Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation  
36 - PHIL (Orsay) Banc de test photo-injecteur pour R&D  
37 - MOSAIC (Orsay) Synthèse et Caractérisation par des ions Accélérés pour la recherche Pluridisciplinaire  
38 - ThomX (Orsay) Source X Compton - Accélérateur et circulateur  
39 - APOLLON (Saclay) Impulsions laser 10 PW pour l'étude d'accélération d'électrons  
40 - ALIENOR (P) (Saclay) Accélérateur Linéaire d'Electrons Nanoseconde pour l'Etude de la Radiolyse  
41 - CIRIL (P) (Caen) Centre Interdisciplinaire de Recherche sur les Ions Lourds  
42 - Cyclotron & Pelletron du CEMHTI (P) (Orléans) Laboratoire Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation  
43 - Micronsonde LEEL (P) (Saclay) Laboratoire d'Étude des Éléments Légers  
44 - SAFIR (P) (Paris) Système d'Analyse par Faisceaux d'Ions Rapides  
45 - HVEM (P) (Saclay) Microscope électronique à haute tension  
46 - SIRIUS (P) (Palaiseau) Plateforme d'irradiation avec des électrons de haute énergie  
47 - AIFIRA (P) (Bordeaux) Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine

## >> Accélérateurs pour la défense

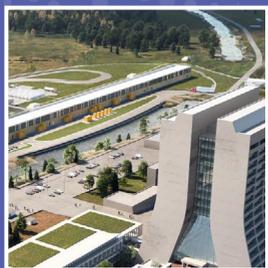
48 - ELSA (CEA-DAM Ile-de-France) Électrons, Lasers, Sources X et Applications. Accélérateur d'électrons 19-30 MeV, source X Bremsstrahlung et Compton Inverse  
49 - NENUPHAR et 4MV (CEA-DAM Ile-de-France) Accélérateurs électrostatiques (Van de Graaff) pour la physique nucléaire  
50 - EPURE (CEA DAM Valduc) Accélérateurs Linéaires à Induction pour la radiographie flash X

## >> Accélérateurs pour le patrimoine

51 - New AGLAE (C2RMF - Musée du Louvre) Étude d'œuvres d'art et archéologie



## Participation aux projets internationaux



### » PIP-II – Proton Improvement Plan II à Fermilab, États-Unis

Complexe accélérateur du laboratoire Fermilab (Illinois) qui produira un flux de neutrinos sans précédent requis pour les détecteurs de l'expérience DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment), installés à 1 300 km plus loin dans le Dakota du Sud.

### » SARAF – Soreq Applied Research Accelerator Facility, Israël

Source intense de neutrons rapides et de noyaux radioactifs en vue d'explorer les réactions nucléaires rares et produire des radionucléides pour la médecine nucléaire. Les neutrons seront produits par l'interaction d'un faisceau de 5 mA de protons ou de deutons jusqu'à une énergie de 40 MeV avec plusieurs cibles spécifiques.



### » FCC – Futur Collisionneur Circulaire, CERN

Étude de conception complète du projet qui succédera au grand Collisionneur de hadrons (étude post-LHC) et qui met l'accent sur l'exploration des collisions proton-proton et électron-positron à des énergies plus hautes. Un nouveau tunnel de 80 à 100 km de circonférence est prévu pour accueillir ce collisionneur. Actuellement, 57 instituts de 22 pays y participent dont le CEA et l'IN2P3.



### » MYRRHA – Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications, Belgique

Infrastructure de recherche polyvalente, il s'agit du premier réacteur de recherche au monde piloté par un accélérateur linéaire de particules (Accelerator Driven System – ADS) de 600 MeV. Partenaires français industriels et académiques.

### » FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research, Allemagne

Installation internationale d'accélération en cours de construction en Allemagne. Ici, la matière qui n'existe généralement que dans les profondeurs de l'espace sera produite dans un laboratoire de recherche. Les scientifiques du monde entier pourront acquérir de nouvelles connaissances sur la structure de la matière et l'évolution de l'univers du Big Bang à nos jours.



### » ESS – European Spallation Source, Suède

Future source de neutrons la plus brillante au monde pour la compréhension des structures et forces atomiques à une échelle inaccessible jusqu'alors.

Implication CEA – CNRS – partenaires industriels (divers systèmes et sections du linac).

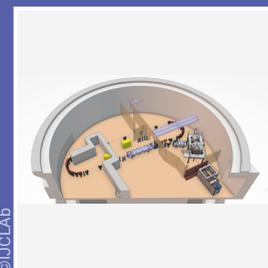


### » IFMIF – International Fusion Materials Irradiation Facility, Japon

Accélérateur de deutons 9 MeV, 125 mA CW, pour l'étude des matériaux pour les futurs réacteurs à fusion. En phase de validation (EVEDA phase).

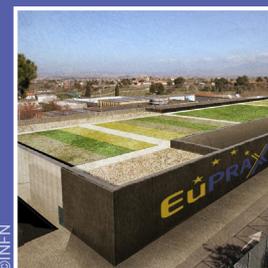
### » IFMIF - DONES – International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented Neutron Source, Espagne

Nouvelle infrastructure dédiée aux tests et à la qualification des matériaux pour les futurs réacteurs à fusion tels que DEMO. La construction sur le site de Grenade avec des bâtiments administratifs et servitudes a débuté à l'été 2022. Le flux et spectre des neutrons est obtenu grâce à un accélérateur de deutons de 125 mA – 40 MeV.



### » PERLE – High-Power Energy Recovery Facility at Orsay, France

Démonstrateur d'une machine ERL de 500 MeV et de puissance 10 MW basé sur une technologie SRF.



### » EuPRAXIA – Compact European Plasma Accelerator with superior beam quality, Consortium européen

Étude conceptuelle du premier accélérateur plasma au monde capable de délivrer des faisceaux de haute énergie de qualité appropriée vers des zones expérimentales dédiées.

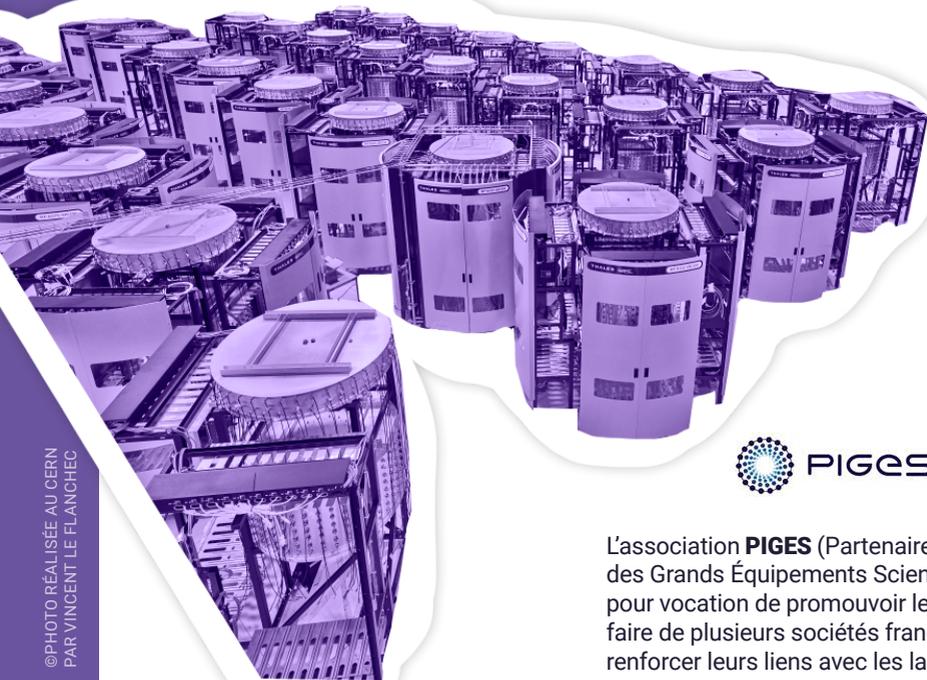
## Liens avec l'industrie

Les technologies clés des accélérateurs sont maîtrisées par plusieurs PME ou grands groupes industriels. La contractualisation pour des équipements ou logiciels a lieu via des appels d'offres généralement selon le principe des **marchés publics européens**. Pour relever certains défis d'innovation les laboratoires peuvent également signer des contrats de **collaboration** ou de **R&D** avec les industriels. Dans d'autres cas, les grands projets français ou internationaux peuvent sous-traiter aux industriels la **production de séries**. Dans leurs recherches de ressources et de compétences, les industriels peuvent proposer des thèses de type **CIFRE** pour les étudiants désireux de faire de la recherche dans le milieu industriel.

La Division Accélérateurs de la **Société Française de Physique** joue un rôle clé de facilitateur des relations entre partenaires industriels et laboratoires et leurs acteurs scientifiques :

- En leur permettant **d'adhérer à la SFP** et de **participer** aux Journées ou Rencontres, lieux d'échange entre les membres de la communauté.
- Lors des Journées Accélérateurs, les industriels peuvent avoir un stand et ont l'opportunité de faire une présentation « flash » de leurs activités et compétences dans une session orale dédiée.

**Sur son site web**, la division a une page dédiée pour les industriels permettant à chacun d'avoir un descriptif de ses activités et compétences, et ainsi d'avoir une base de données des savoir-faire pour les acteurs de la discipline.



L'association **PIGES** (Partenaires Industriels des Grands Équipements Scientifiques) a pour vocation de promouvoir les savoir-faire de plusieurs sociétés françaises et de renforcer leurs liens avec les laboratoires.

## Les activités de la division Accélérateurs



### >> Les Rencontres Accélérateurs

Une journée **d'échanges et de débats** sur l'organisation de **l'enseignement**, la **prospective**, les projets en cours, **l'avenir de la discipline**. Rencontres agrémentées de visites d'installations.



### >> Les Journées Accélérateurs

Trois jours **d'échanges scientifiques** entre les actrices et acteurs du domaine : ingénieurs, chercheurs, industriels, étudiants... **Revue de l'activité accélérateur française** et des technologies associées.



**La Société Française de Physique favorise la participation d'étudiants aux conférences qu'elle organise en proposant des bourses de financement.**

### >> Le prix Jean-Louis Laclare

Décerné tous les ans lors des Journées et Rencontres Accélérateurs, le prix Jean-Louis Laclare **récompense de jeunes physiciennes et physiciens** qui ont réalisé des travaux remarquables en physique et technologie des accélérateurs.

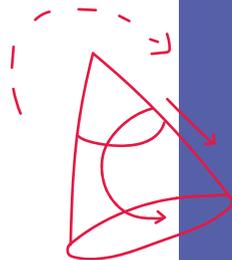
### >> Les autres prix de la SFP

La SFP décerne par ailleurs d'autres prix : Grands Prix, prix de spécialité, prix de vulgarisation, prix jeunes chercheuses et chercheurs.

### >> Musée de la lumière et de la matière

Sciences ACO – Bat. 201 – Porte 4  
Centre Universitaire d'Orsay





## » La Société Française de Physique (SFP)

La SFP est une association reconnue d'utilité publique **créée par et pour les physiciennes et physiciens** dans le but :

- D'échanger sur la physique, sa production, son financement et sa place dans la société,
- D'œuvrer collectivement pour promouvoir l'accès à la culture scientifique pour le plus grand nombre.

La SFP rassemble au sein d'une même communauté l'ensemble des physiciens français, hommes et femmes, en favorisant leurs interactions au delà de leurs cultures et disciplines respectives.

## » La Division Accélérateurs de la SFP

La division rassemble les acteurs académiques, scientifiques et industriels intervenant dans le domaine des accélérateurs de particules. Ce domaine couvre un champ scientifique très large lié à la conception, la réalisation et l'exploitation des accélérateurs de particules de toute nature, utilisés tant en recherche fondamentale et appliquée que pour des applications industrielles.



[accelerateurs.sfpnet.fr](https://accelerateurs.sfpnet.fr)

