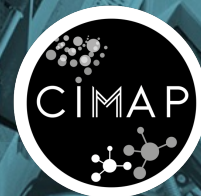


Profs au CANNIL



La physique du GANIL

Bienvenue à cette première édition de PROF@GANIL!

An aerial, top-down view of a complex industrial facility, likely a particle accelerator or laboratory. The image shows a dense network of metal structures, pipes, and equipment. Several large, cylindrical tanks are prominent, along with various smaller components and wiring. The overall scene is highly technical and organized.

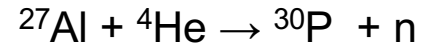
CANIL

GENESE :
la physique des ions lourds

La physique des ions lourds



Irène Joliot Curie : première réaction nucléaire et radioactivité artificielle

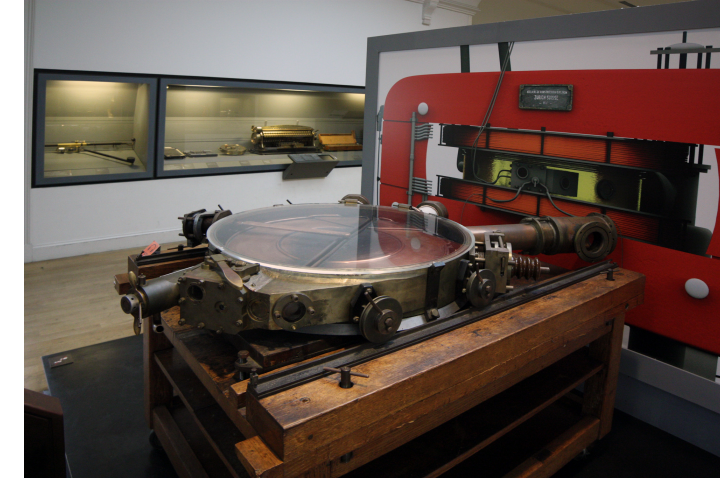
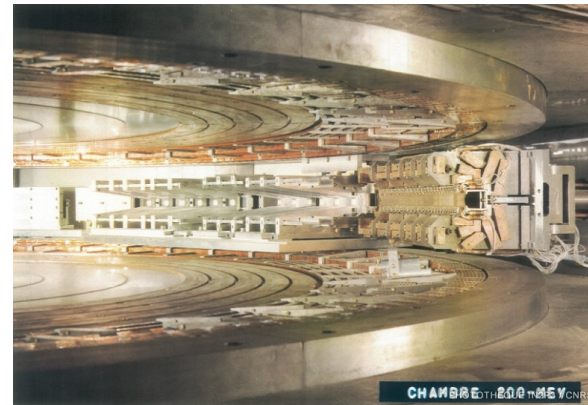
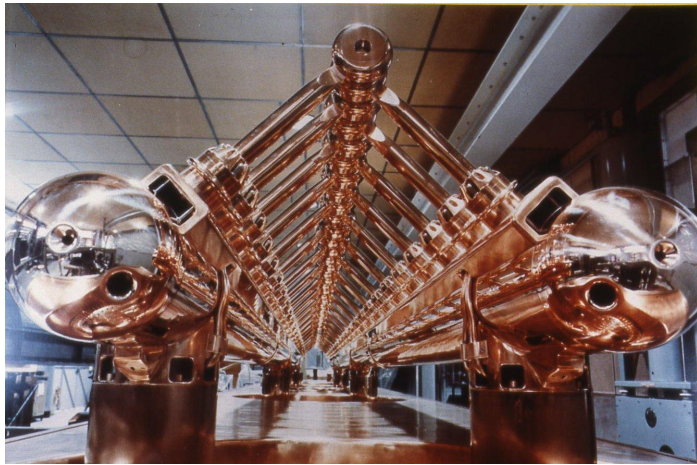


Frédéric Joliot-Curie : construction du premiers cyclotron au sous-sol du collège de France

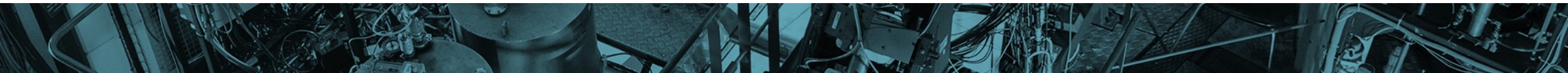
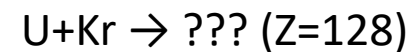
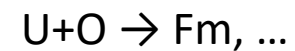
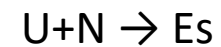
Construction du premier Synchro-cyclotron d'Orsay

Accélération d'ions lourds N,O,Kr

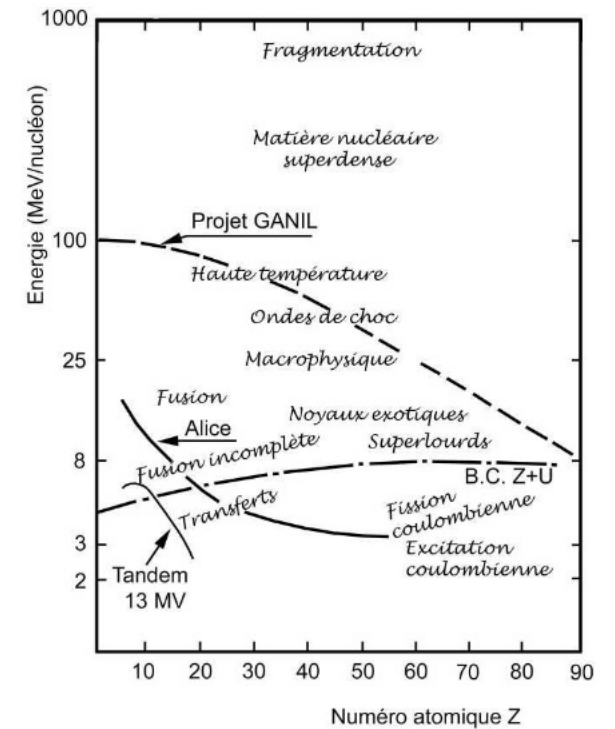
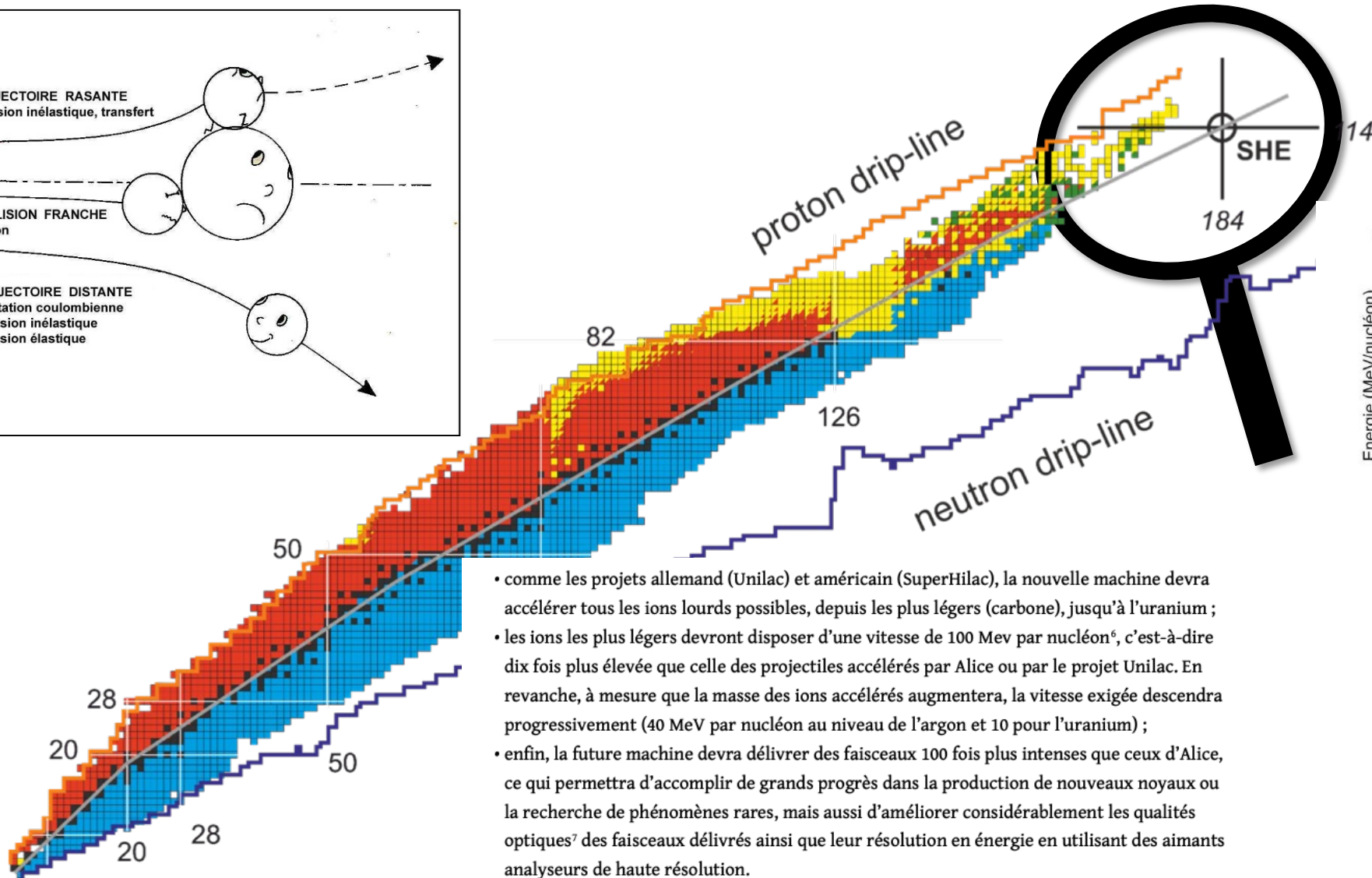
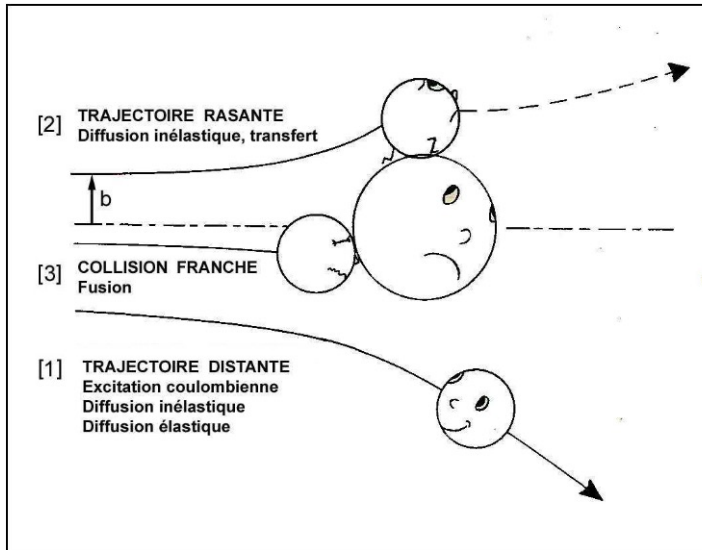
1970 Accélérateur linéaire ALICE



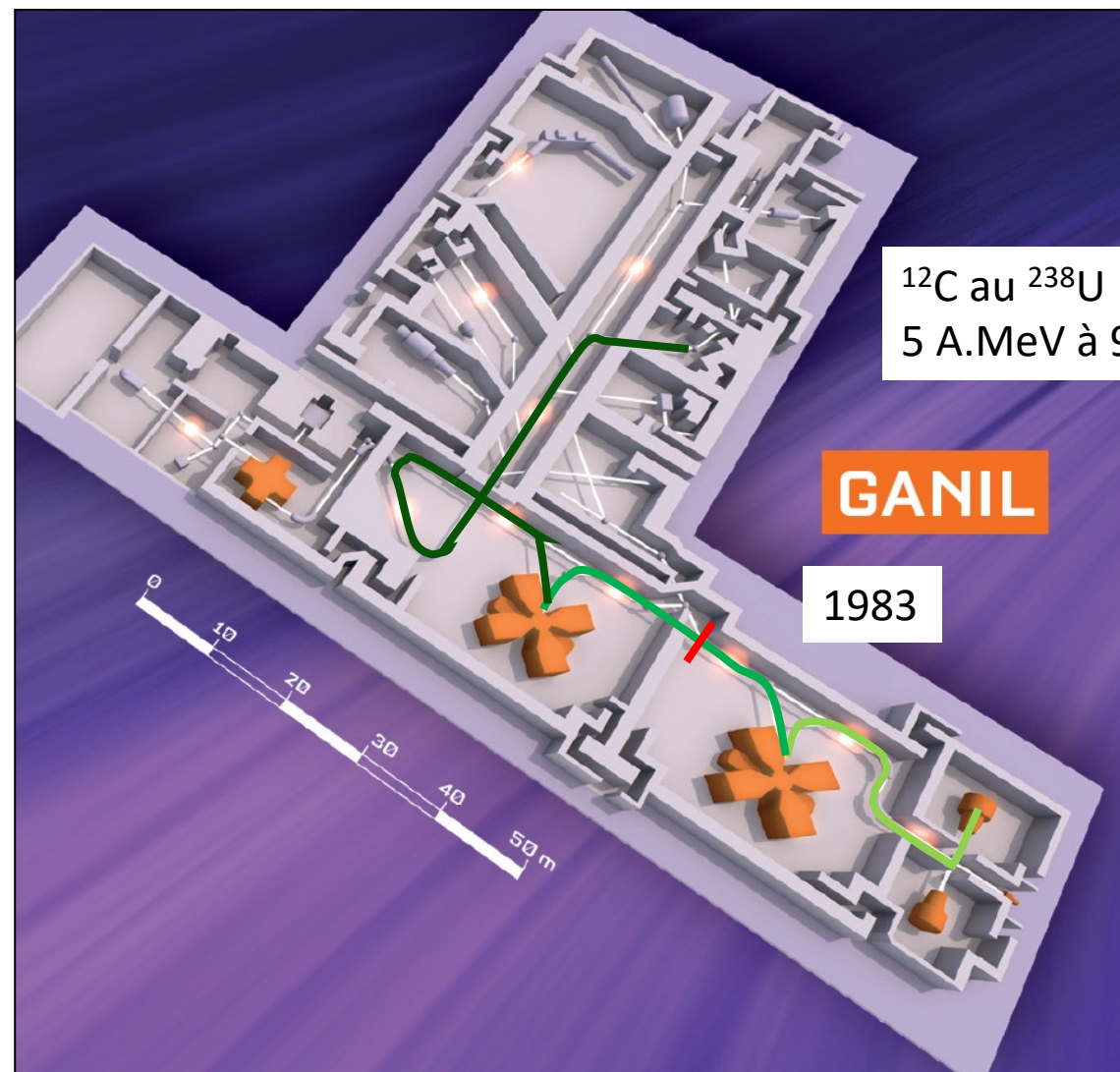
Vers la recherche des noyaux super-lourds :



La physique des ions lourds



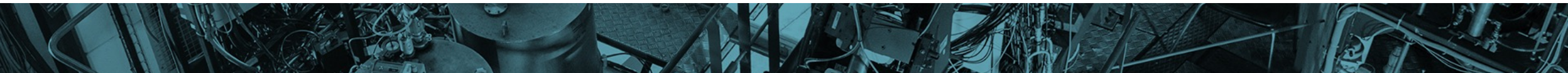
- comme les projets allemand (Unilac) et américain (SuperHilac), la nouvelle machine devra accélérer tous les ions lourds possibles, depuis les plus légers (carbone), jusqu'à l'uranium ;
- les ions les plus légers devront disposer d'une vitesse de 100 MeV par nucléon⁶, c'est-à-dire dix fois plus élevée que celle des projectiles accélérés par Alice ou par le projet Unilac. En revanche, à mesure que la masse des ions accélérés augmentera, la vitesse exigée descendra progressivement (40 MeV par nucléon au niveau de l'argon et 10 pour l'uranium) ;
- enfin, la future machine devra délivrer des faisceaux 100 fois plus intenses que ceux d'Alice, ce qui permettra d'accomplir de grands progrès dans la production de nouveaux noyaux ou la recherche de phénomènes rares, mais aussi d'améliorer considérablement les qualités optiques⁷ des faisceaux délivrés ainsi que leur résolution en énergie en utilisant des aimants analyseurs de haute résolution.

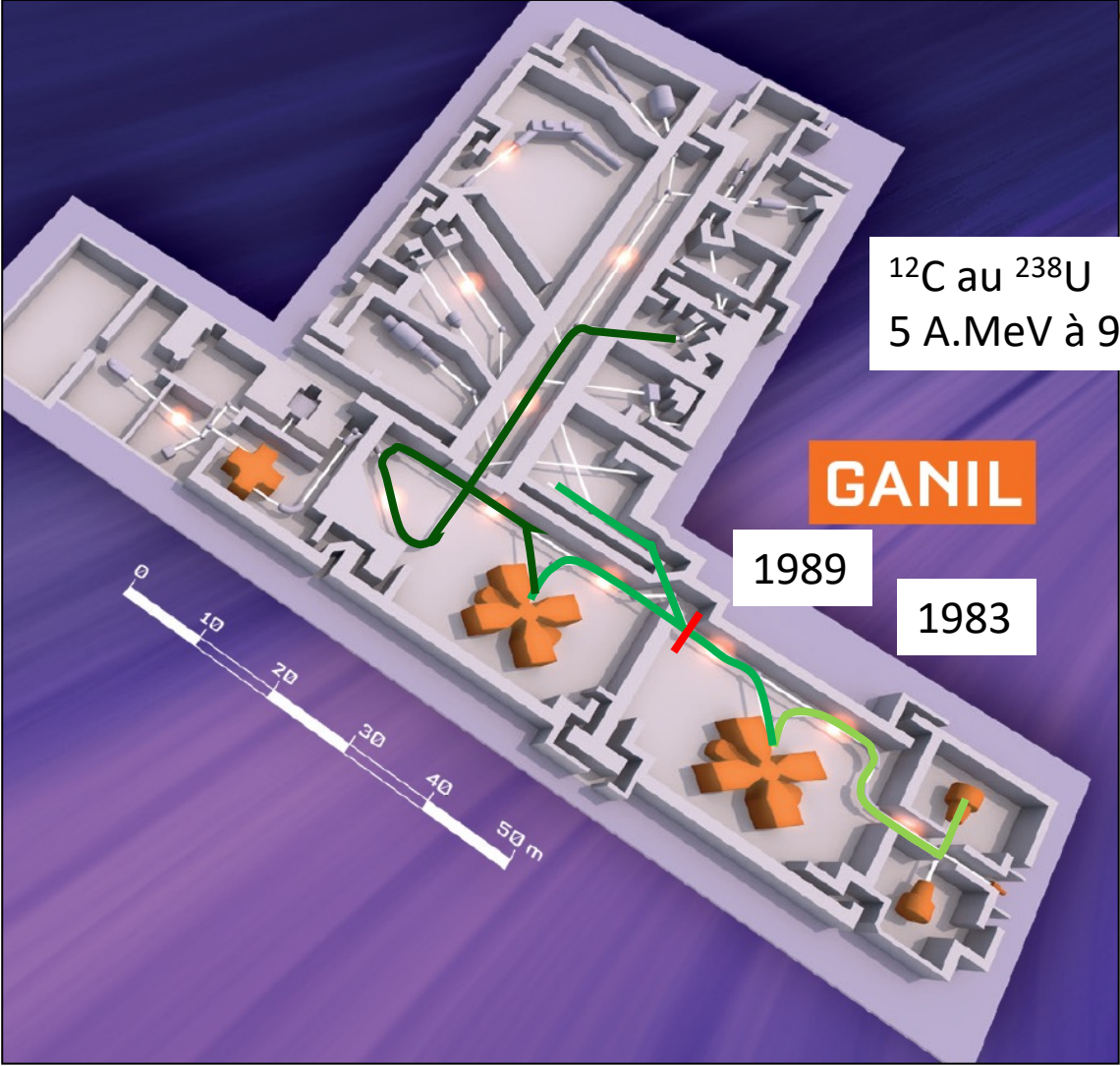


^{12}C au ^{238}U
5 A.MeV à 95 A.MeV

GANIL

1983





^{12}C au ^{238}U
5 A.MeV à 95 A.MeV

GANIL

1989

1983





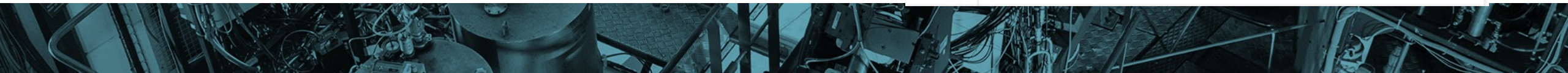
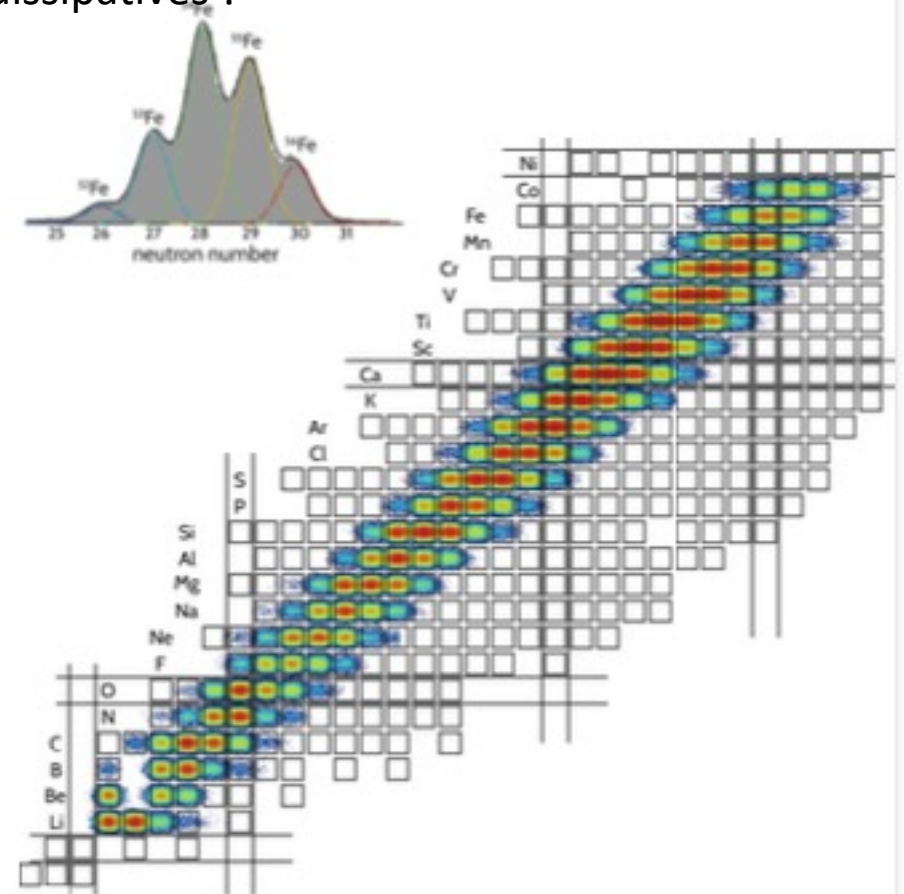
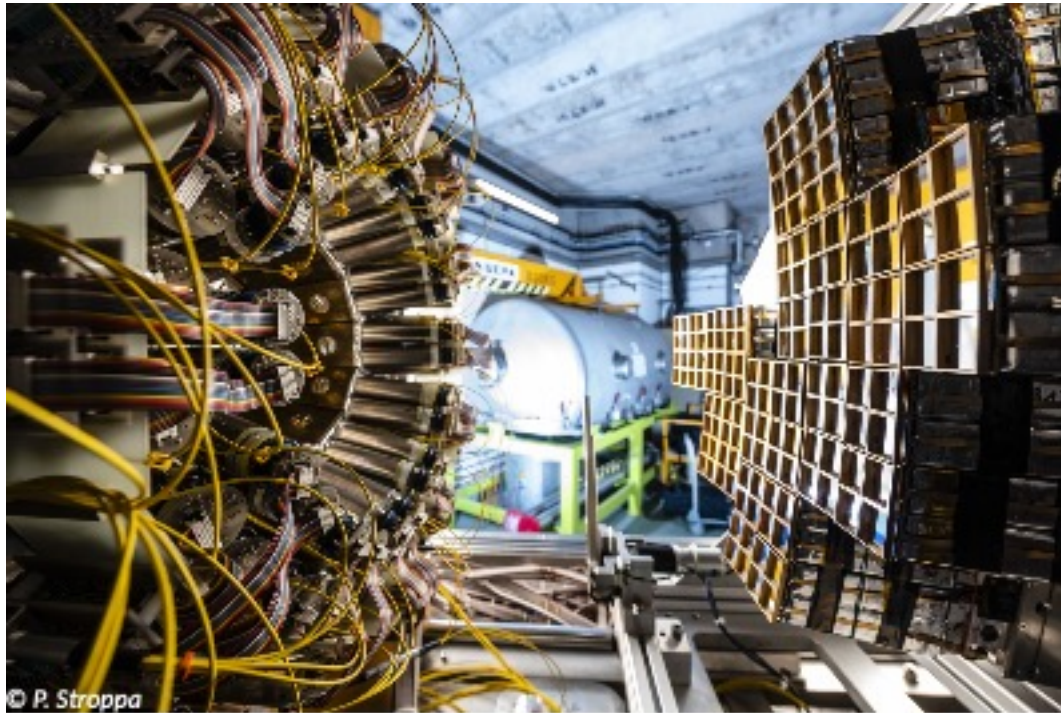
CANIL

Les réactions nucléaires

Une instrumentation de pointe : INDRA-FAZIA

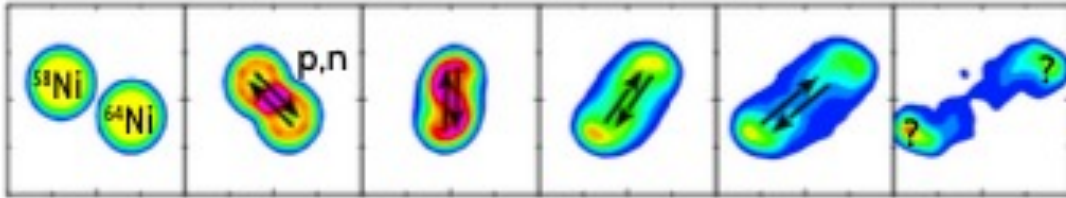
- 432 modules de détection
- 912 détecteurs (480 Si et 432 CsI)
- 80% de couverture angulaire
- Entièrement équipé d'une électronique numérique

Identification complète des charges et très bonne résolution isotopique aux angles avant (jusqu'aux isotopes du Fe). → Excellent outil pour l'étude des réactions dissipatives !



Equation d'état de la matière nucléaire

Lors des collisions d'ions lourds, le projectile et la cible ayant des rapports neutrons-protons différents équilibrent leur rapport neutrons-protons (**isospin**) au fil du temps. La trajectoire d'équilibrage dépend de l'équation d'état nucléaire.



Expérience INDRA-FAZIA @ GANIL

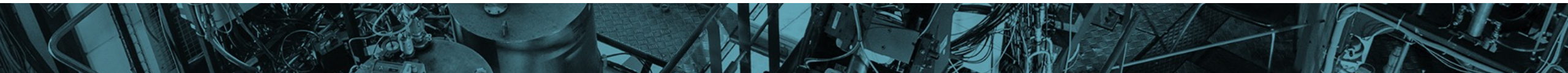
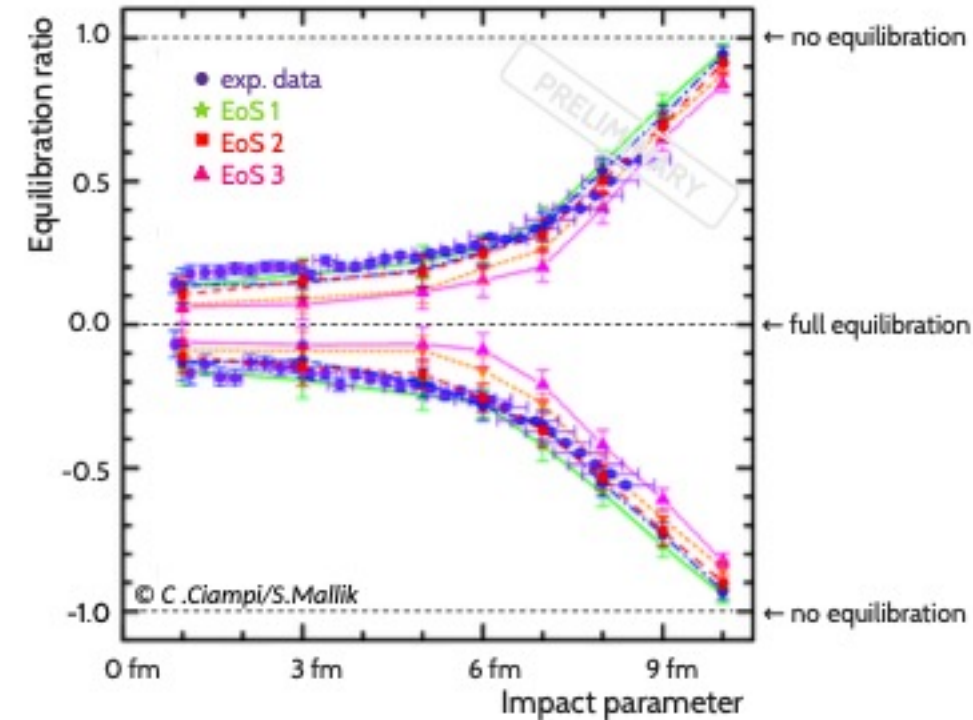
Collisions Ni + Ni avec diverses combinaisons d'isotopes stables du Ni (^{58}Ni et ^{64}Ni) à une énergie de faisceau de 32 MeV/nucléon.

Fragment final N/Z mesuré par FAZIA.

→ Rapport d'équilibrage en fonction du paramètre d'impact !

Contraintes sur l'équation d'état

La comparaison des données expérimentales avec les calculs du modèle de transport (BUU) permet de contraindre le terme énergétique de symétrie de l'Equation d'état de la matière nucléaire.



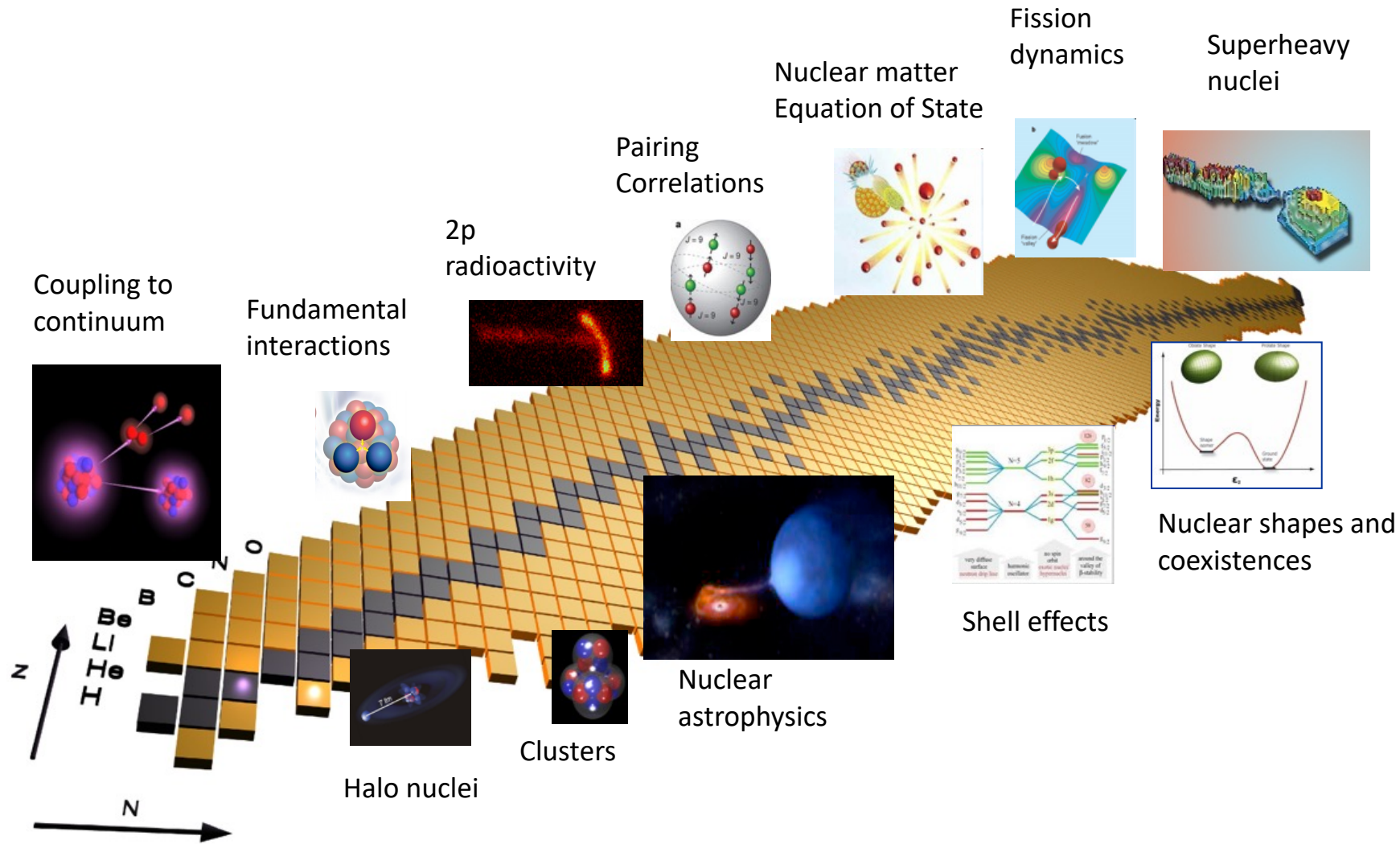


CEA

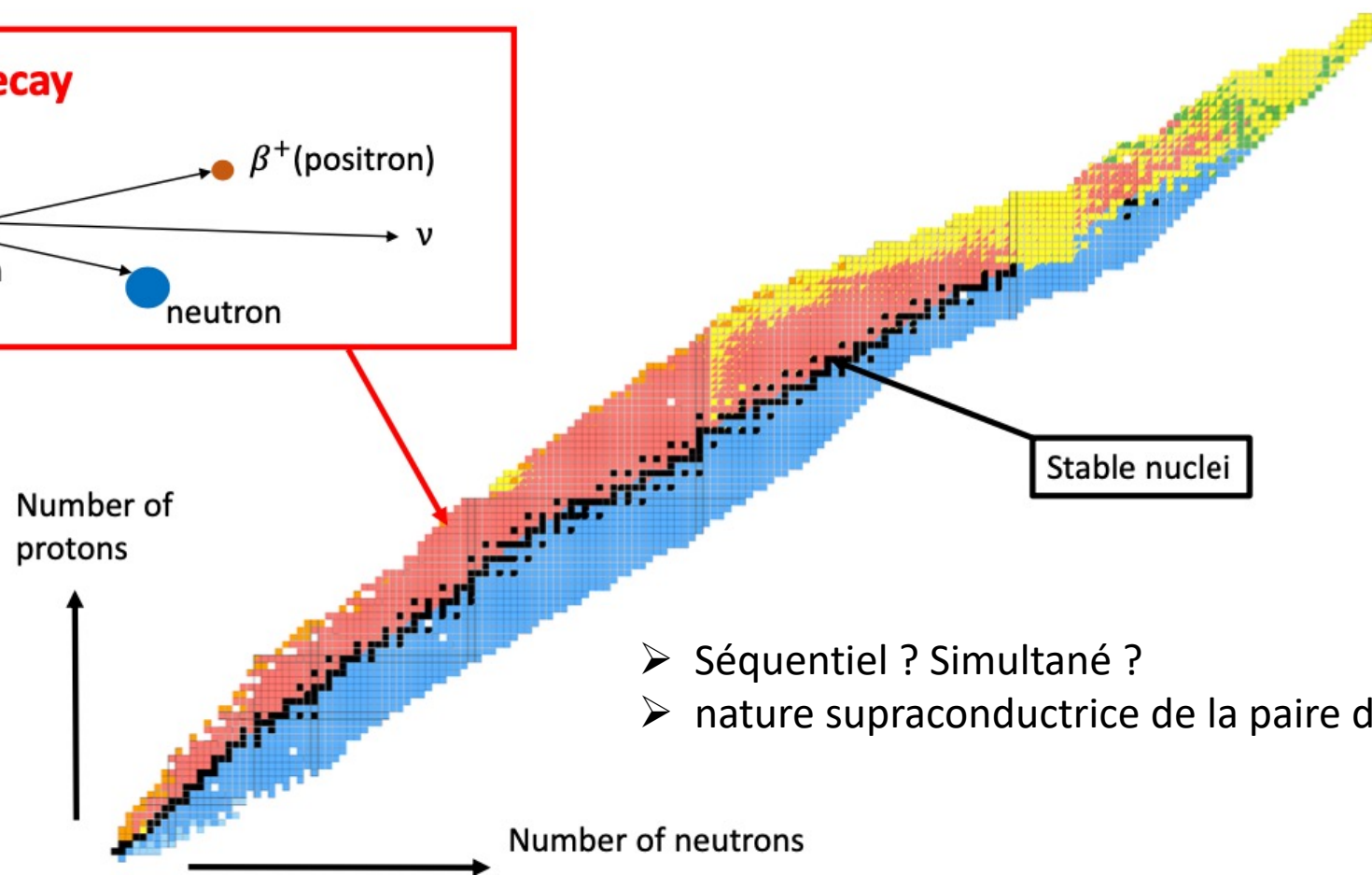
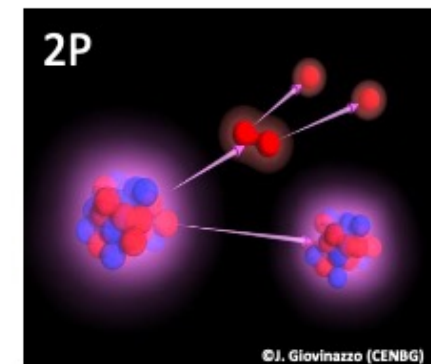
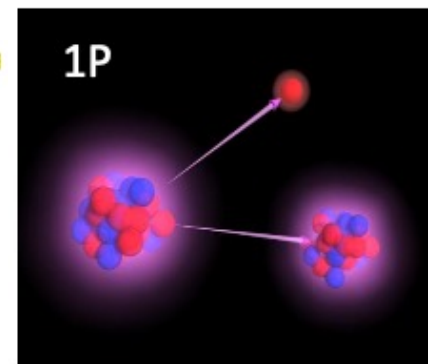
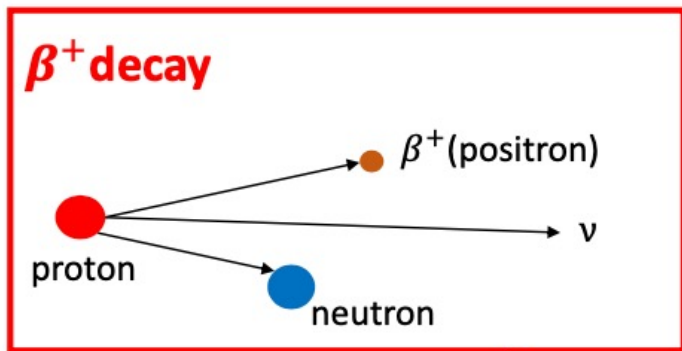
La production de noyaux exotiques

LISE
SPIRAL1

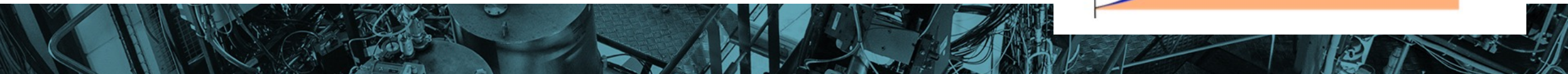
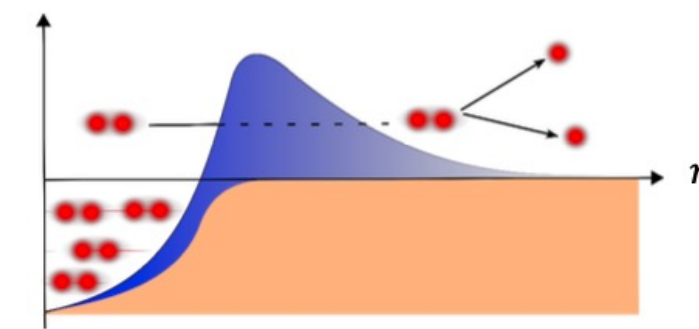
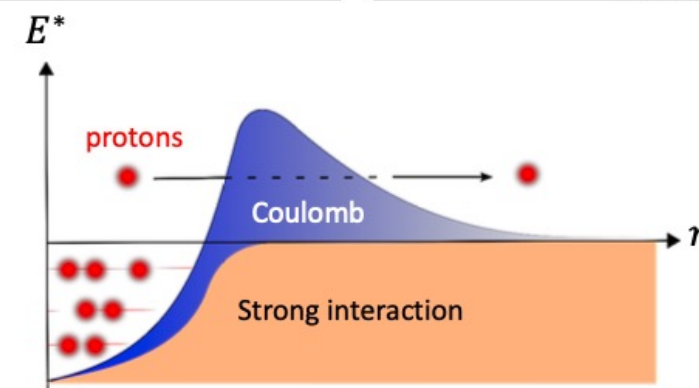
Les noyaux exotiques



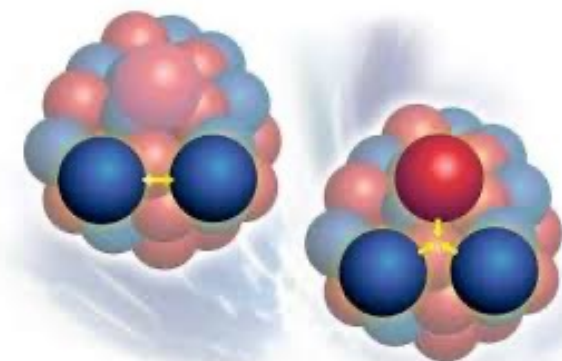
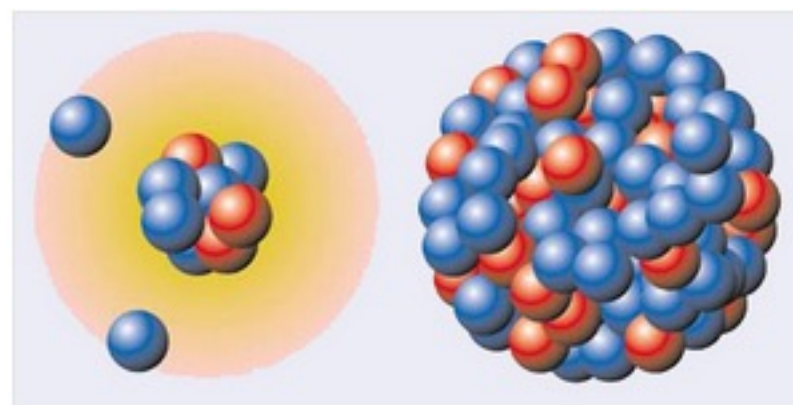
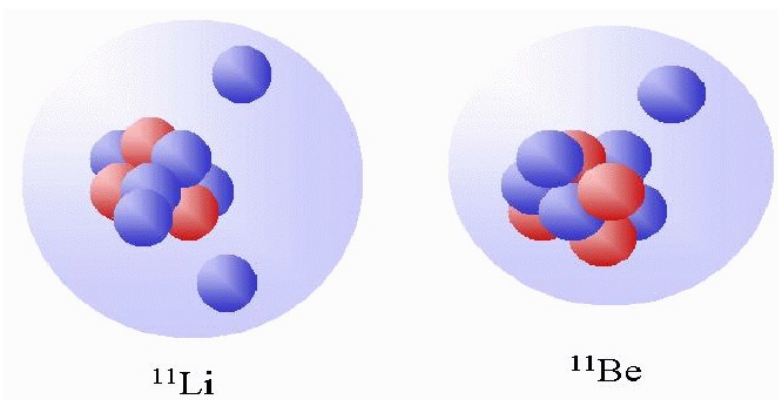
Une nouvelle radioactivité



- Séquentiel ? Simultané ?
- nature supraconductrice de la paire de protons ?



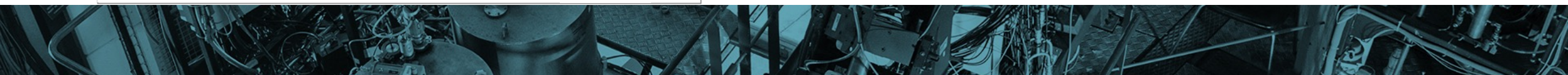
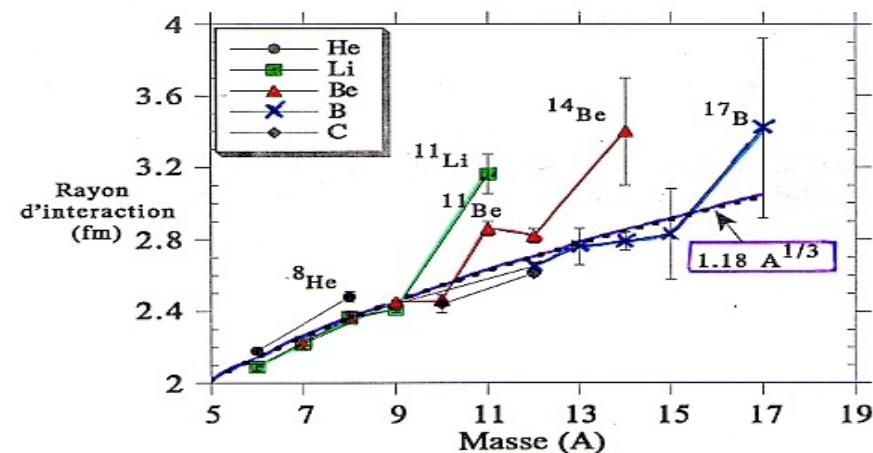
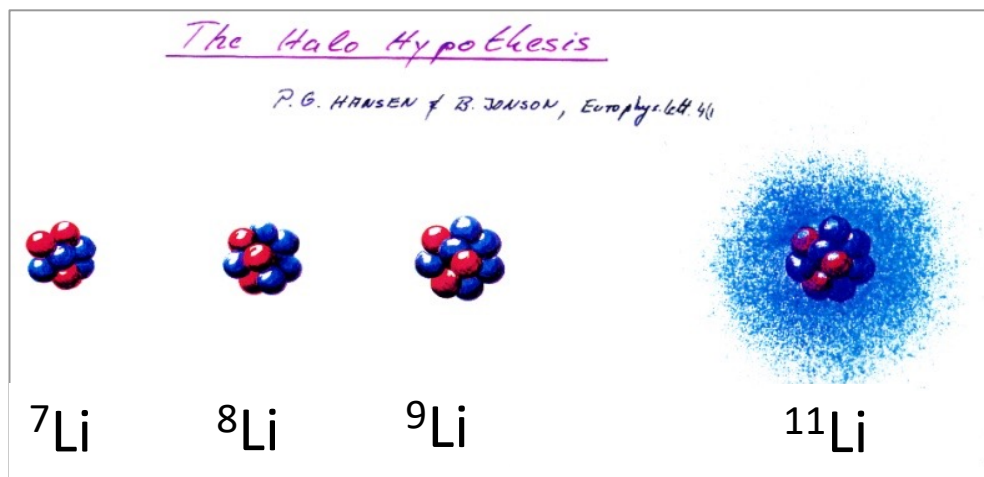
Noyaux à halo



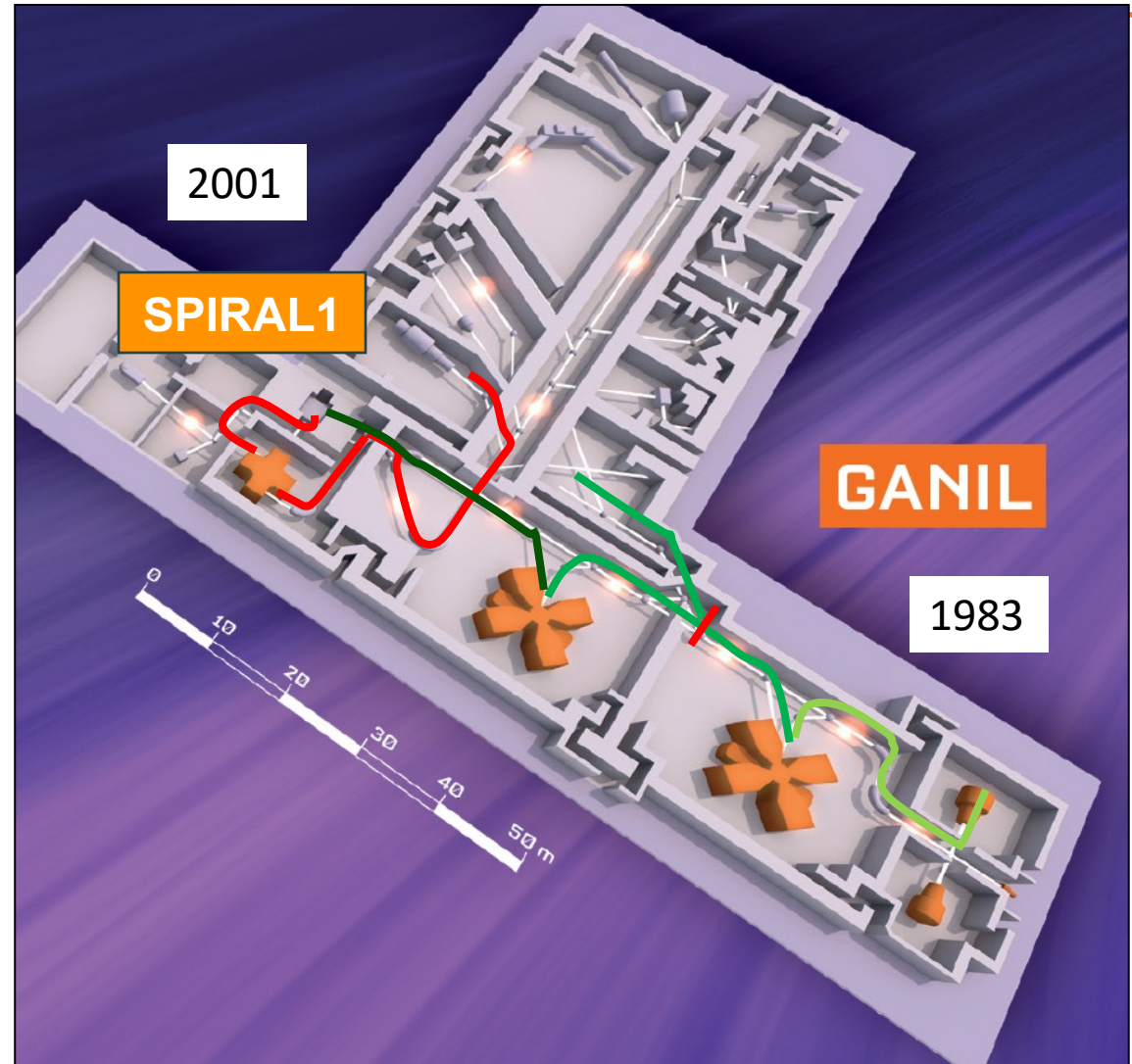
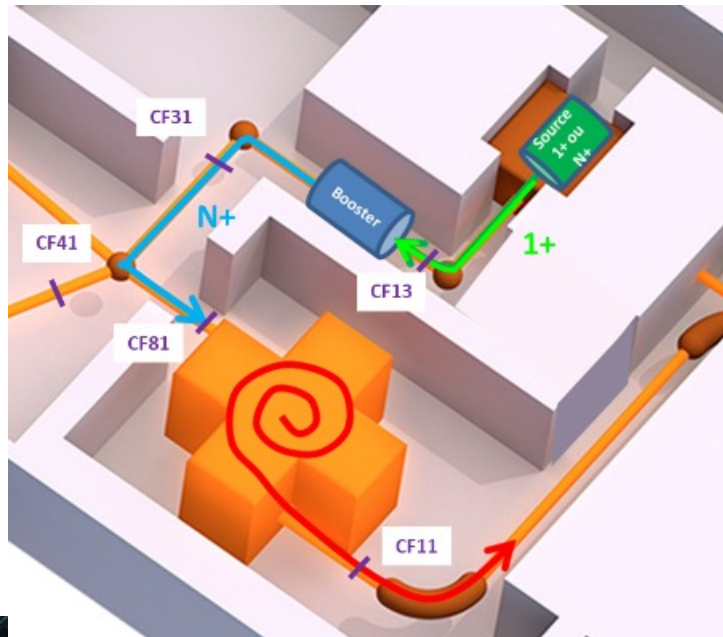
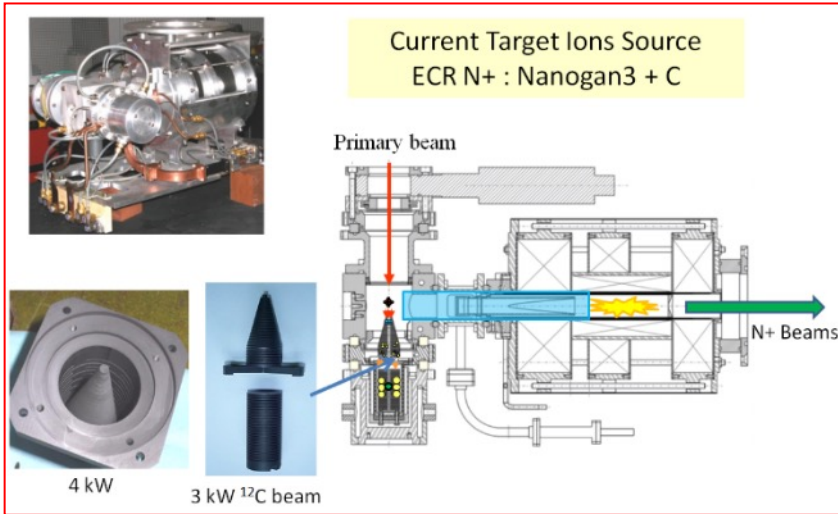
Noyau borroméen

Rayon très étendu

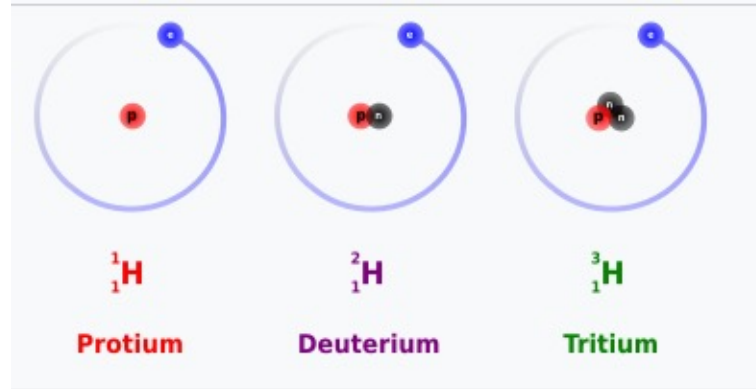
Mise en évidence de l'interaction à 3 corps



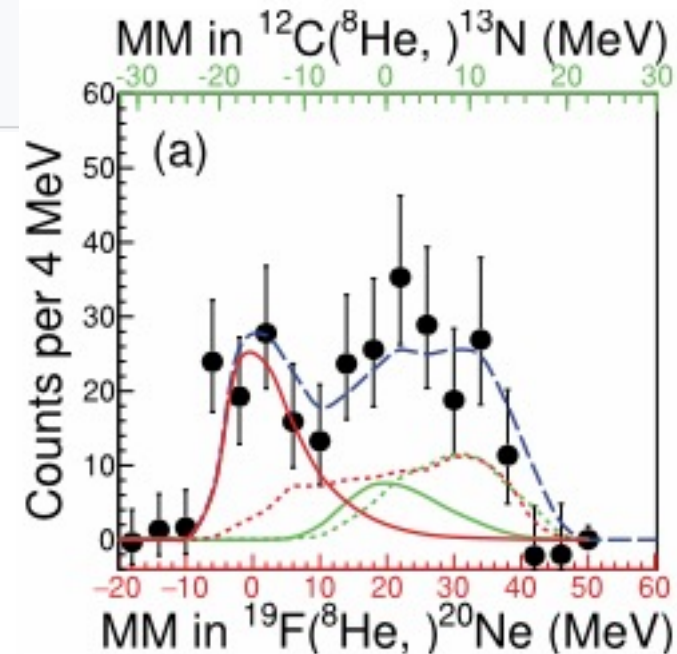
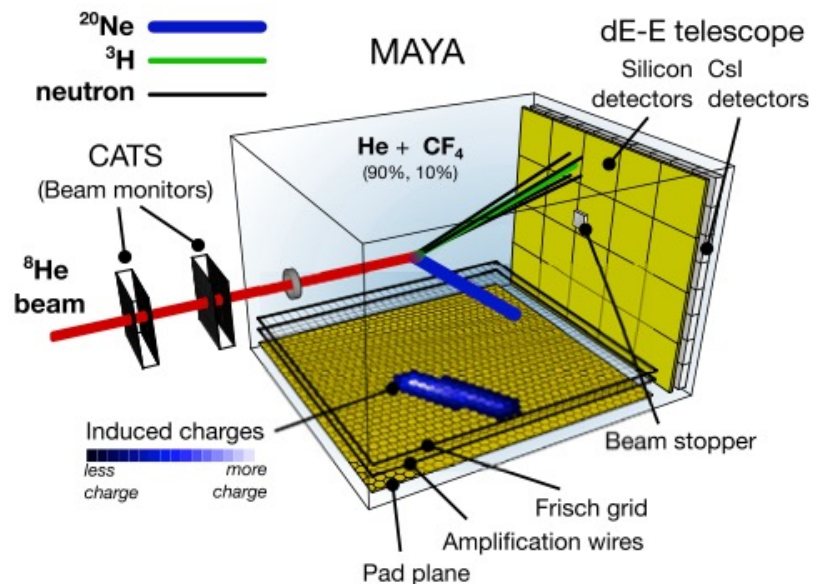
SPIRAL1



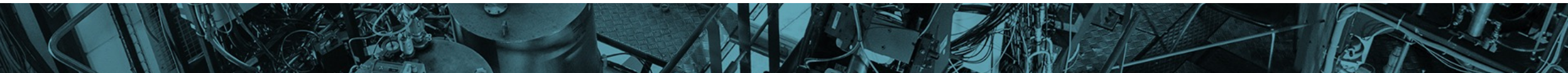
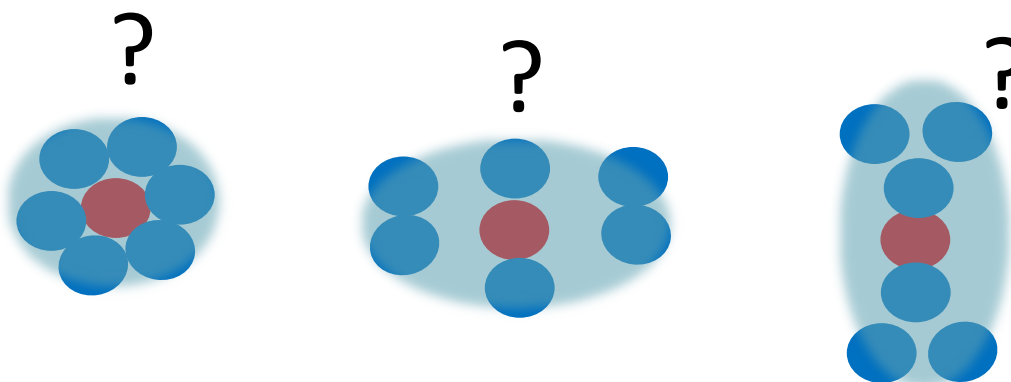
Le cas de l'hydrogène-7



GANIL



Aux limites de l'existence de la matière
Aux limites des techniques expérimentales
Aux limites de la connaissance...

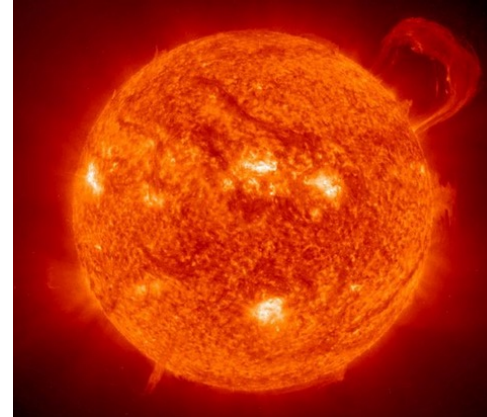
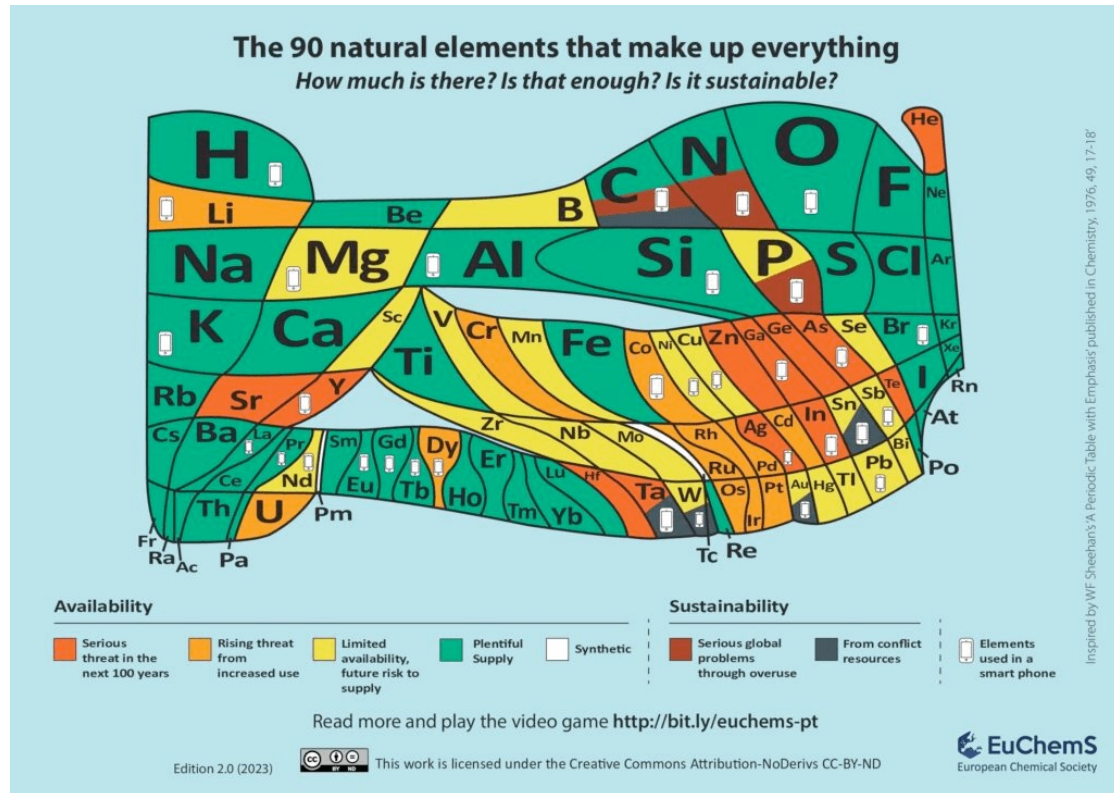




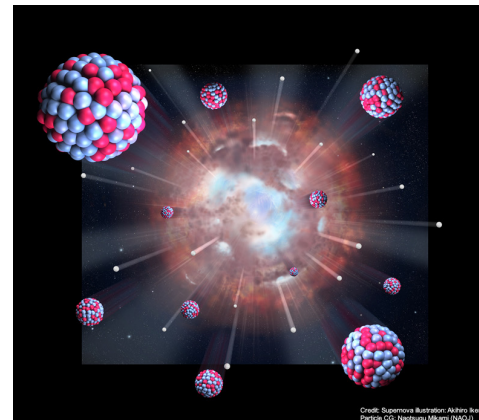
CANIL

Astrophysique nucléaire

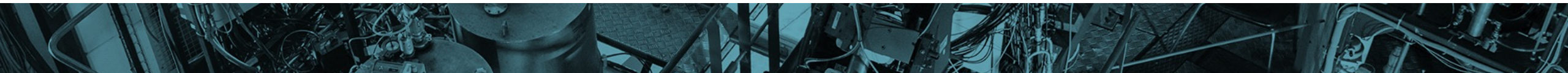
Abondance des éléments



Réactions de fusion dans les étoiles

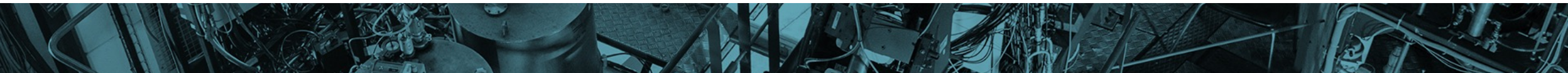
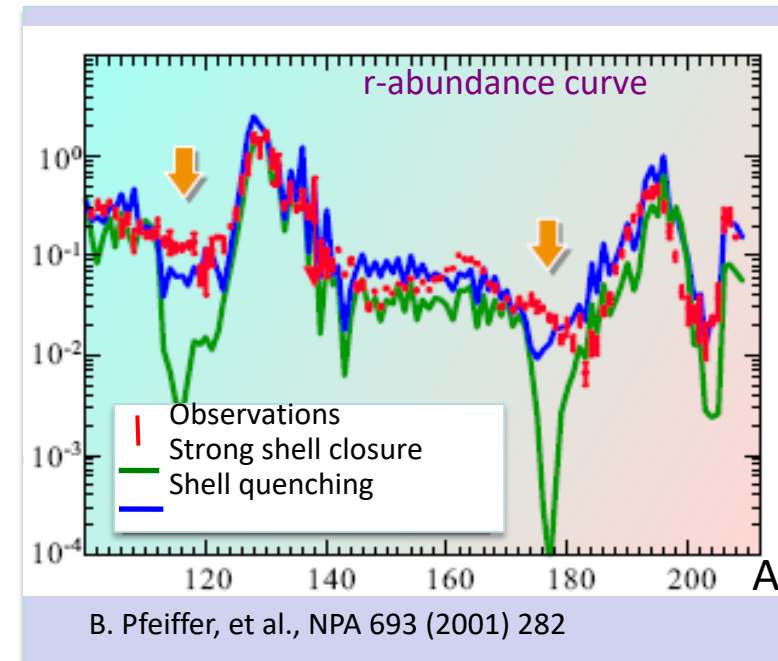
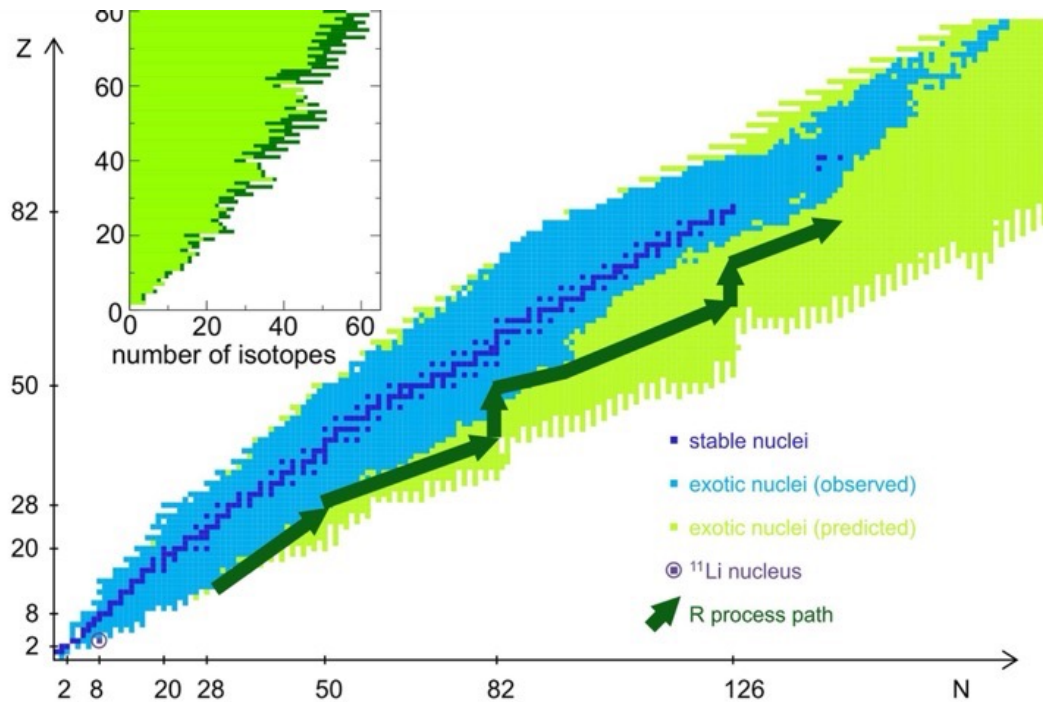


Explosion de Supernovae
Collisions d'étoiles à neutrons



Abondance des éléments

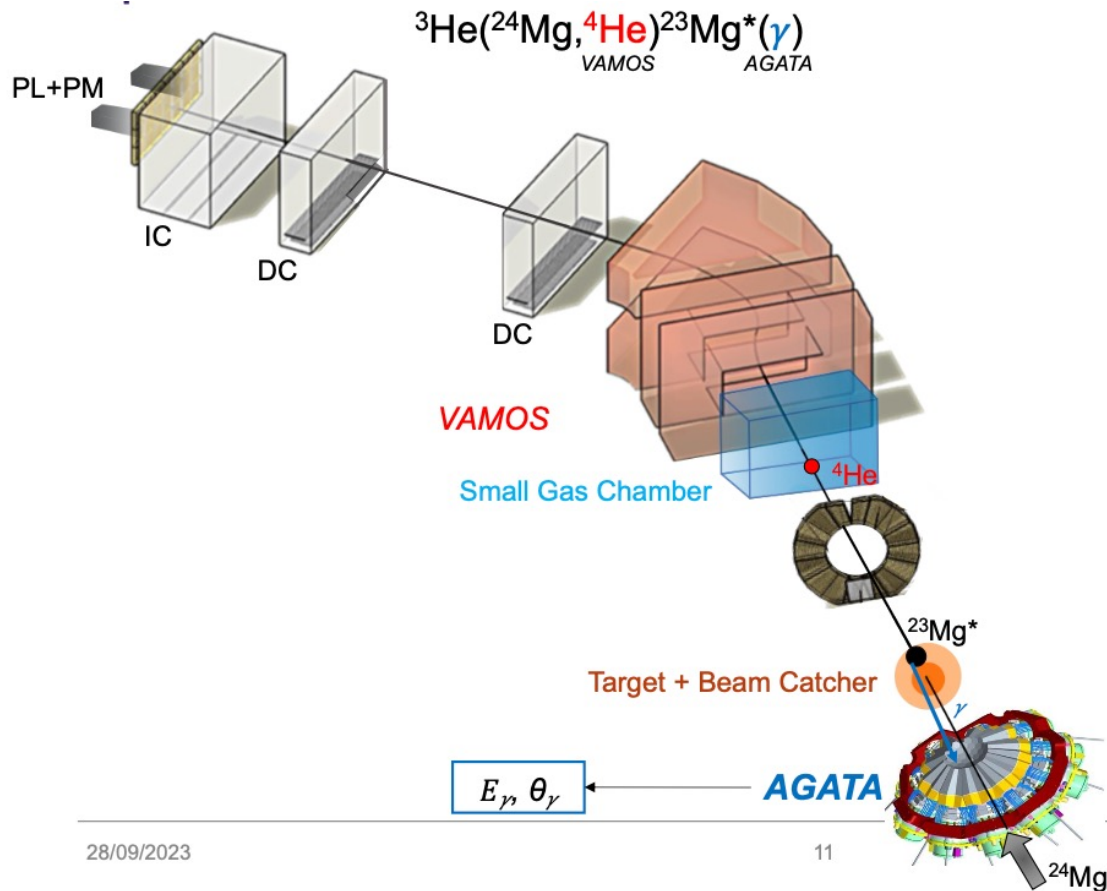
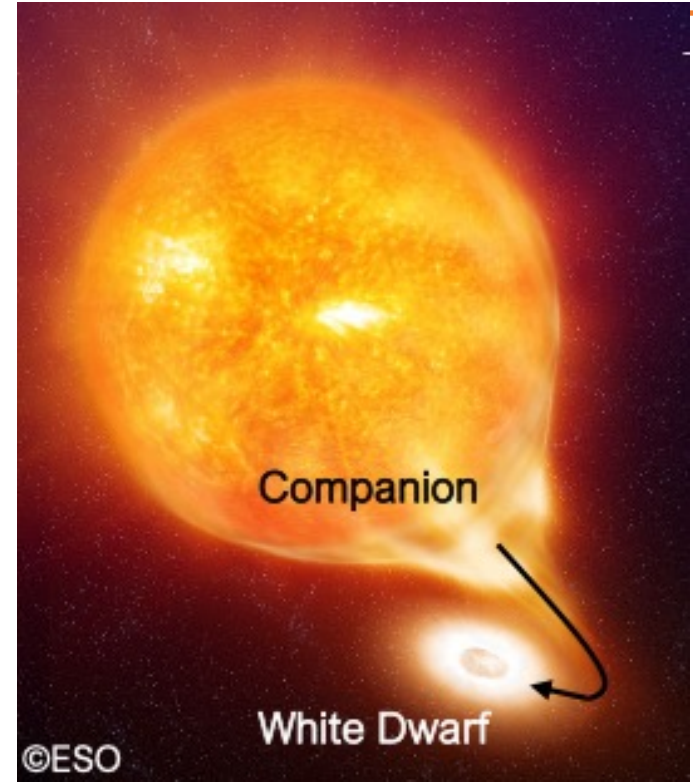
- Comment les durées de vie, les masses, les propriétés intrinsèques des noyaux exotiques conditionnent la production des éléments stables



Formations de Novae : ^{22}Na une signature



Prédire le taux d'apparition de ces novae :
mieux comprendre l'univers



- Description des états excités du ^{23}Mg , précurseur du ^{22}Na
- Compréhension du taux de production du rayonnement de ^{22}Na
- Estimation du taux d'observation des Noave

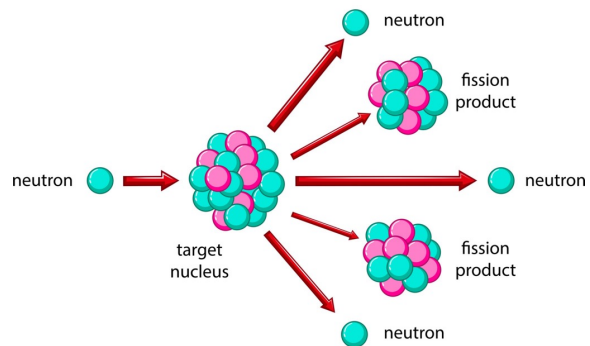


CANIL

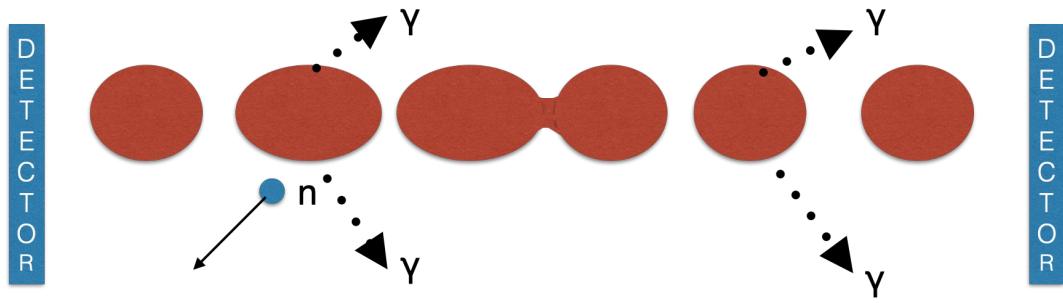
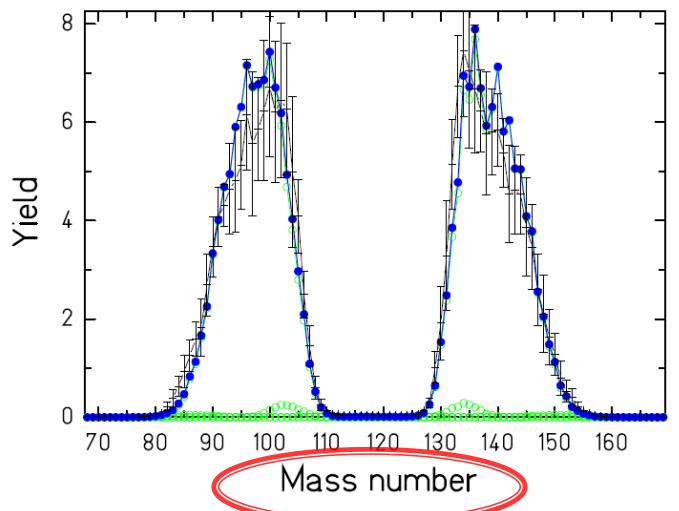
Les études de fission

Fission nucléaire

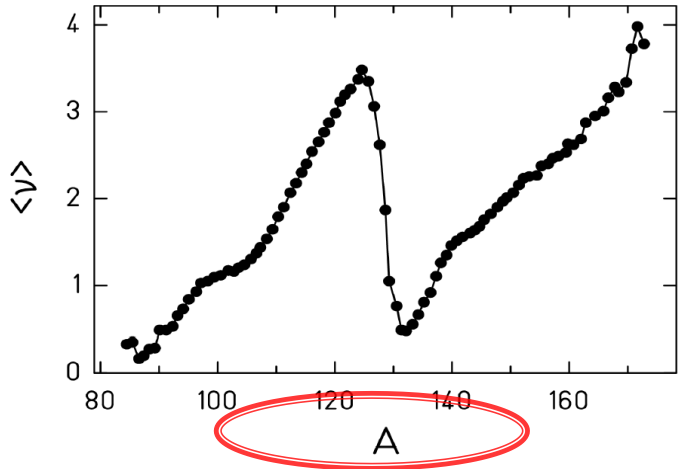
Nuclear Fission



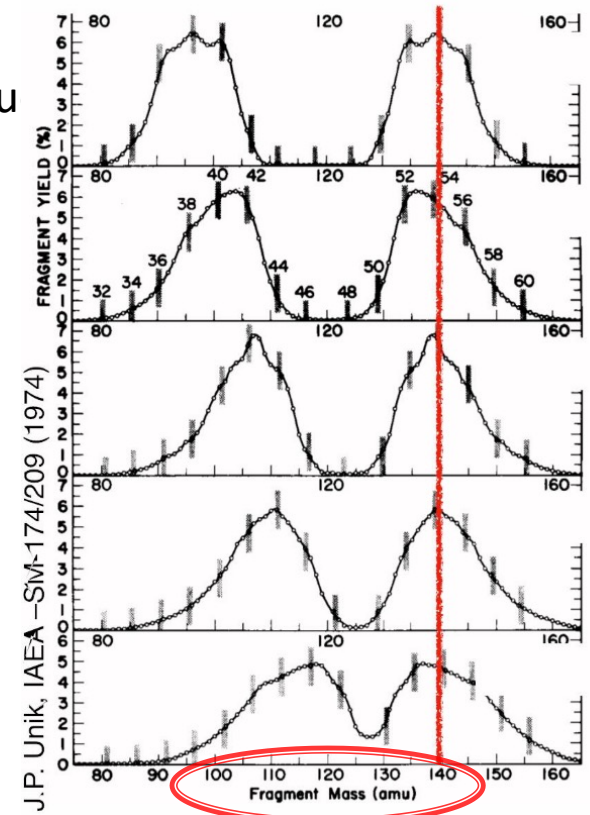
Apost, $^{238}\text{U}(n,f)$, $E_n=2\text{MeV}$



200 MeV libérée principalement en énergie cinétique



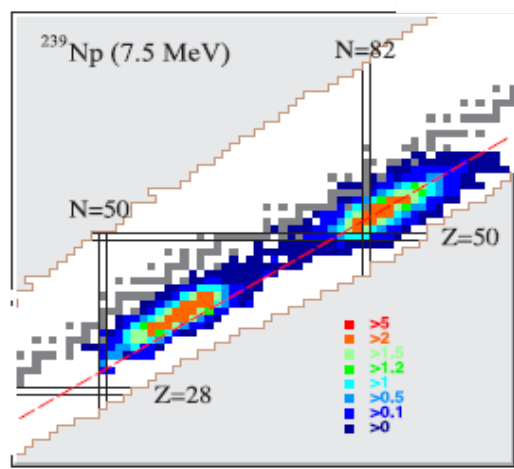
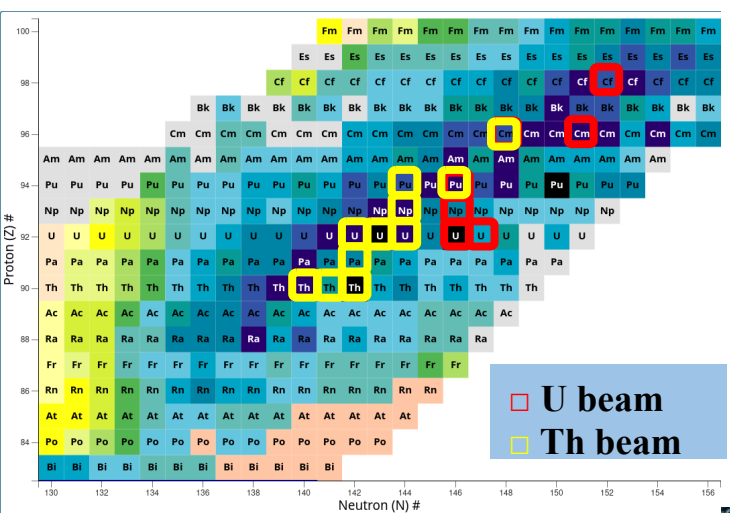
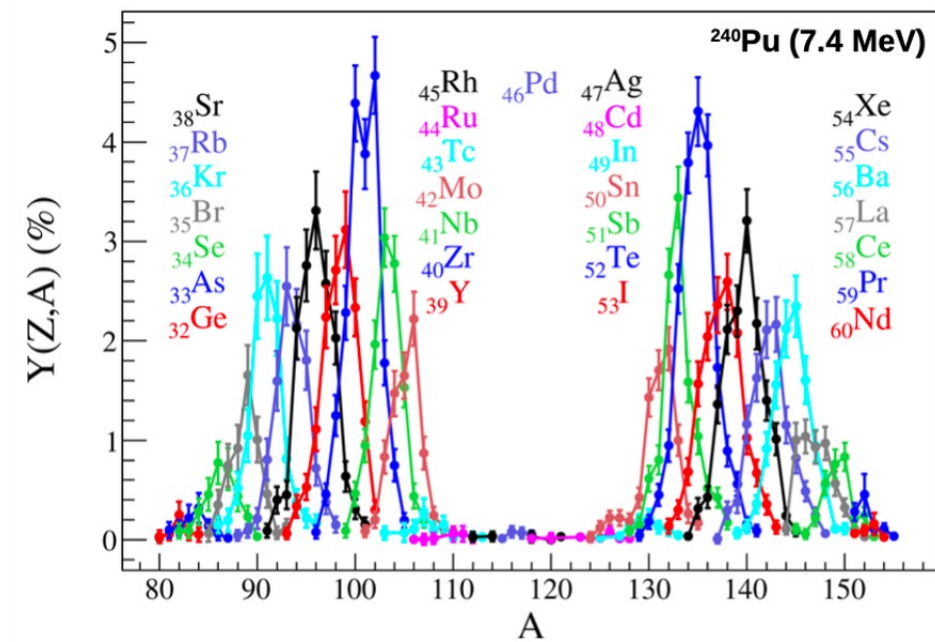
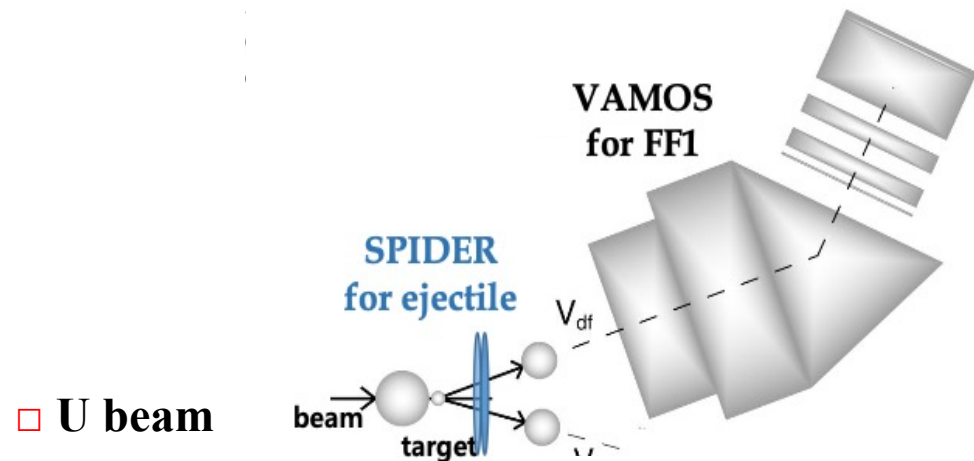
Comment se répartissent les neutrons et les protons ?
 Les effets de structure ?
 Les effets de viscosité ?
 Les effets d'appariement ?



$$A = N + Z$$



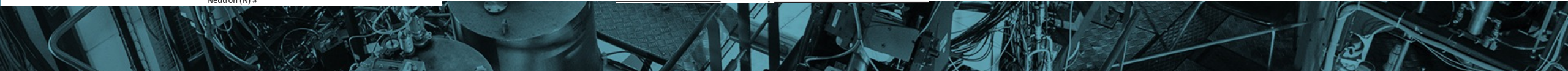
Fission nucléaire : systématique et une nouvelle dimension pour la détection



Un grand progrès pour la modélisation de ce phénomène

Amélioration des marges de sécurité des réacteurs

Prédiction pour des nouveaux types de réacteurs



An aerial, top-down view of a complex industrial facility, likely a research or production plant. The image shows a dense network of metal structures, pipes, and equipment. Several large, cylindrical tanks are prominent, some with various gauges and valves on top. The overall scene is highly technical and organized, with a strong sense of scale and complexity. The entire image has a blue color cast.

CANIL

Matériaux sous irradiation

Déchets radioactifs : impact de la radioactivité alpha



- Emission de gaz : sujet de sécurité
- Création de molécules solubles : migration des radionucléides

Polymères
Joints, vinyls, tapes, gloves, ...



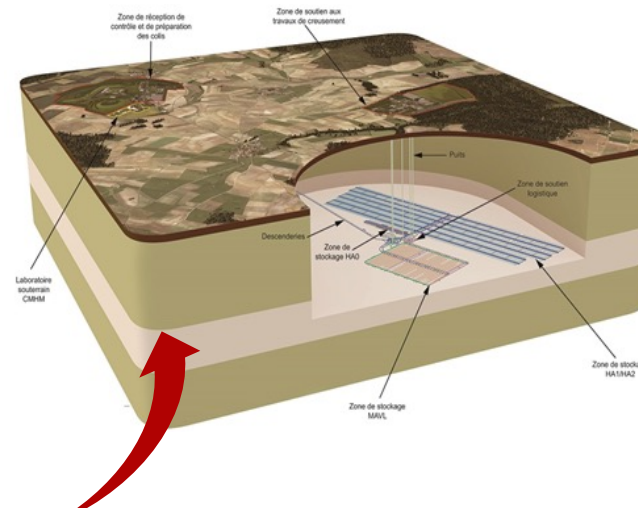
Stockage - Exploitation

- Émission de gaz
- Environnement très radiatif



Transport

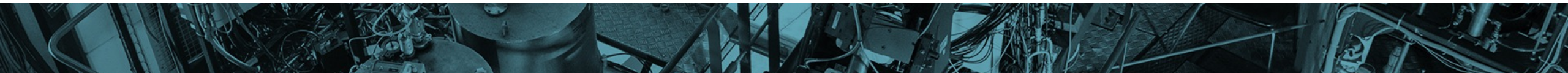
- Émission de gaz
- Environnement radiatif
- Chaleur



Stockage à long terme

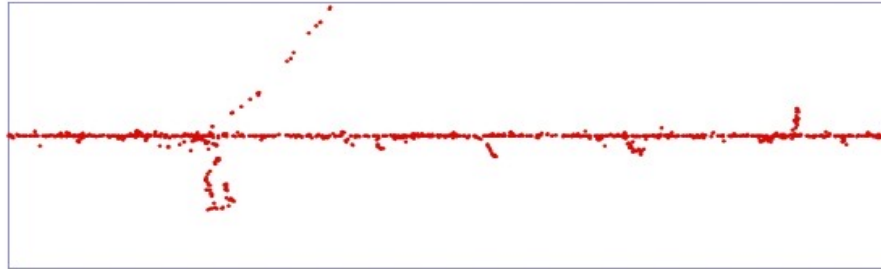
- Émission de gaz ↘
- lixiviation
- Mobilité des radionucléides

- 2 types de défauts :
- Formation de gaz par radiolyse
 - Création de macromolécules

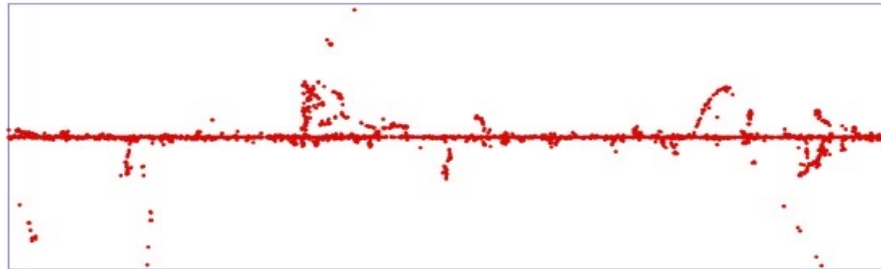
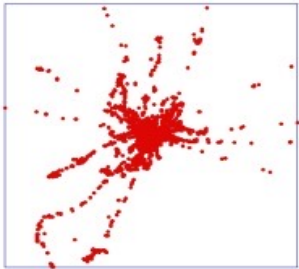


Simulation de la radioactivité alpha

He^{2+} 1,4 MeV/A (5,6 MeV)



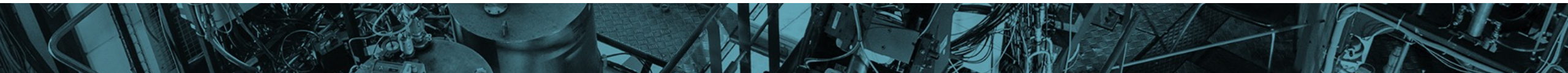
Ar^{18+} 95 MeV/A (3,4 GeV)



Equivalent energy deposition

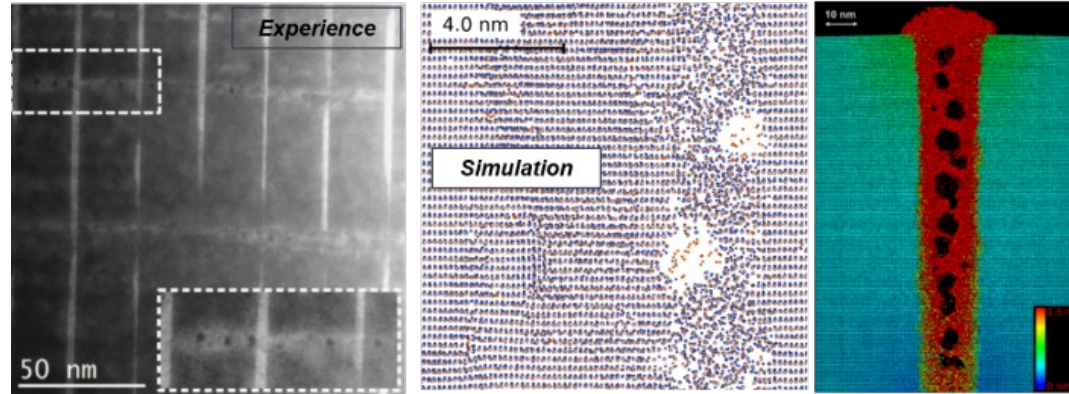
Two analysis procedures

- ✓ MS on line ligne + FTIR *in-situ*
 - ❖ SME
- ✓ Spectroscopy *ex-situ*
 - ❖ IRRABAT



Science des matériaux

- Comprendre l'origine des défauts électroniques
- Nouveaux matériaux pour l'électronique et aussi pour les batteries, capture du CO₂, production d'H₂
- Ingénierie des défauts
- Nanostructuration :



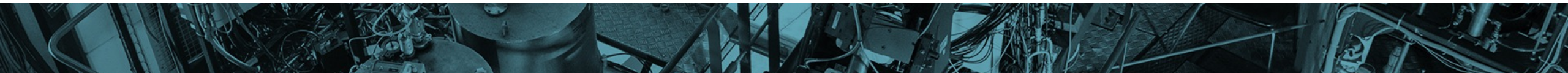
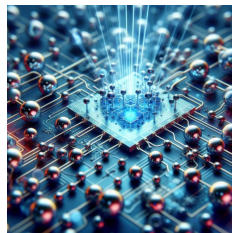
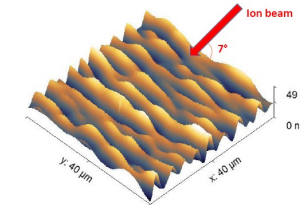
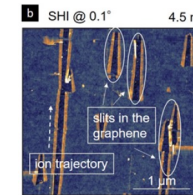
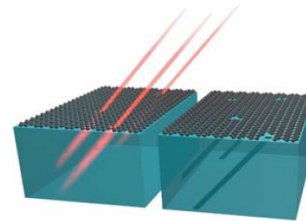
Formations de phases amorphes

Nouvelles membranes à effets sélectifs utilisant l'irradiation rasante

Graphène superconducteur ou isolant ...

nanofabrication de surface

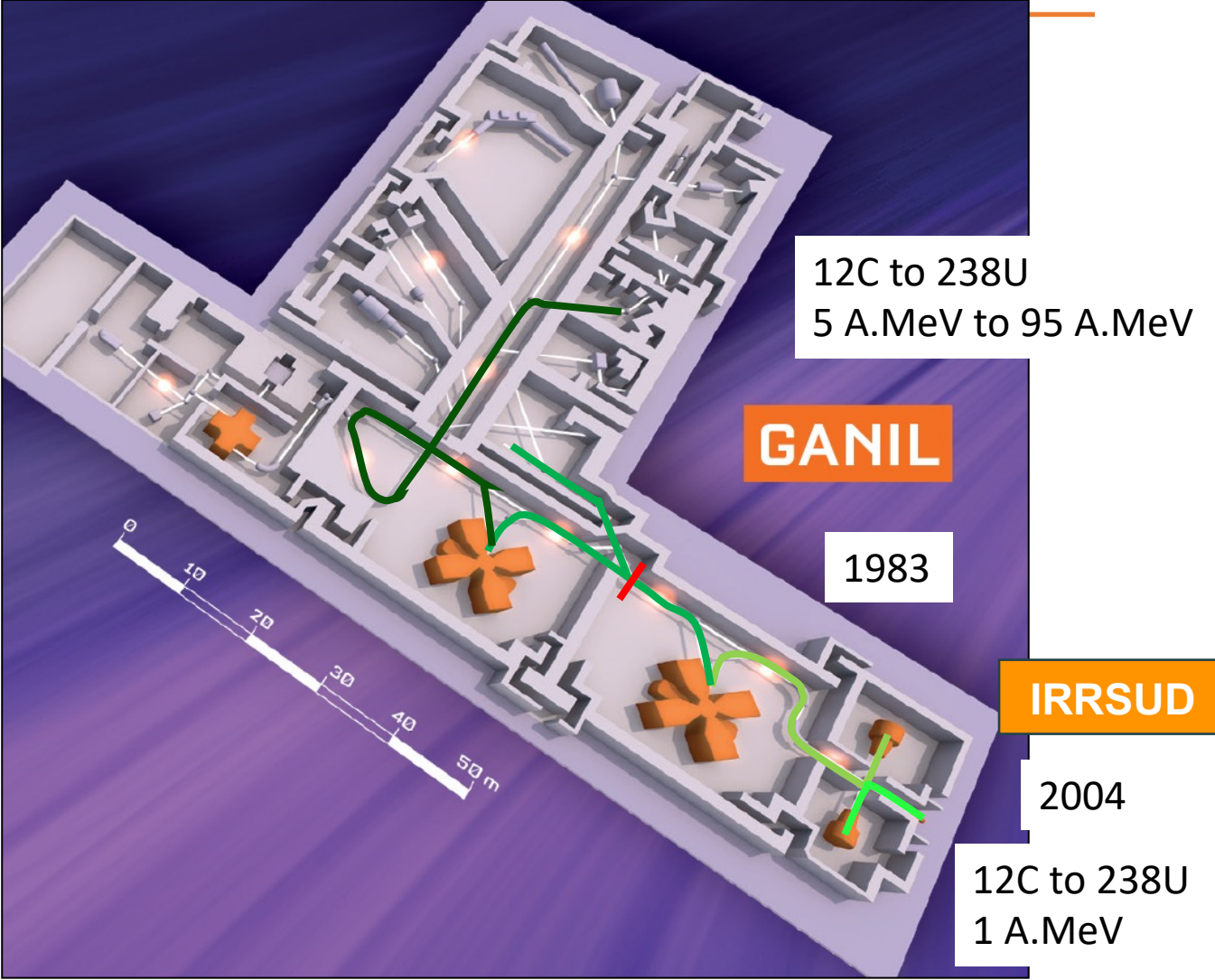
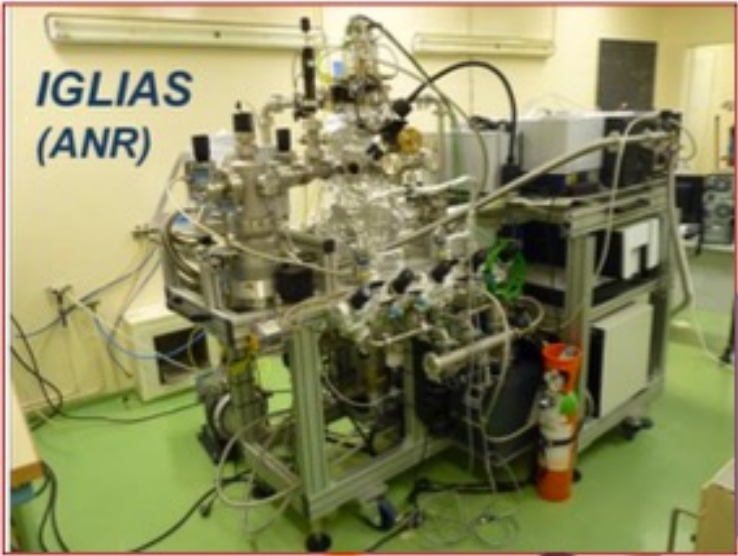
Matériaux pour les techniques quantiques : ordinateurs quantiques, stockage de données, cryptographie...



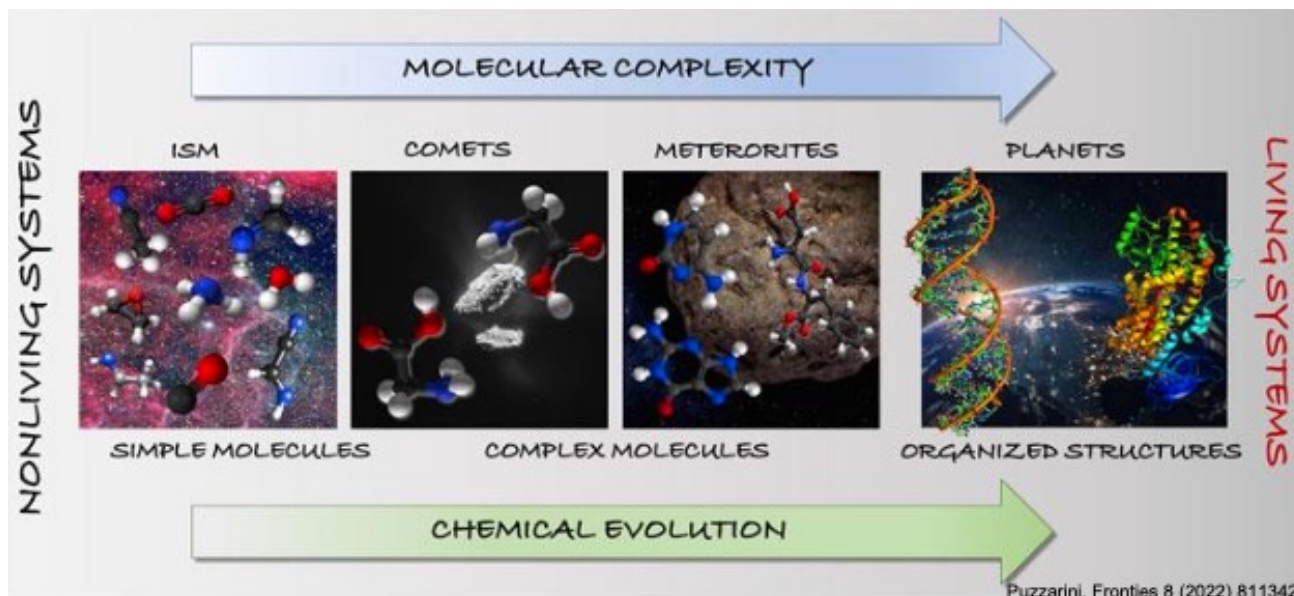
An aerial, top-down view of a complex industrial facility, likely a laboratory or processing plant. The scene is filled with various pieces of equipment, including large cylindrical tanks, intricate piping systems, and structural metal frameworks. The entire image has a monochromatic blue tint. The text 'CANIL' is overlaid in the upper center, and 'Astrochimie' is overlaid in the lower center, both in white.

CANIL

Astrochimie



Astrochimie



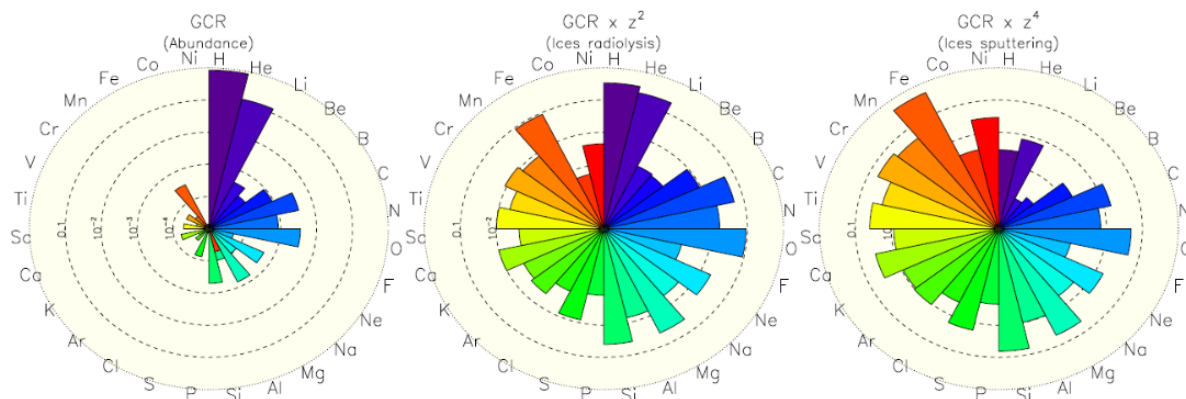
Les météorites sont couvertes de manteaux glacés sont formés à partir de molécules simples (H₂O, CO, CO₂, NH₃, CH₄, etc.).

Irradiation par UV, X, électrons, **ions** (rayons cosmiques, vent solaire, magnétosphère).

Abondances

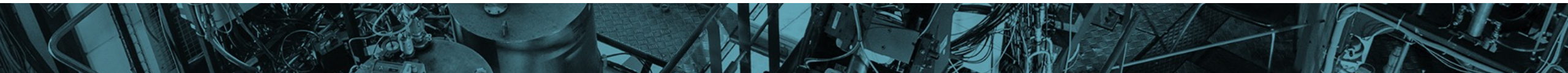
Radiolyse

pulvérisation



L'irradiation entraîne : des changements structuraux de la glace, la désorption/la pulvérisation, la radiolyse (fragmentation) et la formation d'espèces complexes

Un nouvel équipement MIRRPLA pour l'étude des effets sim UV, X, ions lourds

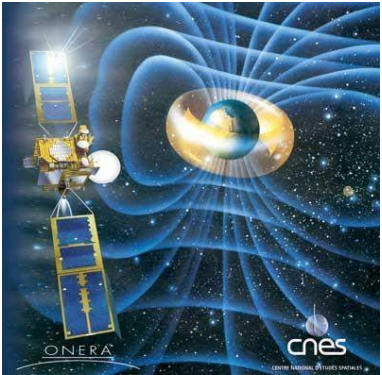




CANIL

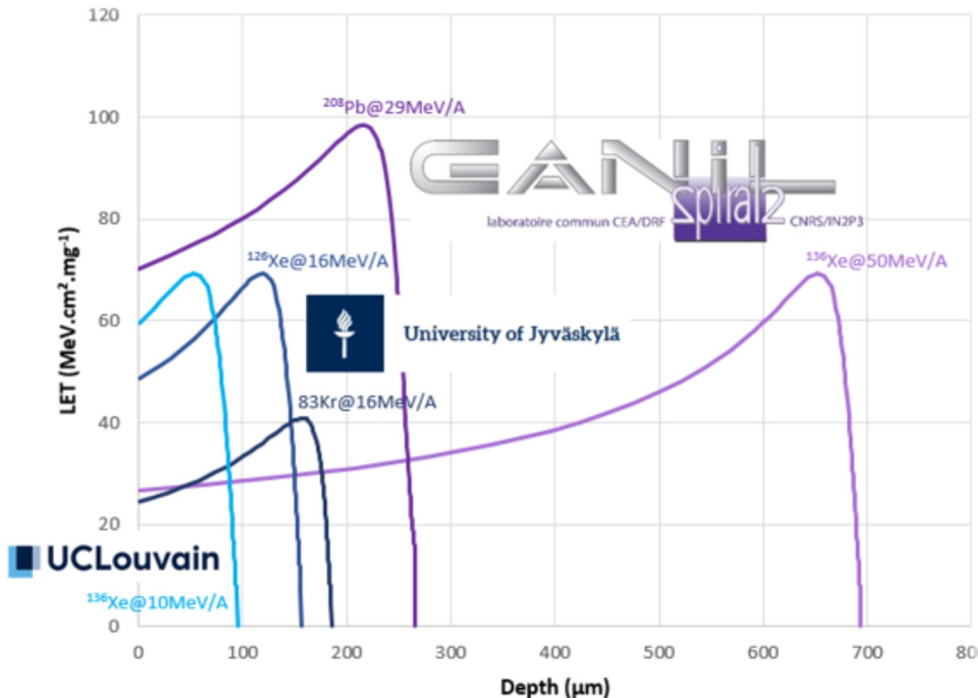
Applications pour le spatial

Projet SAGA : Space Applications@Ganil Accelerators.



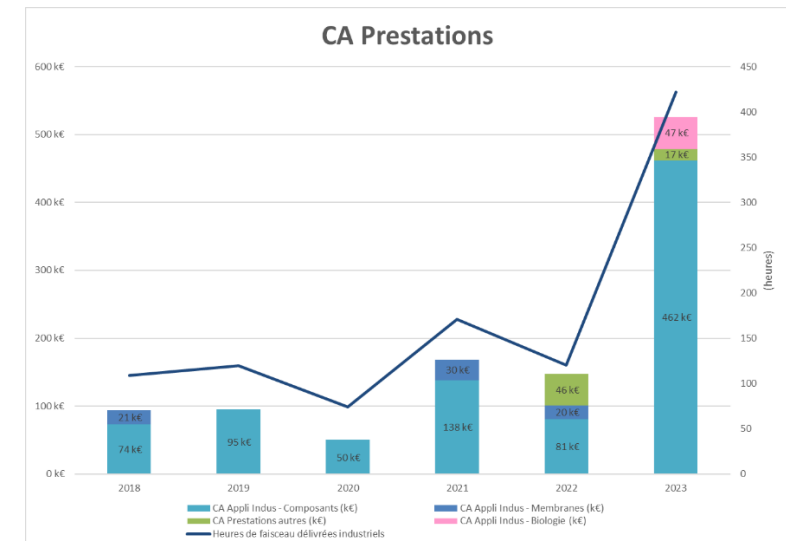
L'environnement radiatif spatial est la source principale de la dégradation des systèmes électroniques des satellites, pouvant conduire à l'échec de missions spatiales
=> nécessité de faire des tests de ces composants électroniques auprès d'accélérateurs permettant de reproduire les conditions d'environnement radiatif.

Emergence du « New space », utilisation de COTS (composants sur étagères), complexité croissante des technologies
=> accélérateurs saturés en Europe, difficulté d'accès aux machines US.

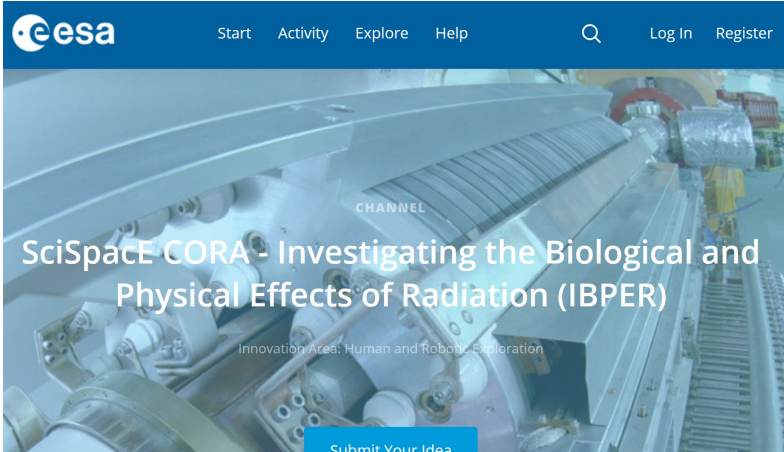


Trois accélérateurs en Europe utilisés par les industriels du spatial: Louvain en Belgique, Jyväskylä en Finlande, GANIL

GANIL a les faisceaux de plus haute énergie en Europe => forte hausse de la demande depuis 2023



Étude des effets biologiques des rayonnements



Exemple de projet sur la plateforme IRIA

Le système immunitaire dans l'espace

Les mécanismes de dysfonctionnement des cellules lymphocytes

Baisse de l'immunité



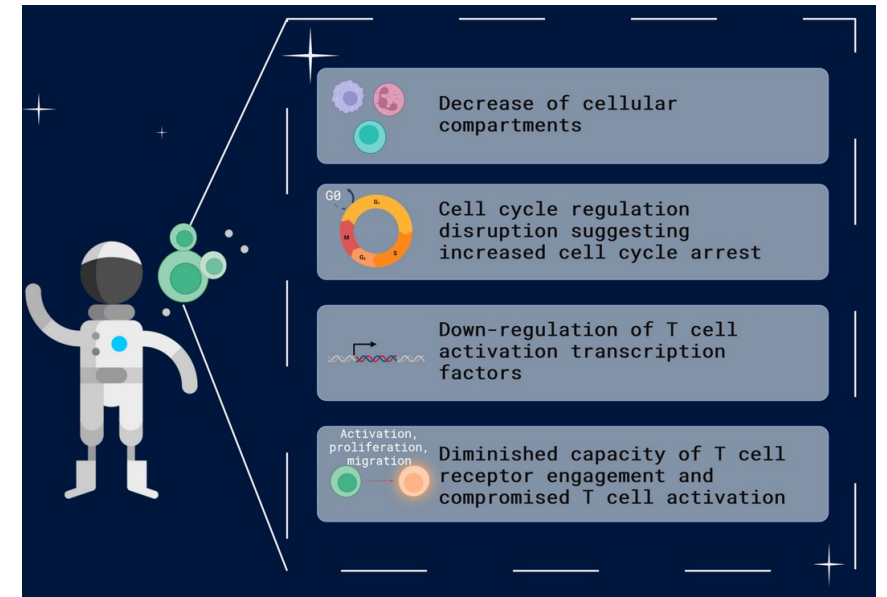
radiation exposure



simulated microgravity



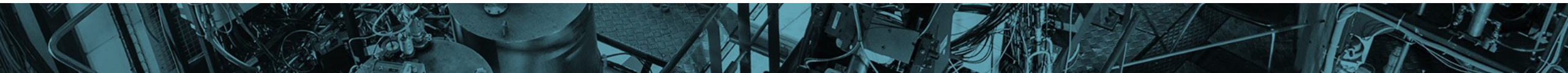
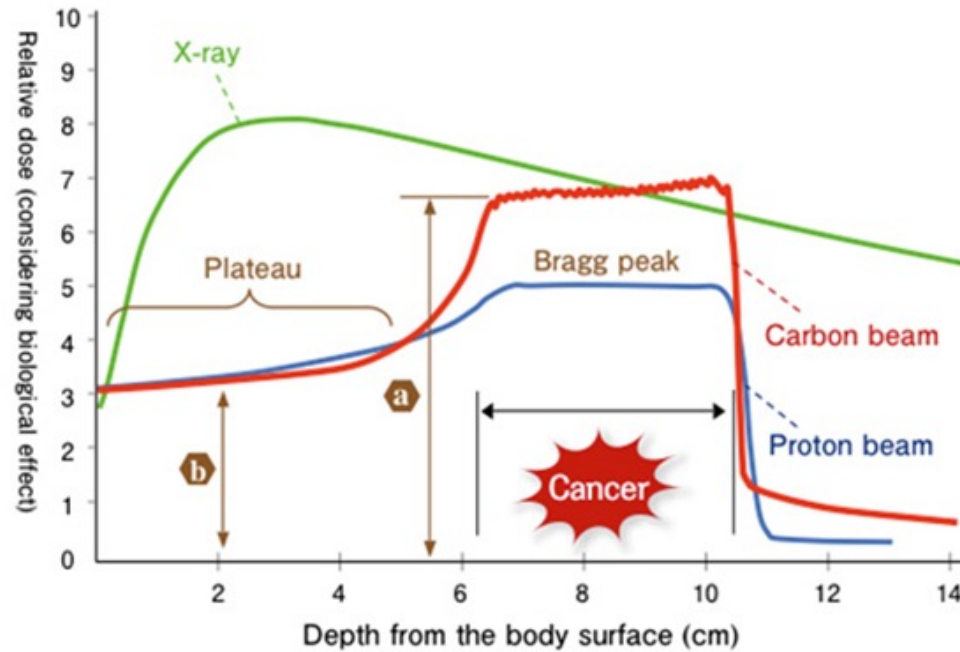
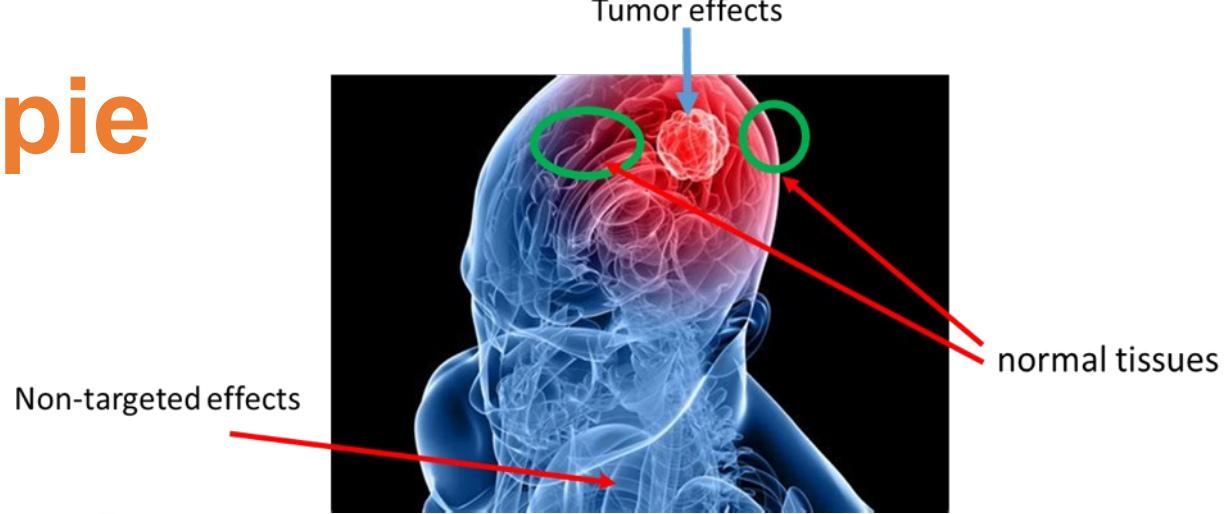
24 h



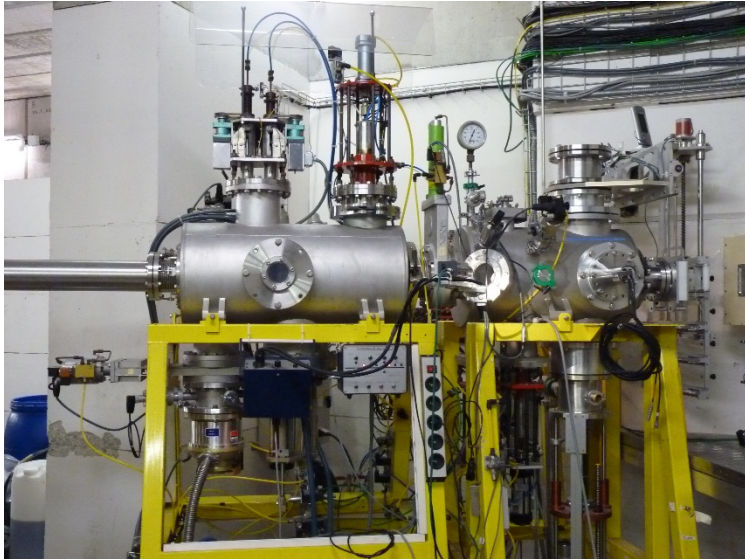


CANIL
Radiobiologie
Hadronthérapie
Thérapies innovantes

Hadronthérapie



Étude des modalités d'irradiation pour le traitement du cancer



Ciril

Platform

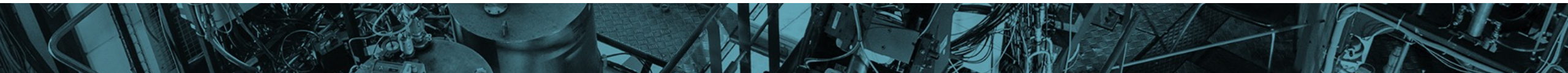
iRiA
irradiations for Radiobiology
with Accelerated ions

Plateforme
labellisée 2023

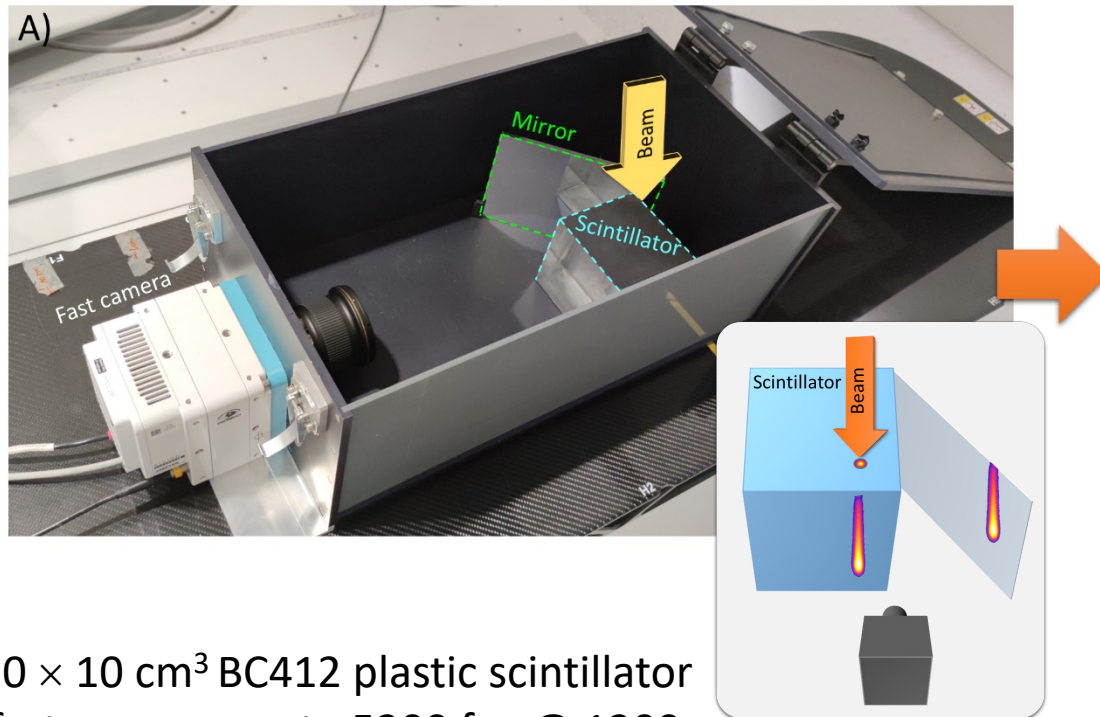
IBISA

• Infrastructures
en Biologie
Santé et
Agronomie

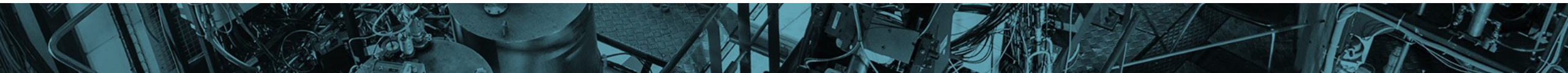
- ✓ Grand pouvoir de pénétration du faisceau énergétique de ^{12}C 95 A.MeV
- ✓ Recherche fondamentale sur la radio-résistance (hypoxie, cellules souches cancéreuses)
- ✓ Radiosensibilisation à l'aide de nanomatériaux
- ✓ Réduire les effets secondaires sur les tissus sains avec un débit de dose élevé (FLASH)



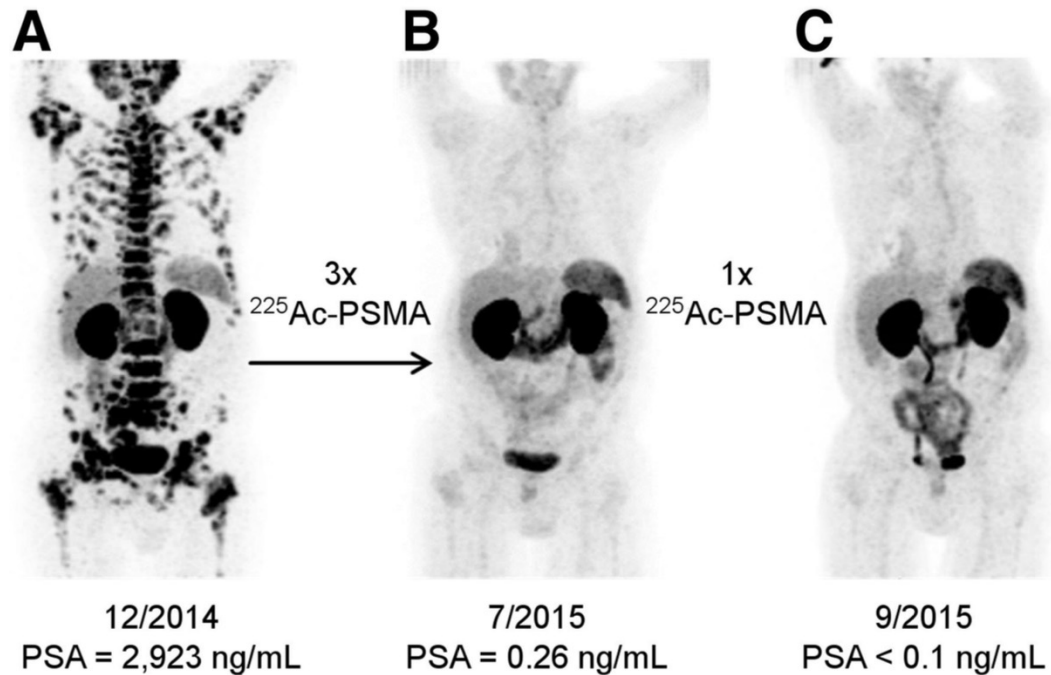
Développement de dosimètres perfectionnés



$10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ BC412 plastic scintillator
Ultra fast camera: up to 5200 fps @ $1200 \times 800 \text{ px}$
Synchronized to the “bursts delivery” (delivered at 1 kHz)
← logical signal provided by the Proteus® ONE



Production de radio-isotopes innovants pour la thérapie alpha ciblée

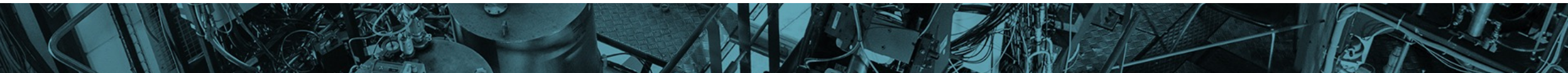


$^{68}\text{Ga-PSMA-11}$ PET/CT scans of patient A. Pretherapeutic tumor spread (A), restaging 2 mo after third cycle of $^{225}\text{Ac-PSMA-617}$ (B), and restaging 2 mo after one additional consolidation therapy (C). Clemens Kratochwil et al. J Nucl Med 2016;57:1941-1944

- Radio-isotope transporté vers les sites cancéreux par des vecteurs appropriés
- tumeurs circulantes ou distribuées
- L'émission de particules alpha d'une portée comparable à celle des cellules cancéreuses est un couteau précis.

Projet sur ^{211}At

- Theranostique
- Une seule décroissance alpha

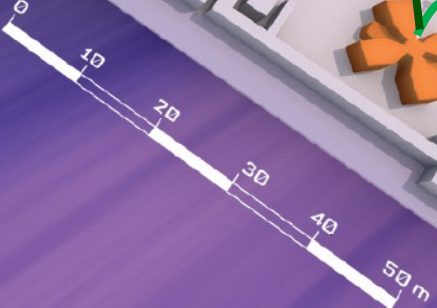


SPIRAL 2 - PHASE 1

2019



GANIL



Production de radio-isotopes innovants pour la thérapie alpha ciblée

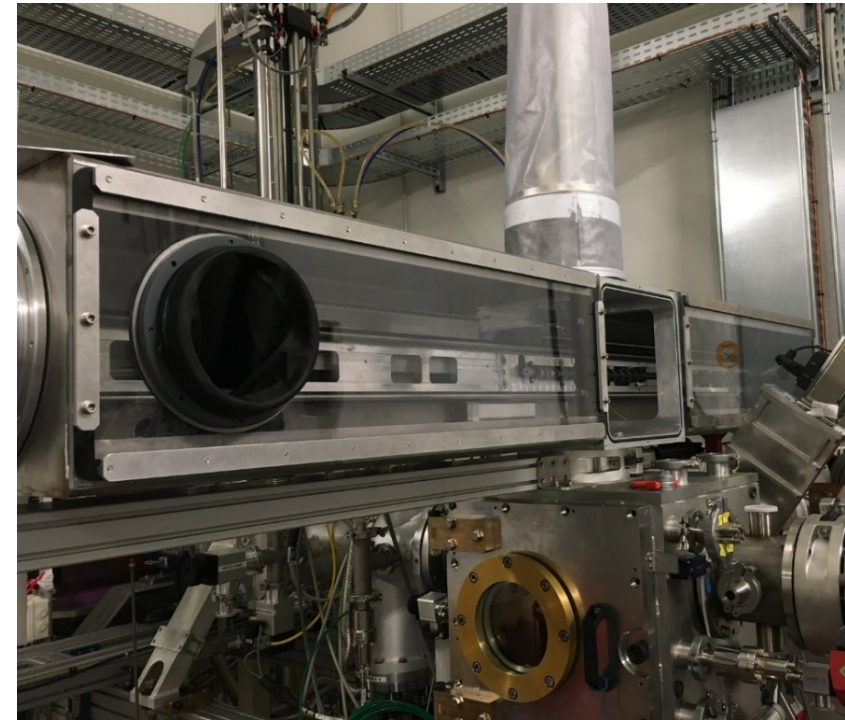


✓ Tests dans la salle du convertisseur de NFS

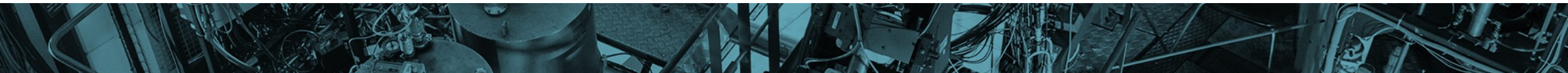
Production d'At avec un faisceau d'He sur une cible rotative refroidie de Bi.



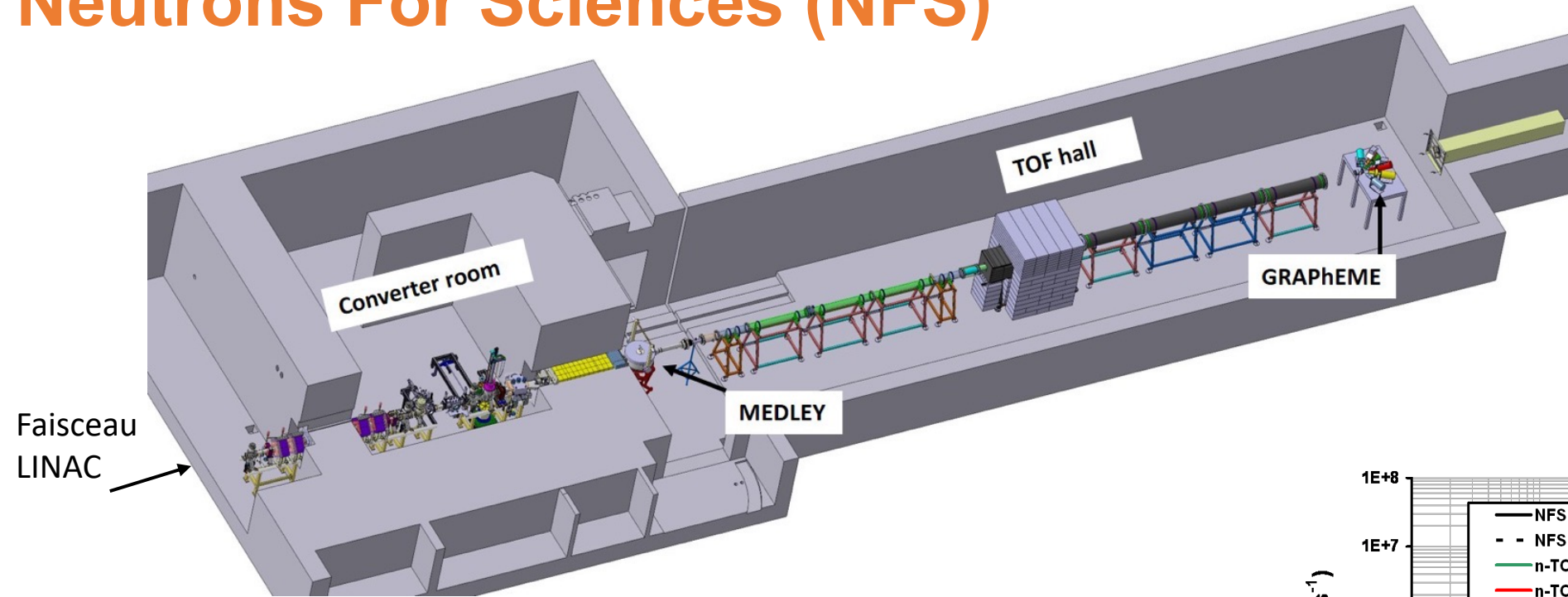
Prochain test en 2024



La preuve de principe peut être réalisée au GANIL,
mais une production réelle nécessite la construction d'une infrastructure dédiée

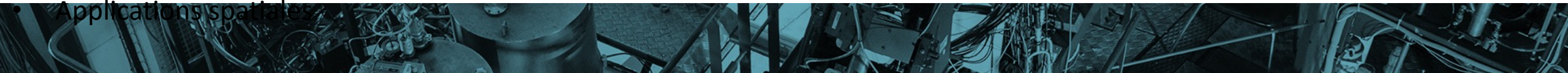
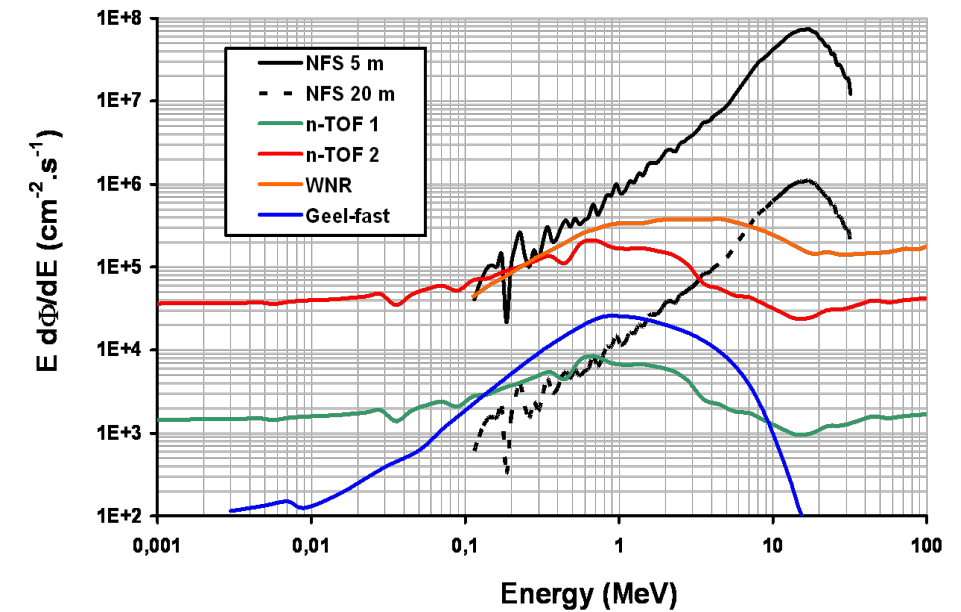


Neutrons For Sciences (NFS)

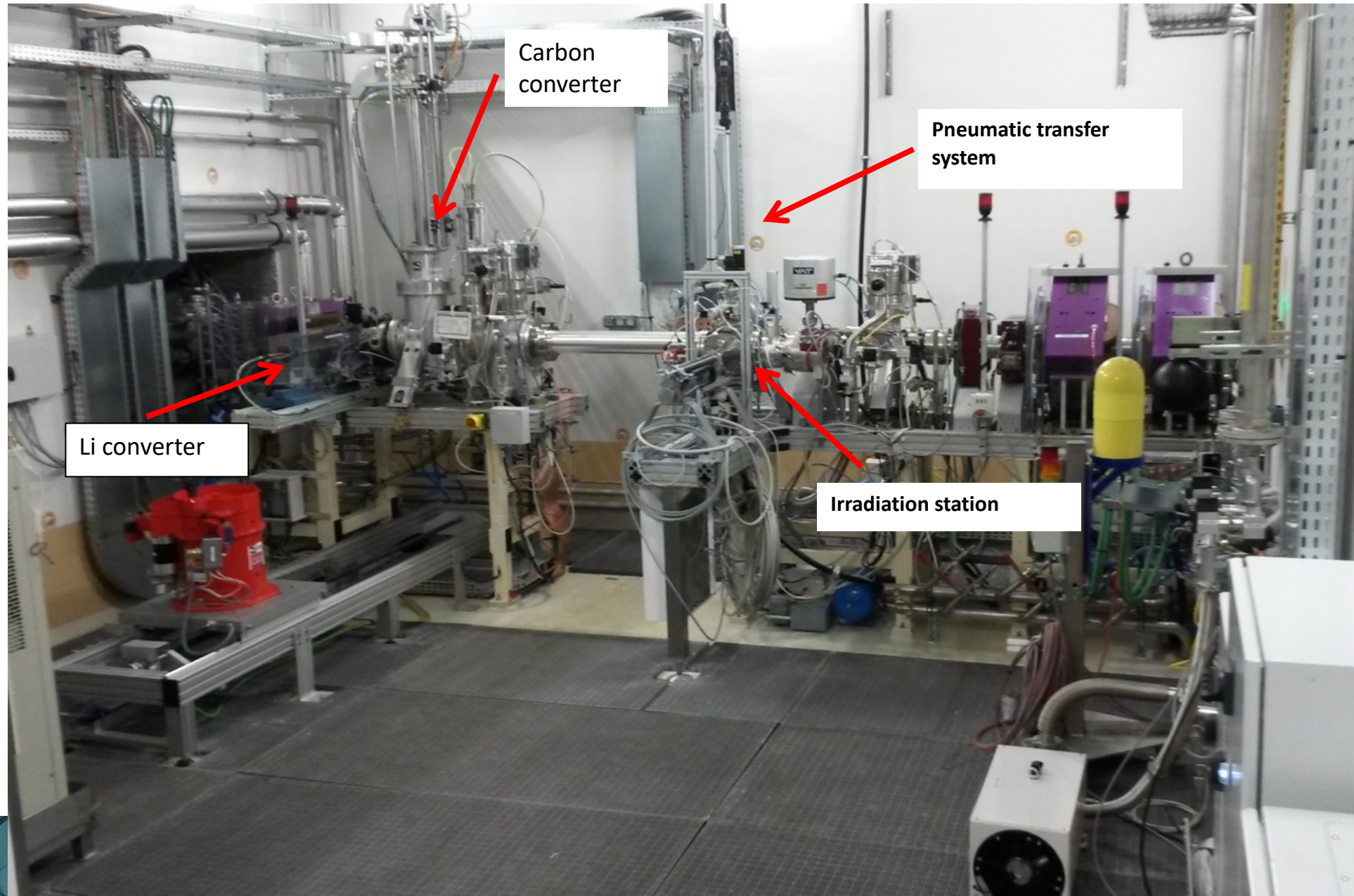


Thèmes principaux

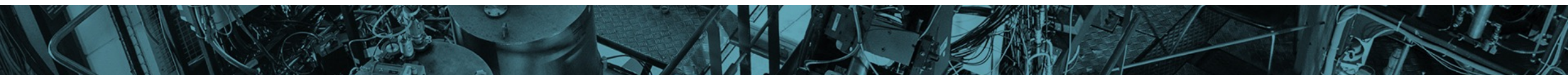
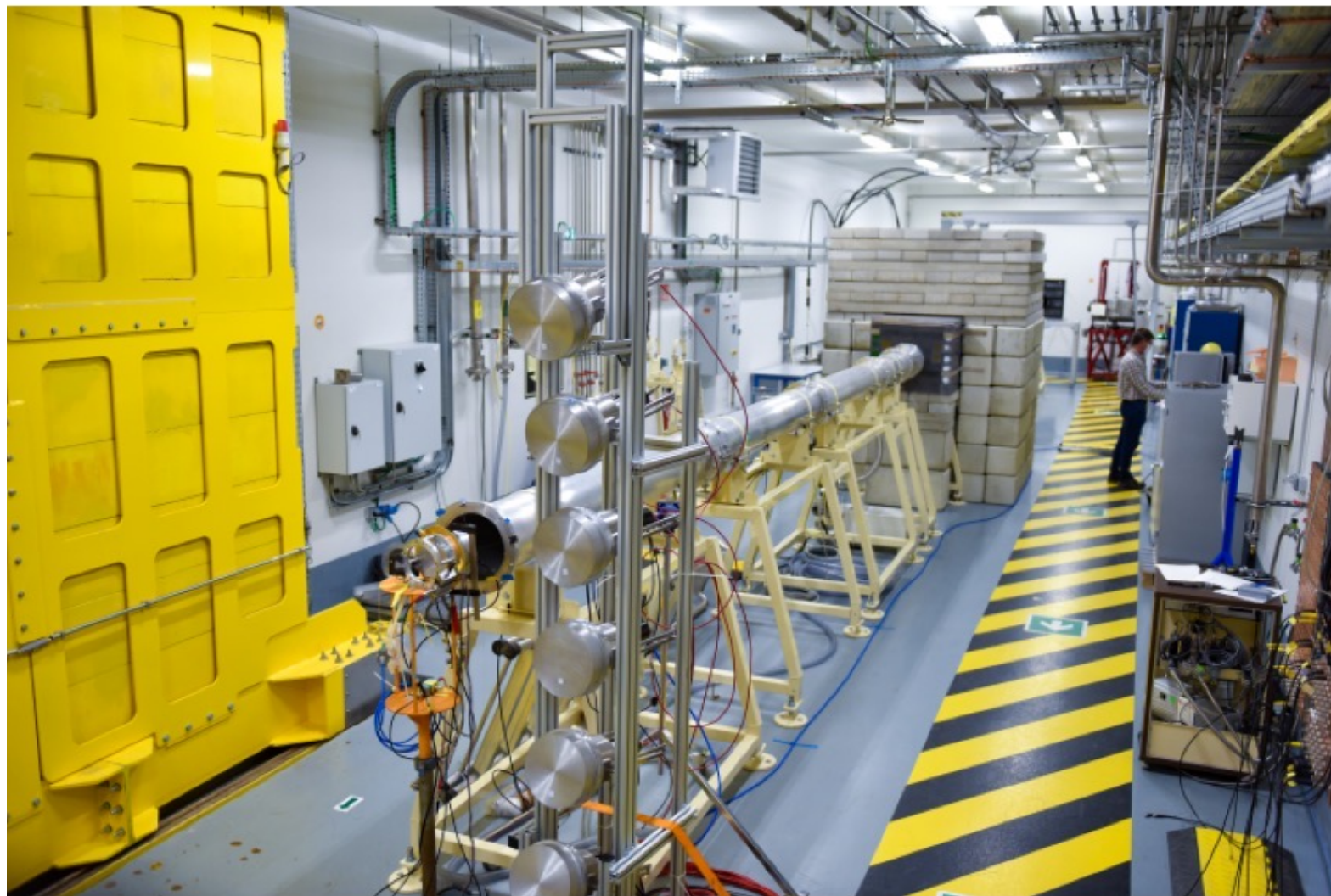
- Physique fondamentale
- Astrophysique
- Données nucléaires pour les réacteurs nucléaires de nouvelle génération
- Technologies de fusion
- Radioisotopes pour applications médicales
- Développement de l'instrumentation
- Applications spatiales



NFS : salle du convertisseur

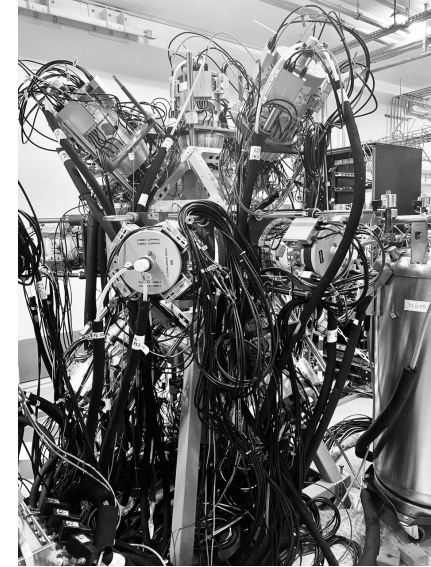


NFS : salle de mesures “temps de vol”



NFS : salle de mesures “temps de vol”

➤ Pygmy dipole resonance in ^{140}Ce using the $(n,n'\gamma)$ reaction, Marine Vandebrouck et al



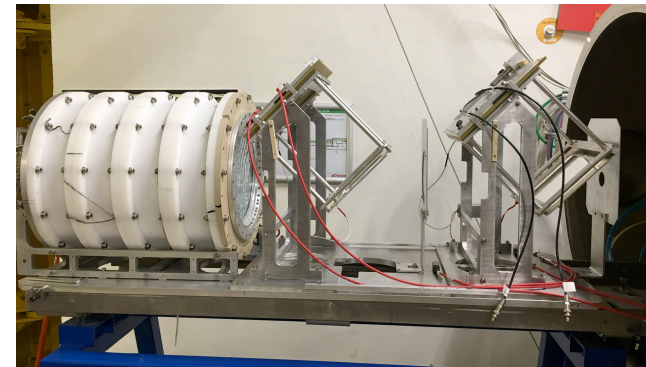
➤ Shedding new light on the structure of ^{56}Ni using $(n,3n)$ reaction at NFS, E. Clement et al

➤ LIONS: Light ions production studies with MEDLEY at the NFS facility, Diego Tarrío et al



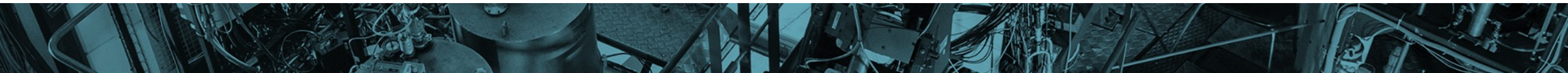
MEDLEY

➤ GARIC: Gas pRoduction in Chromium, Iron by neutrons, Diego Tarrío et al

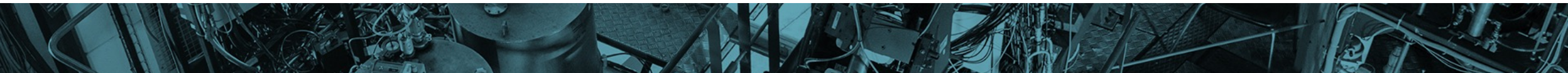
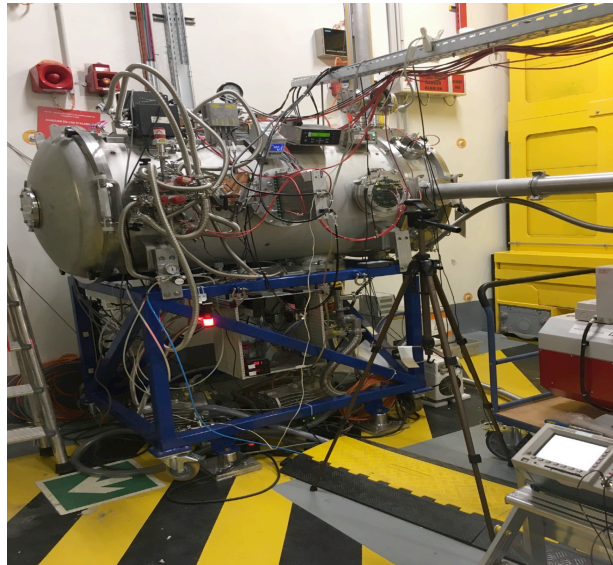
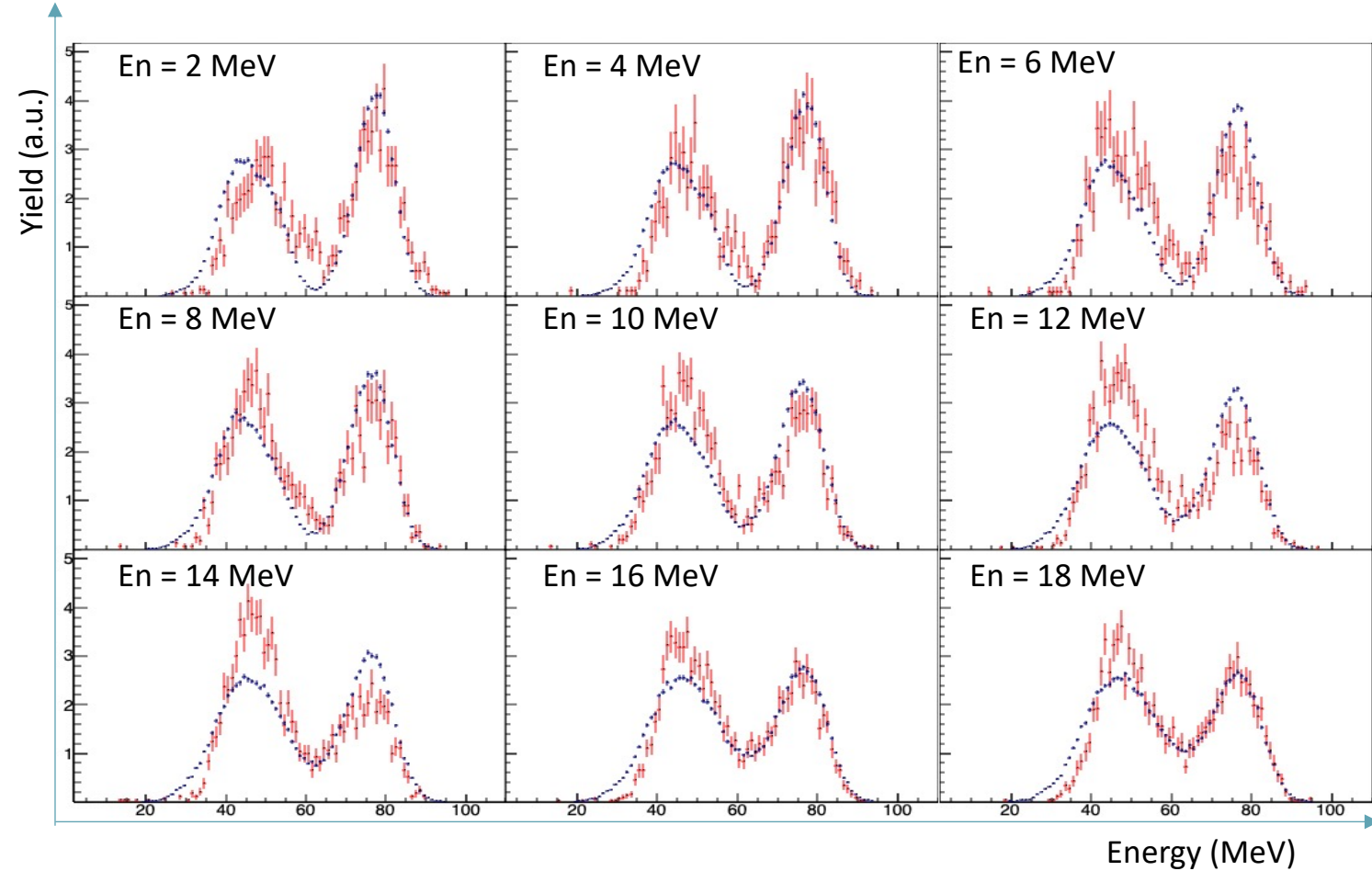
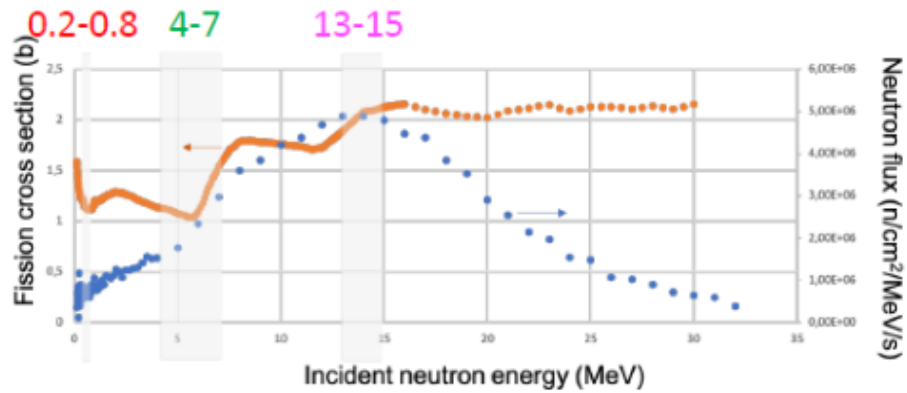


^{235}U fisFALSTAFF at NFS, D. Doré et al.
Fission fragment study with excitation energy

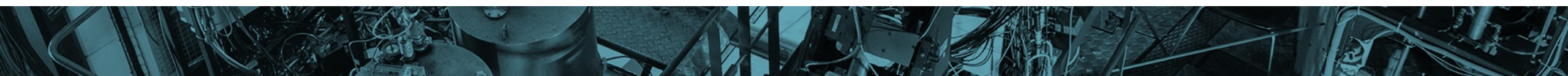
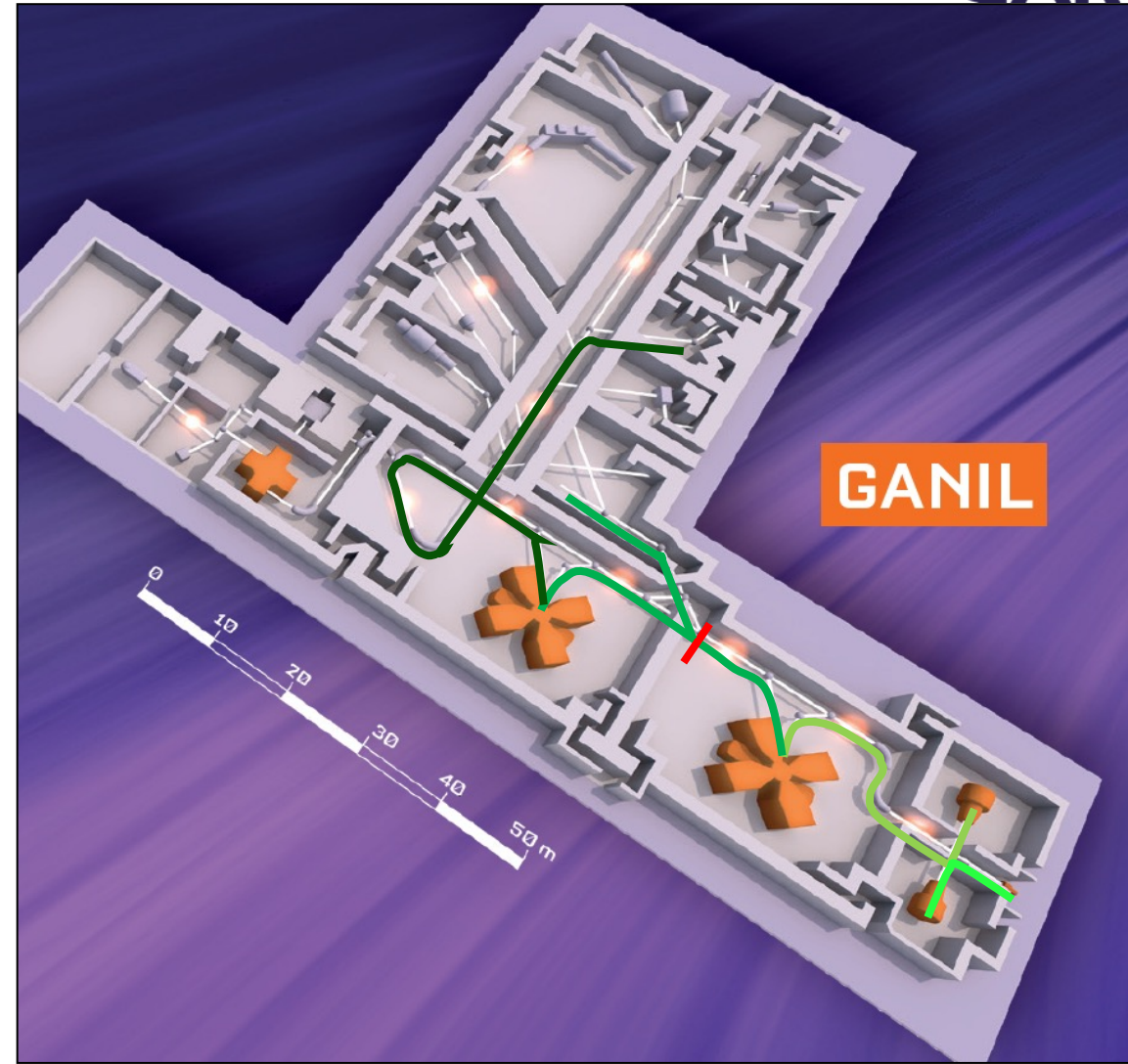
➤ $(n,xn\gamma)$ reaction cross section measurements for nuclear energy, M. Kerveno



Evolution de la distribution des fragments de fission en fonction de l'énergie des neutrons incidents



SPIRAL 2 - PHASE 1



Étude des événements rares en physique nucléaire et atomique

Dripline de protons et noyaux N=Z

- Structure nucléaire
- Interaction π - ν
- Coexistence déformation - sphérique
- Désintégration exotique
- Processus rp en astrophysique
- Interaction fondamentale

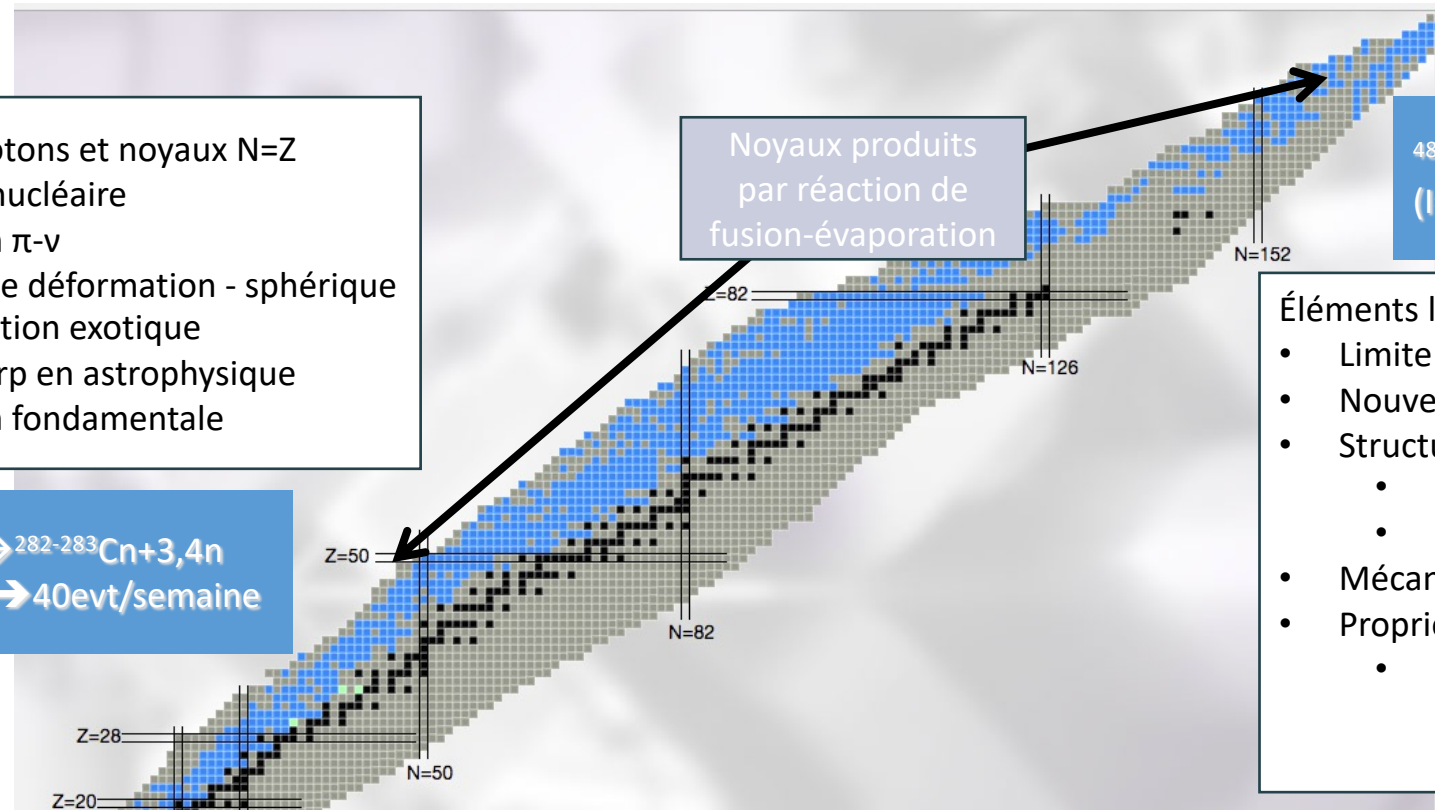


Noyaux produits par réaction de fusion-évaporation



Éléments lourds et super-lourds

- Limite de l'existence nucléaire
- Nouvelle fermeture de couche
 - Isomères, formes et moments
 - Déformation octupolaire
- Mécanismes de réaction
- Propriétés atomiques
 - Effets relativistes et positionnement dans la table périodique

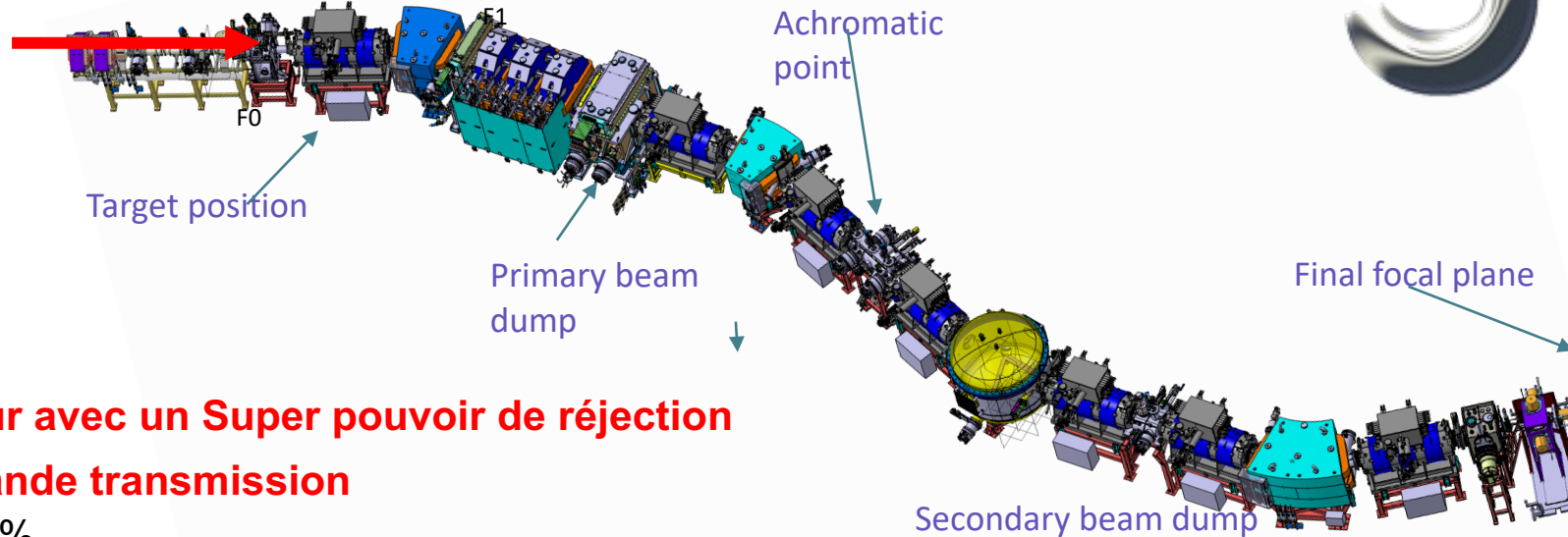


Super Séparateur Spectromètre



Faisceau de haute intensité

High power target: $\gg 1\mu\text{A}$ ($= 6.10^{12}\text{p/s}$)



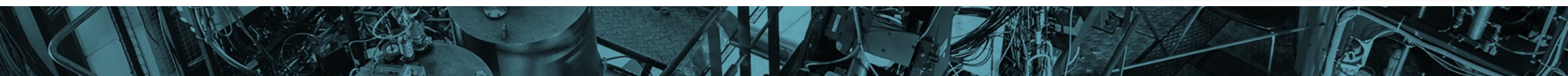
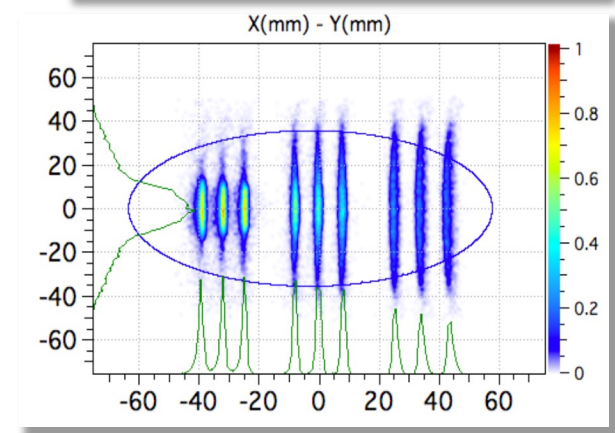
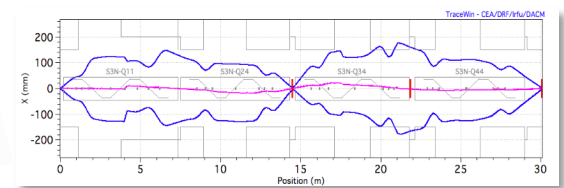
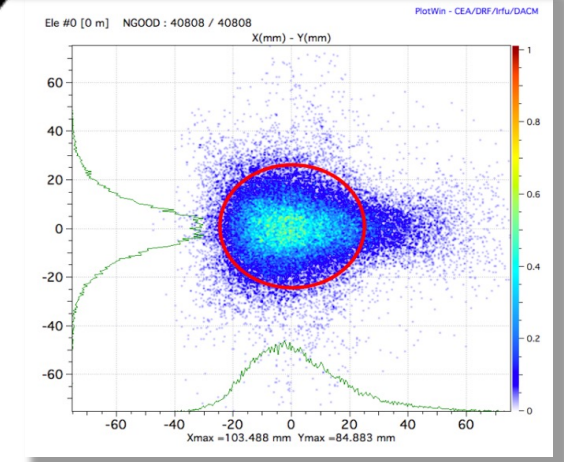
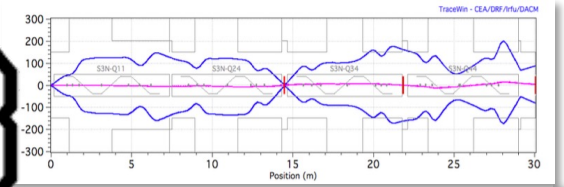
Séparateur avec un Super pouvoir de réjection et une grande transmission

- $\Delta p/p = 16\%$
- $\Delta\theta = 45\text{mrad}$
- $\Delta\phi = 140\text{mrad}$

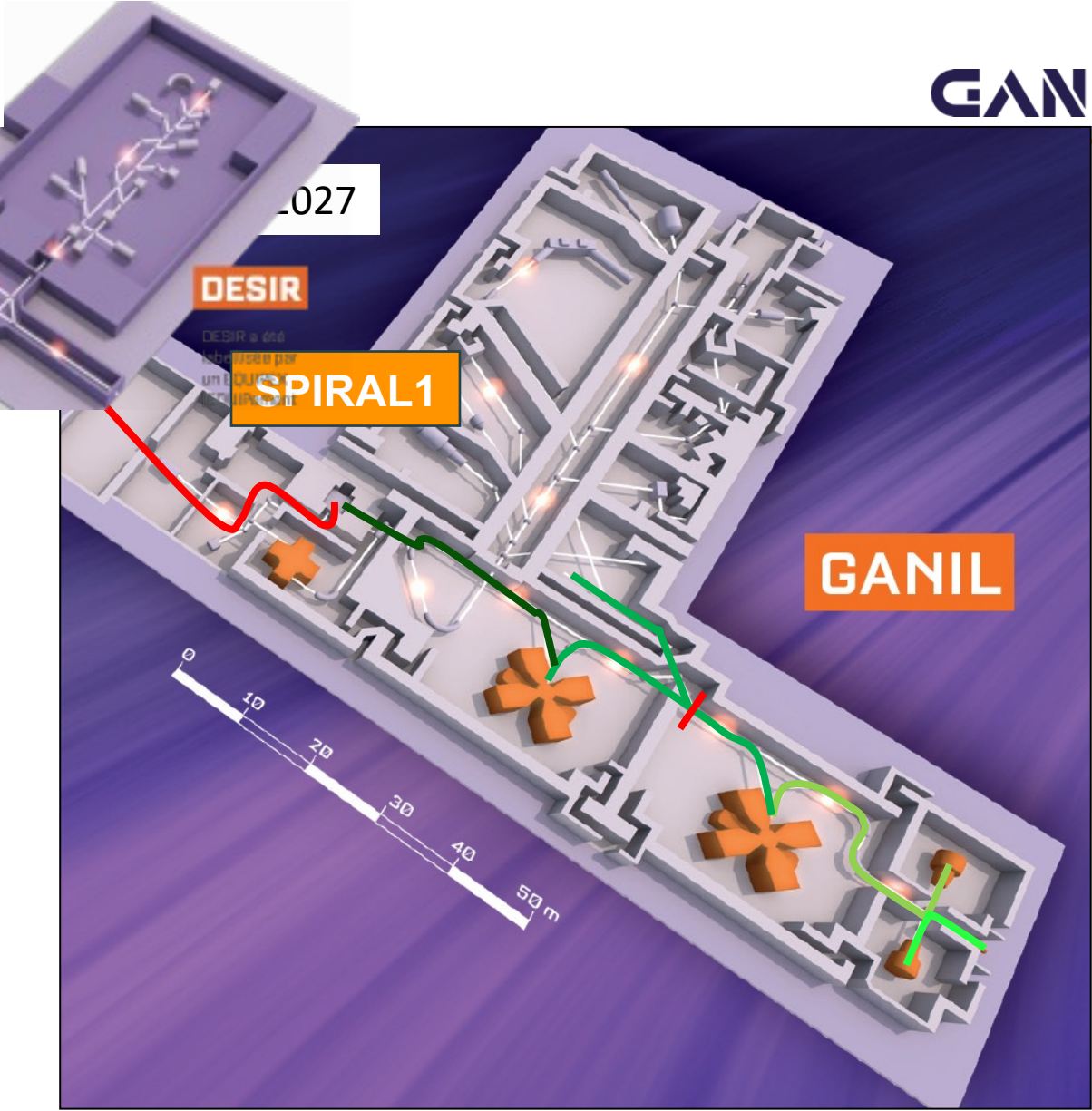
• Elements magnétiques superconducteurs

Spectromètre avec un super pouvoir de résolution

- m/q dispersion = 8 mm/%
- 3 charge states & $M/\Delta M = 500$



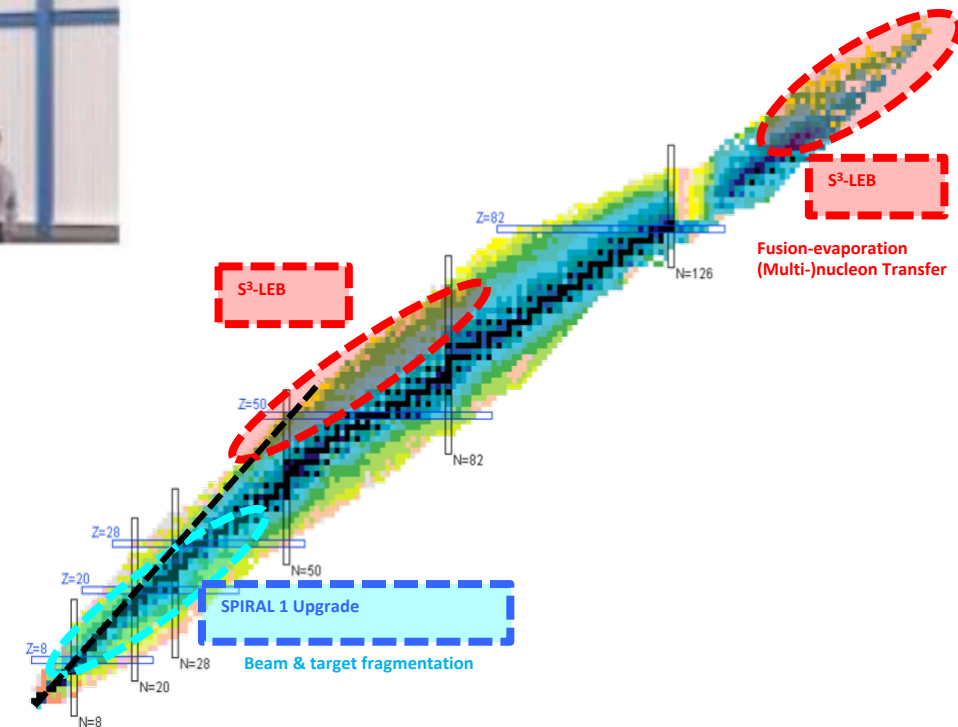
SPIRAL 2 - PHASE 1



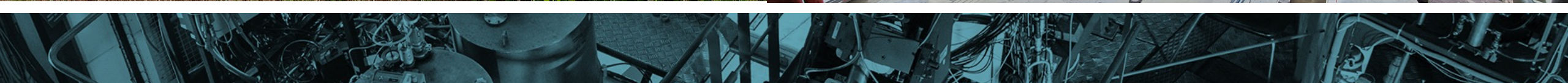


- Inauguration du chantier novembre 2023
- Premiers faisceaux stables 2026
- Premières expériences 2027

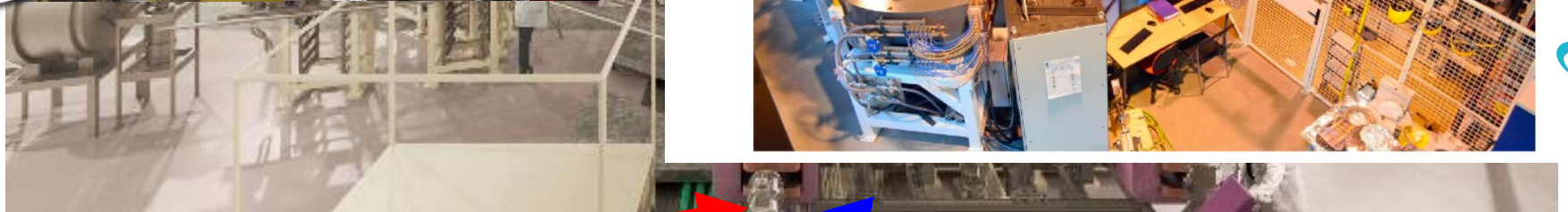
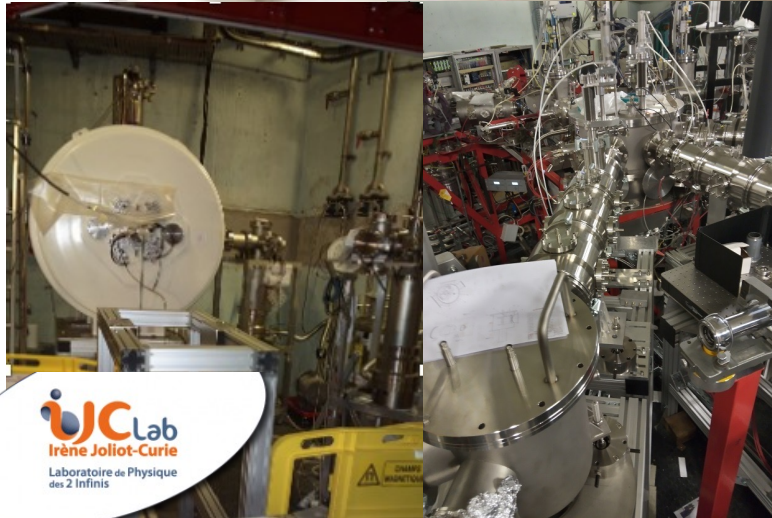
- Faisceaux de SPIRAL1 and S^3
- Très haute purification
- Haute résolution et expériences de grande précision
- Etudes fondamentales des propriétés des noyaux :
masse, durée de vie, décroissance, spin, moments quadrupolaires ...
- Nucleosynthèse
- Interactions fondamentales, tests de l'interaction faible



DESIR en image



DESIR en image



S³-LEB beam

SPIRAL1 beam

Merci pour votre attention

