Orientations des accélérateurs au CEA

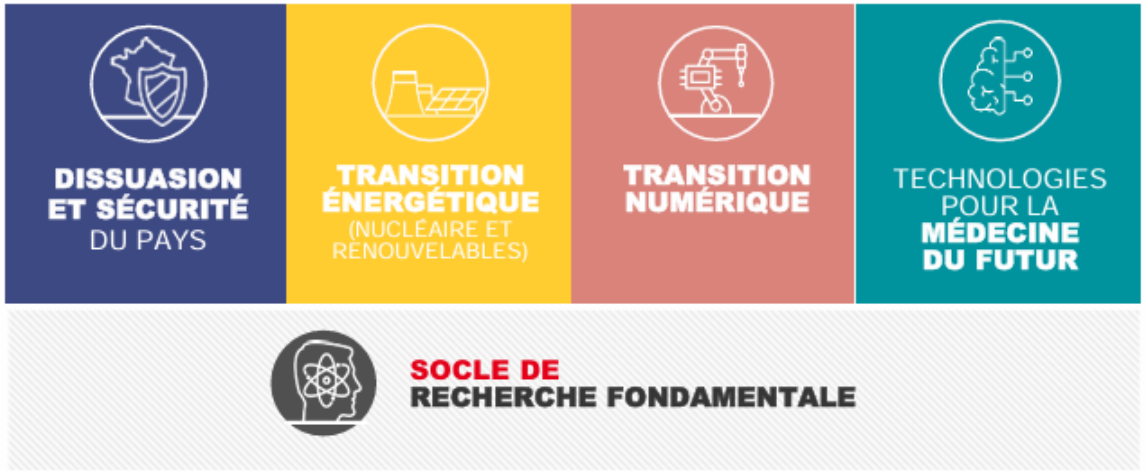
Catherine MADEC

SOMMAIRE

- A quels enjeux répondent les développements des accélérateurs au CEA ?
- Quels sont les développements dans le domaine des accélérateurs au CEA ?
- Quelles sont les orientations ?

Répondre aux enjeux sociétaux et scientifiques

Au service de l'État, des enjeux de souveraineté et compétitivité

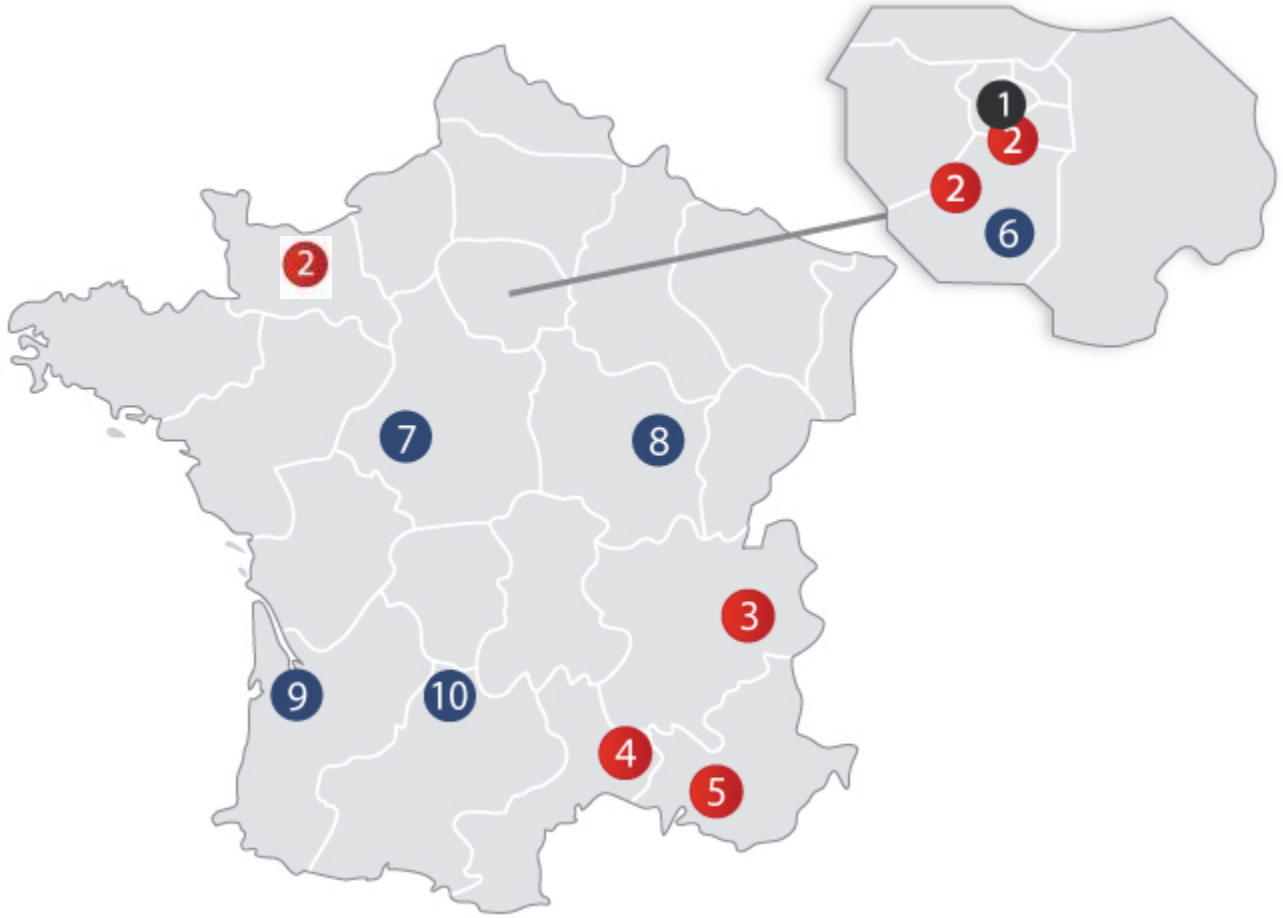


- **2e ORGANISME DE RECHERCHE PUBLIC** en France (après le CNRS).
- Des **OBJECTIFS SCIENTIFIQUES & TECHNIQUES** définis autour de quatre axes et d'un socle de recherche fondamentale qui bénéficie à chacun d'entre eux.

Une RAISON D'ÊTRE

"Agir pour assurer à la France et à l'Europe un leadership scientifique, technologique et industriel, ainsi qu'un présent et un avenir mieux maitrisés et plus sûrs pour tous."

CEA, Implantation des accélérateurs



1 SIÈGE SOCIAL

CENTRES D'ÉTUDE CIVILS

2 Paris-Saclay
établissements de Fontenay-aux-Roses et de Saclay

3 Grenoble

4 Marcoule

5 Cadarache

CENTRES POUR
LES **APPLICATIONS MILITAIRES**

6 DAM Ile-de-France

7 Le Ripault

8 Valduc

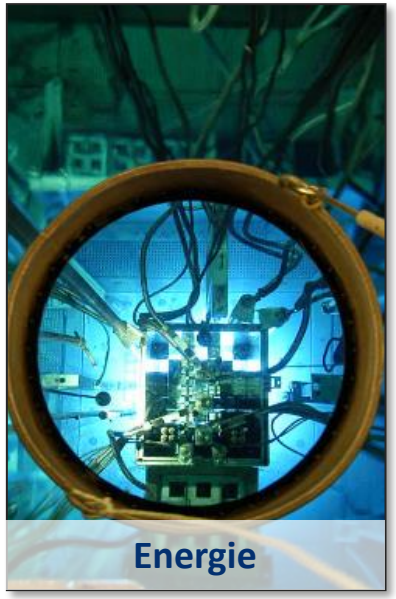
9 Cesta

10 Gramat

Les accélérateurs : supports pour répondre aux objectifs du CEA









cea isas

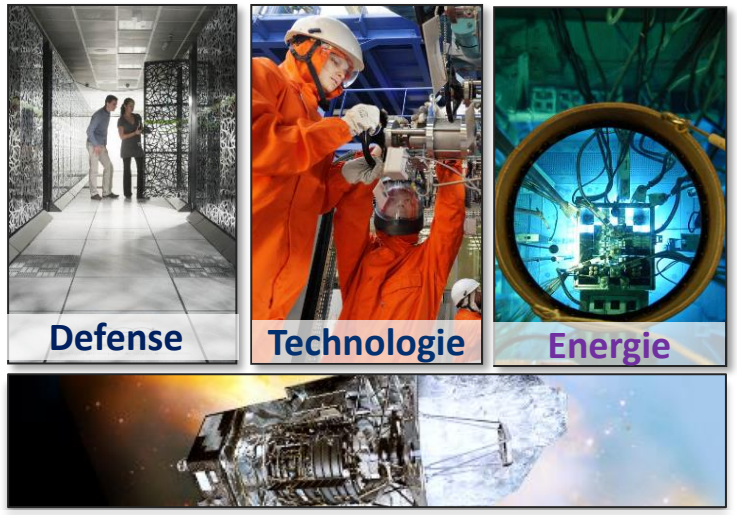
cea iramis

cea irfu

GANIL

Les accélérateurs : supports pour répondre aux objectifs du CEA

- Radiographie d'objets très denses en évolution rapide,
- Tests détecteurs X, comportement composants électroniques sous irradiation
- Analyse de matériaux par faisceau d'ions
- Etudes composants électroniques
- Etalonnages de diagnostics LMJ-PETAL
- Durcissement électronique
- Mesures de section efficace et de cascade de décroissance de noyaux (SFyNCS)



Recherche Fondamentale

- Comprendre les lois fondamentales de l'univers
- Accéder à de nouveaux noyaux et repousser les limites de la carte nucléaire
- Développer des technologies d'accélérateurs de rupture (Laser Plasma)

- Simuler expérimentalement les effets physiques et chimiques induits lors de l'irradiation d'un matériau nucléaire par des neutrons (déplacements d'atomes résultant de l'accumulation des dommages balistiques et production de nouvelles espèces comme l'hélium ou l'hydrogène)
- Effets étudiés simultanément ou de manière dissociée dans des métaux, des alliages, des verres, des céramiques ou des matériaux composites

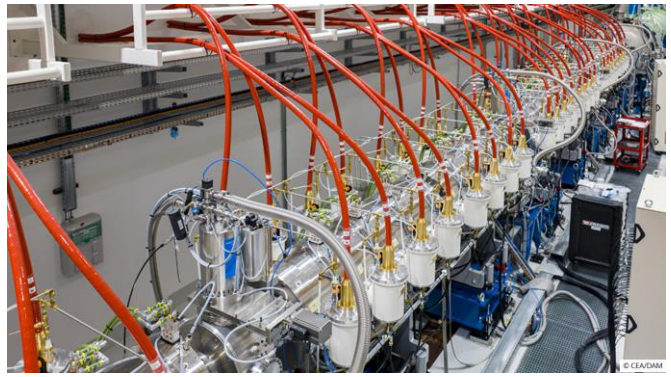
Les développements dans le domaine des accélérateurs

ACCELERATEURS DE LA DAM

EPURE : Radiographie Eclair d'objets très denses en évolution rapide

Accélérateurs d'électrons sur cible Tantale : 3 axes

- Axes 1 et 3 (CEA) : Accélérateurs à induction 64 cellules + focalisation cible Tantale ; 60 ns, 20 MeV, >2 kA.
- Axe 2 (TEUTATES - UK) : MERLIN UK (Inductive Voltage Adder 7,5 MV 230 kA)
- Mise en service : Axe 1 & Axe 2 2014. Axe 3 2022
- **Première expérience en configuration 3 axes : 11/12/2025.**
- **2026 : Travaux pour l'optimisation de la cadence et la fiabilisation**
- Perspectives : Travaux sur l'évolution future des injecteurs. (Voir par exemple : C. Vermare, et al., 2025 IEEE Pulsed Power & Plasma Science, R. Delaunay et al., Phys. Rev. Accel. Beams 25, 060401-2022)

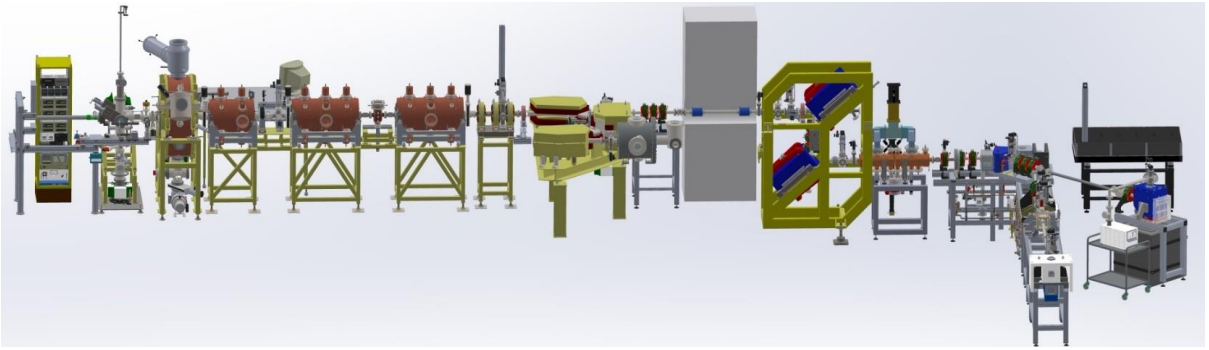


Site Valduc EPURE AXE 3

ELSA : Tests détecteurs X, comportement composants électroniques sous irradiation

Accélérateur RF 144 MHz d'électrons 17-30 MeV – Photo-injector

- 30 mA 200 µs 1 Hz (typ.) – durée paquets ~50 ps
- X Bremsstrahlung + Source Compton inverse
- Jouvence 1 et 2 : Ampli 144 MHz Solid State 2MW (2024) + Modulateur klystron 433MHz (2023)
- **Jouvence 3 : obj 40 MeV (collab IRFU sur les cavités et RF) : nouveaux klystron, nouvelle ligne : objectif 2030**

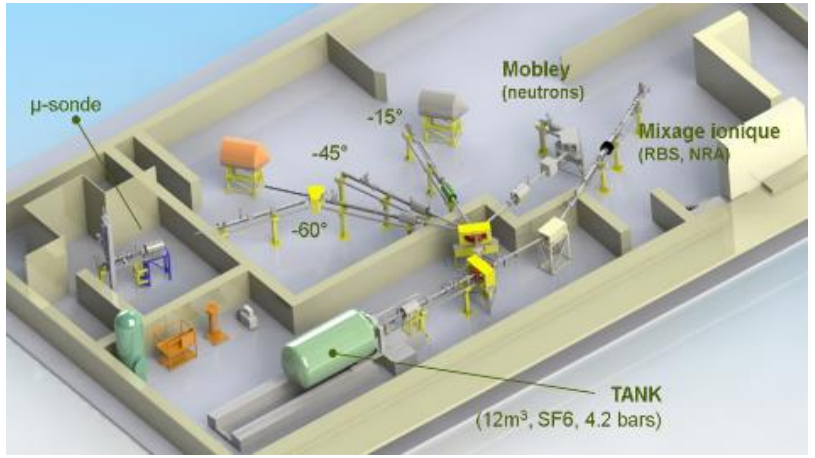


Courtesy V. Leflanchec

ACCELERATEURS DE LA DAM

Accélérateur 4MV – Van de Graaff :

- Faisceau d'ions protons, deutons et alphas 10 µA - Conversion en neutrons monocinétiques jusqu'à 20 MeV
- Analyse de matériaux par faisceau d'ions , Expériences de neutronique – Evaluation de données nucléaires, Etudes composants électroniques, Etalonnages de diagnostics LMJ-PETAL
- **Objectif 2027: un flux de l'ordre de 10^9 n/s/cm² avec une intensité de 50 µA pour mesurer de la section efficace ^{239}Pu(n,2n).**



4 MV VdG

Accélérateur TANDEM 7 MV – NENUPHAR (NEutroNs Utiles pour la PHysique des ARmes)

- Faisceaux d'ions proton et deuton 14 MeV ~15 µA + neutrons
- Programmes de physique nucléaire : Mesures de section efficace, et mesure de cascade de décroissance de noyaux (SFyNCS).
- **Objectif 2027 et plus : Mise en service de nouvelles sources d'ions « chaudes » :**
  - Source Torvis : possibilité de l'utiliser dans son mode hélium (He-) (2028)
  - Source SNICS-II (2027) : production d'ions lourds (Si-, C-, Si-, …).
  - Physique nucléaire,
  - Durcissement électronique
  - Production de neutrons ou ions par cinématique inverse.

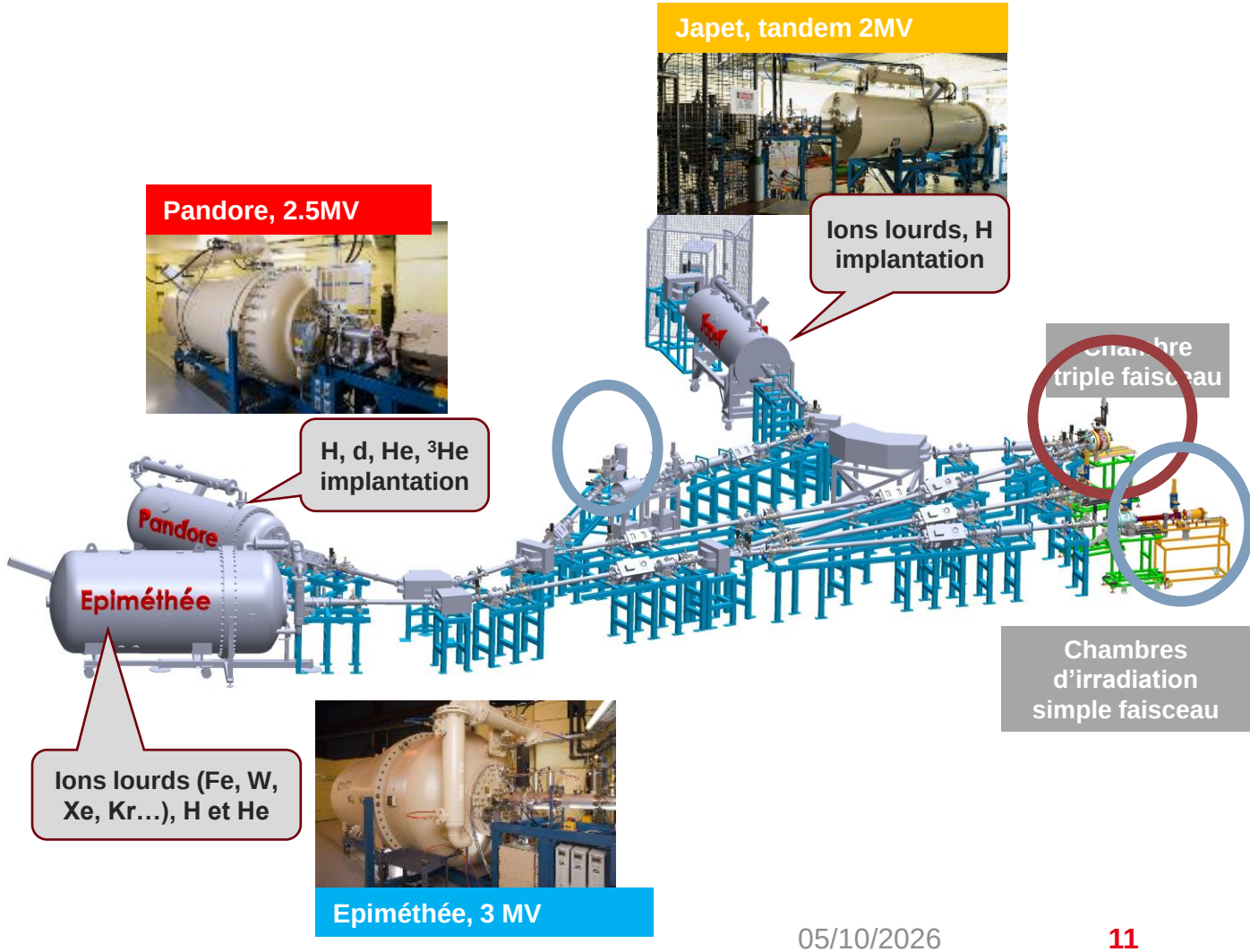


TANDEM

Courtesy V. Leflanchec

A la DES : Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation

- Associe trois accélérateurs électrostatiques d'ions (NEC) avec des gammes larges et complémentaires de particules et d'énergie (faisceau d'ions, en CW, 300keV – 36MeV, flux : 10^{10}-10^{13} at.cm^2/s
- En conditions extrêmes et manière contrôlée, Large gamme de température de -250°C à 1200°C sous vide secondaire (10^{-7}–10^{-8} Torr)
- ***Objectifs 2030 : développements pour répondre aux besoins expérimentaux :***
  - *En environnement (sel fondu + température…)*
  - *Développer les mesures in-situ pour déterminer les propriétés thermo-élastiques*



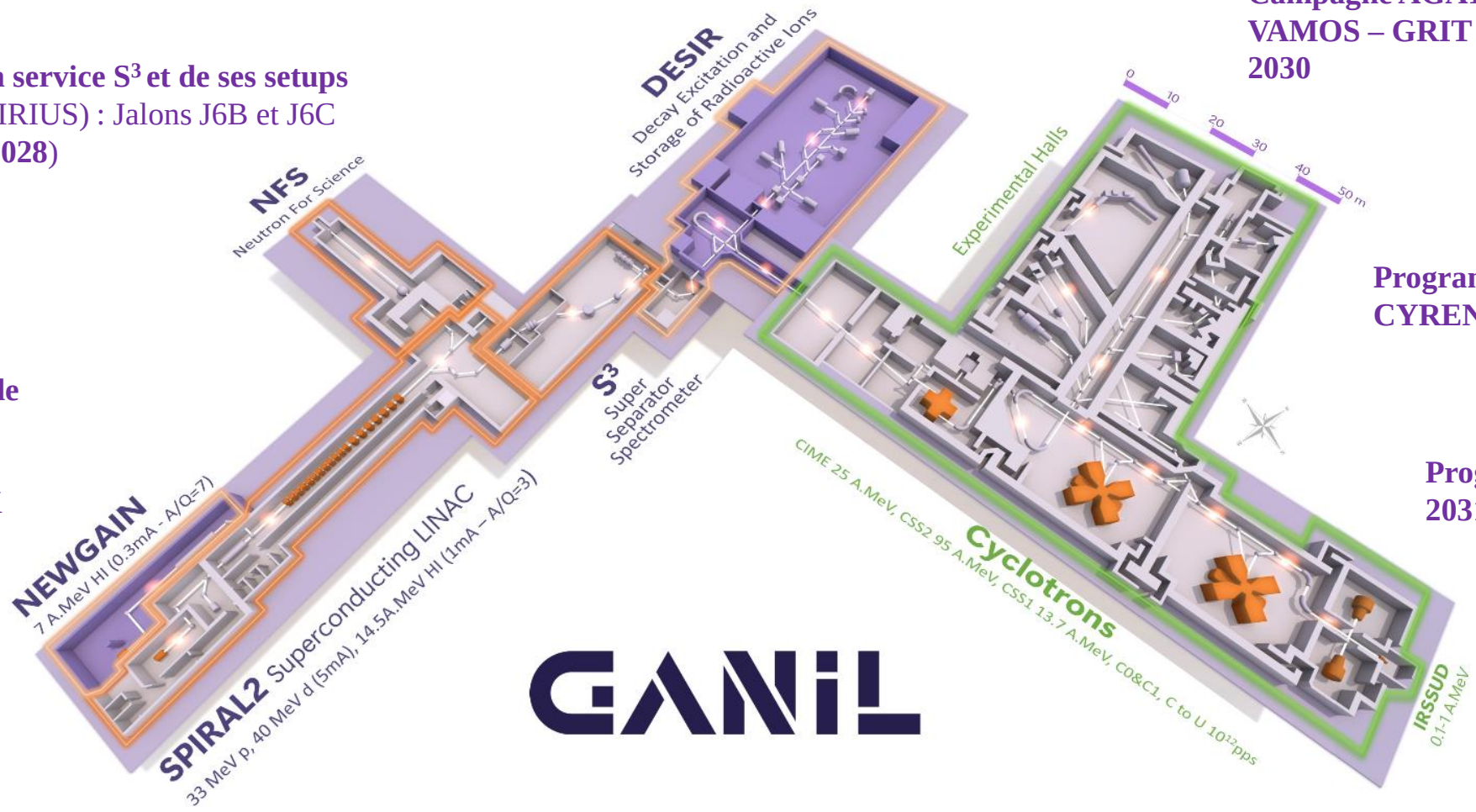
Courtesy G. GUTIERREZ

GANIL Horizon 2030 – Vision à 4 ans

Mise en service de DESIR avec faisceaux stables et radioactifs de SPIRAL1 **(2028-2029)**

Campagne AGATA – VAMOS – GRIT : 2029-2030

Mise en service S^3 et de ses setups (LEB/SIRIUS) : Jalons J6B et J6C **(2027-2028)**



Programme de rénovation CYREN : 2026-2031

Mise en service de NEWGAIN avec faisceaux stables source PHOENIX V3 **(2028-2029)**

Programme SAGA : 2026-2031

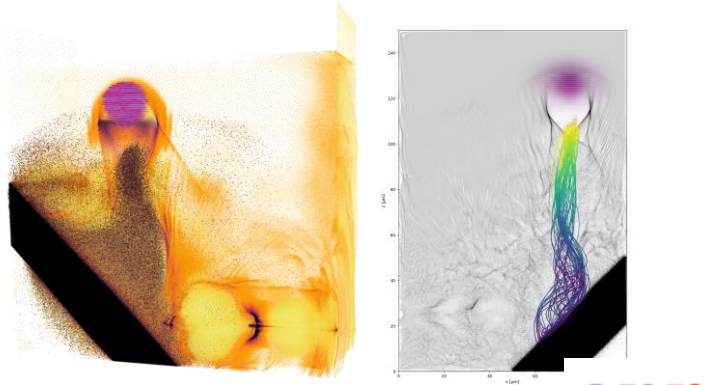
Courtesy M. Grasso – E. Touron

Activités numériques liées aux accélérateurs laser plasma au sein du groupe « Physique à Haute Intensité »

PHYSICS AT HIGH INTENSITY

LIDYL

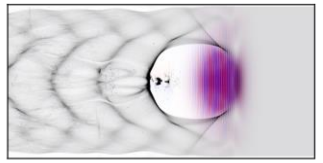
Modélisation d'un injecteur hybride gaz/solide pour améliorer l'efficacité de l'accélération par sillage laser



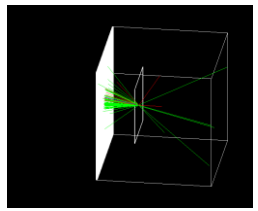
anr

Modélisation d'une source pilotée par laser et couplage avec codes Monte Carlo pour étudier des schémas intéressant pour radiothérapie

WARPX



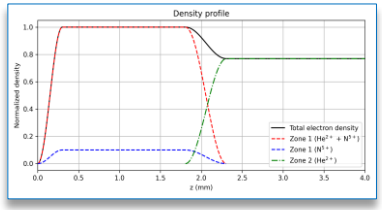
GEANT4 A SIMULATION TOOLKIT

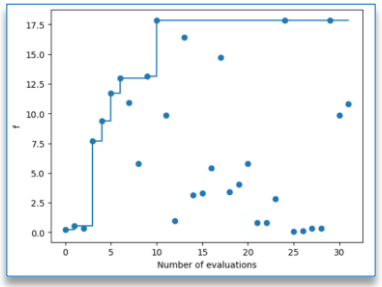


Doctoral Network

EPACE
European compact accelerators, their applications, and entrepreneurship

Optimisation Bayésienne d'un schéma hybride avec injection par ionisation et gradient de densité pour accélération par sillage laser





Co-leading WP6 –num. simu

EuPRAXIA

Outils numériques :

WARPX
FBPIC
Particle-In-Cell

GEANT4 A SIMULATION TOOLKIT
Monte Carlo

optimas
Optimisations

Calcul à haute performance :



Adastra (CINES,FR)



Jean Zay (Idris,FR)

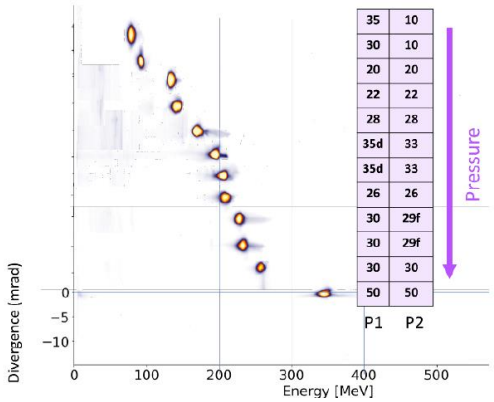
cea

Courtesy S. DOBOSZ DUFRENOY

Activités expérimentales liées aux accélérateurs laser-plasma

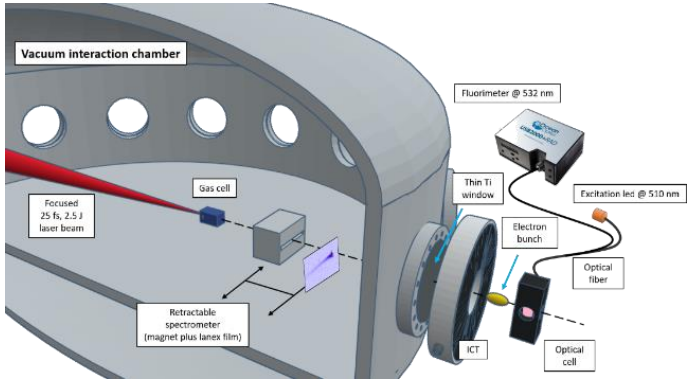
Optimisation de cible pour obtention de faisceau de haute qualité pour l'accélération d'électrons par laser

PI : Lpgp LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES GAZ ET DES PLASMAS, coll: HZDR (Allemagne)



WP10 - EuPRAXIA

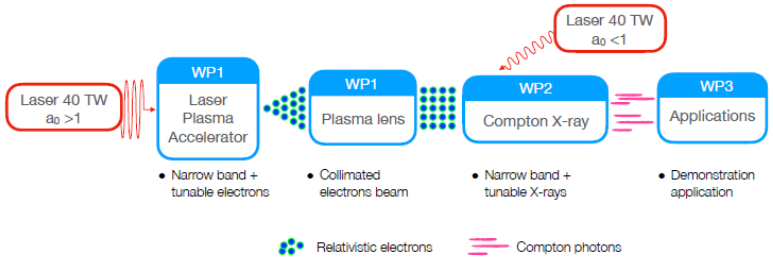
Développement dosimétrie chimique pour les LPA dans le contexte de la radiothérapie FLASH – et étude des effets de hauts débits de doses délivrés par les VHEE LPA sur la matière



Coll. IRFU (PTC AHEAD N. Chauvin)
PEBU DEXTER – coll CEA FAR

Développement d'une source avancée de rayonnement X Compton issu de plasma créé par laser

PI: CELIA, coll. LOA



anr

Courtesy S. DOBOSZ DUFRENOY

Feuille de route des développement au Département des Accélérateurs, Cryogénie et Magnétisme de l'IRFU

1960 ... | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | ... 2040

01 ACCÉLÉRATEURS HAUTE INTENSITÉ & HAUTE ÉNERGIE

Augmenter l'énergie et l'intensité des faisceaux de particules accélérées

ESS • IFMIF • SARAF • NEWGAIN • CANS • ILC • MUCOL • ICONE • DONES • LPA• FCC

Développement des sources & injecteurs RF « chaud » &
Etudes des systèmes accélérateurs linéaires et circulaires

02 SYSTÈMES RF SUPRACONDUCTEURS

Repousser les gradients et réduire la consommation énergétique

ESS • IFMIF • SARAF • PIP-II • LUCRECE • CANS • DONES • FCC • ILC • iSAS • MUCOL

Développements des cavités, cryomodules, source de puissance RF
pour accélérateurs linéaires & circulaires

03 AIMANTS SUPRACONDUCTEURS À HAUT CHAMP

Développer des aimants > 15 T pour la physique et les applications sociétales

MadMax • HFM • HL-LHC • FCC • SuperFRS • EPITA • HTS4SRI • EIC • ALICE 3

Développements d'aimants pour accélérateurs et détecteurs, la fusion,
la santé (IRM), d'aimants ultra-hauts champs

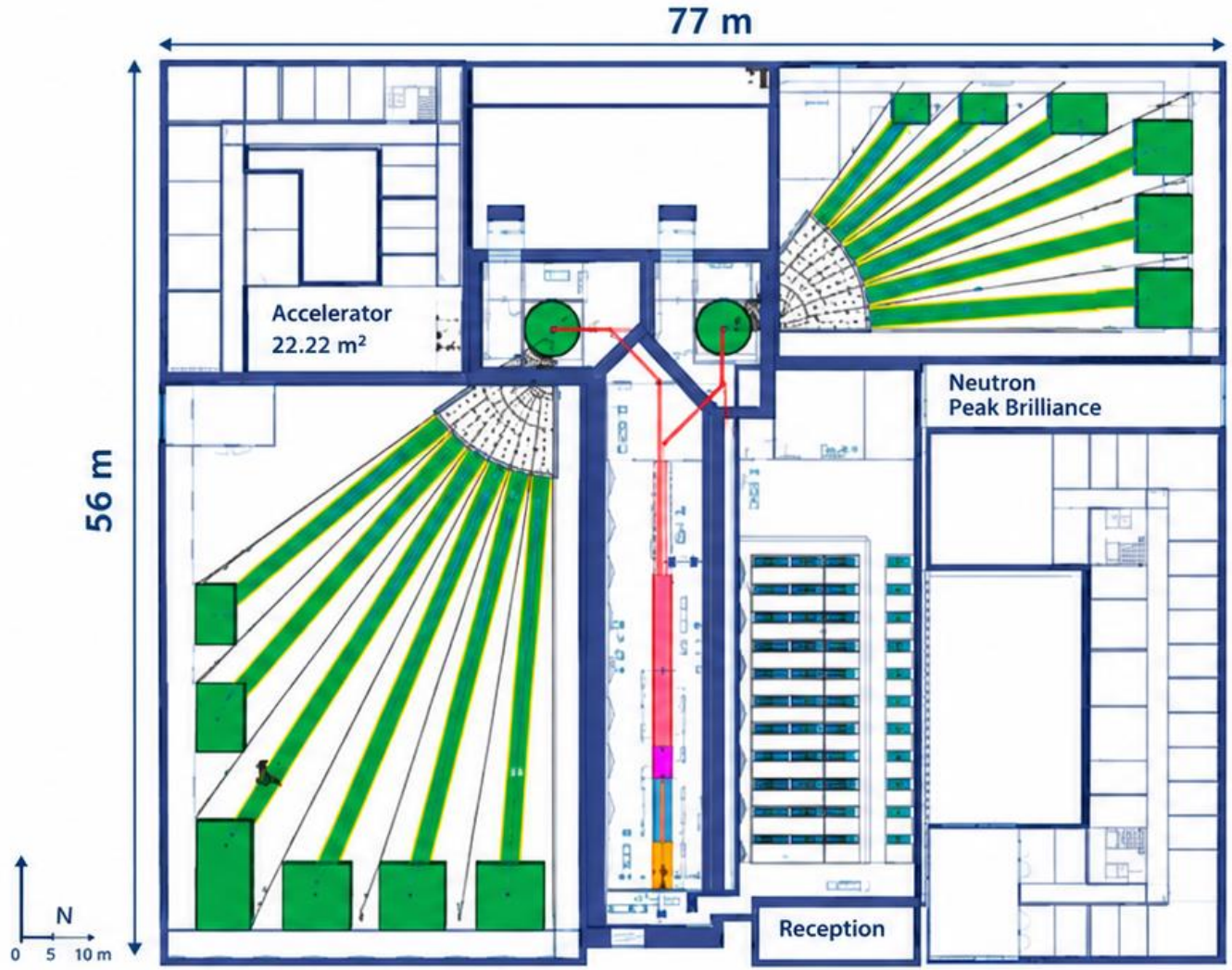
04 CRYOGENIE

Refroidir quelque soit l'environnement de 1,8K à 70K

TUBES PULSES • PRIMA • CRYONEXT • PACIFICS • PEPR • HL-LHC • PIP-II

Développement de la cryogénie pour aimants supraconducteurs, accélérateurs, détecteurs &
astrophysique, développement de nouveaux concepts

ICONE (Innovative COmpact NEutrons source)



ACCELERATOR

80 mA | **25 MeV** | **8% DC**

NEUTRON PERFORMANCE

~5 × 10¹¹ /s/cm²/sr/Å at 1 Å and 2.5 Å

~10¹¹ /s/cm²/sr/Å at 5 Å

TARGETS

Target 1

0.4 ms @50 Hz (2% DC)

6 instruments HF (<44 m)

Target 2

2.0 ms @20 Hz (4% DC)

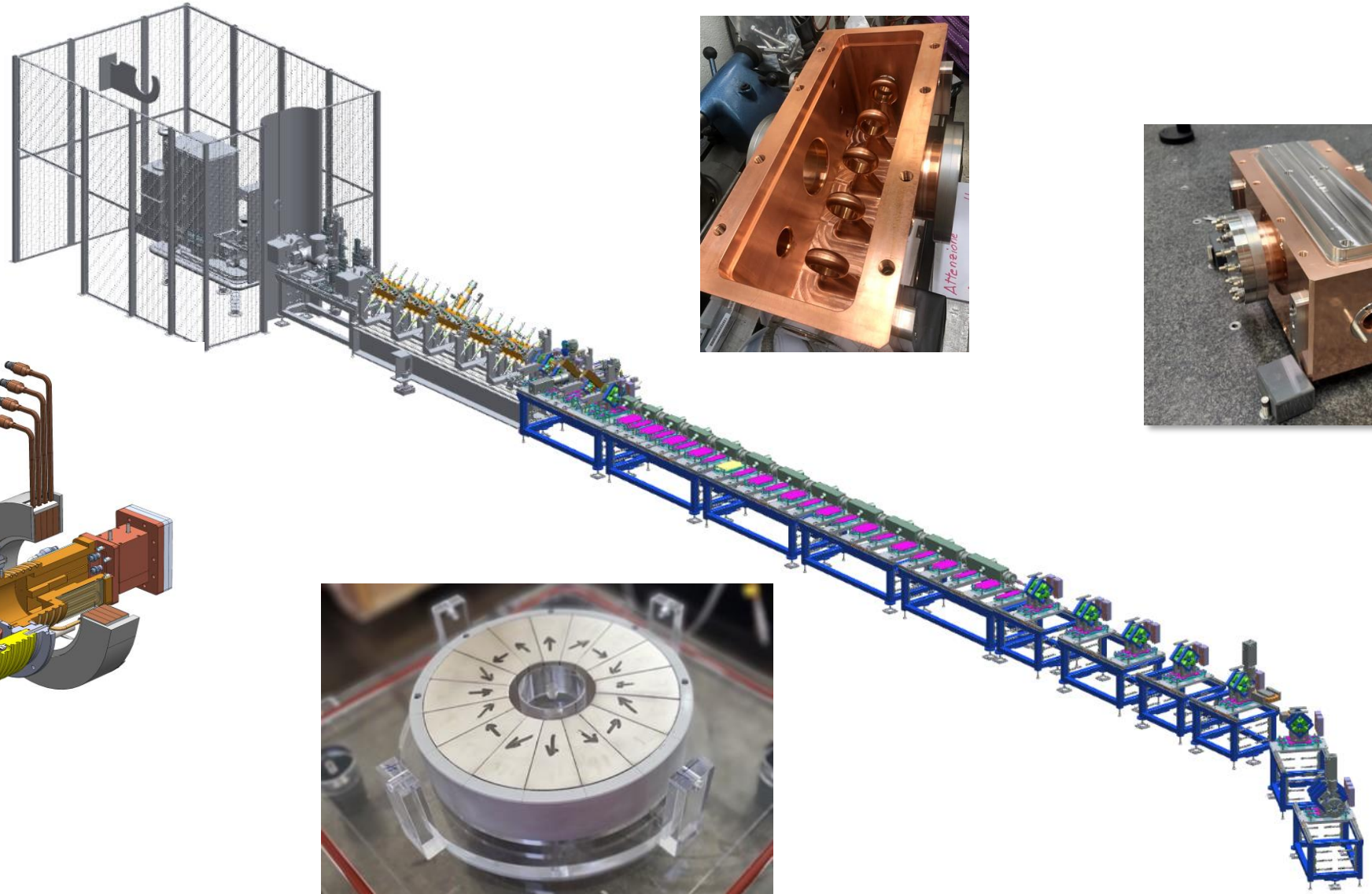
6 instruments HF (<33 m)

STAFF BUILDINGS

Technical area **(~1000 m²)**

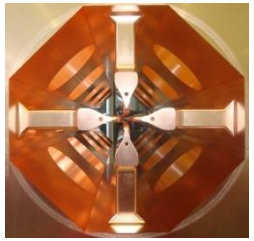
Office area **(~1500 m²)**

Avant Projet Détaillé livré



NEWGAIN : RFQ et aimant pour source d'ions

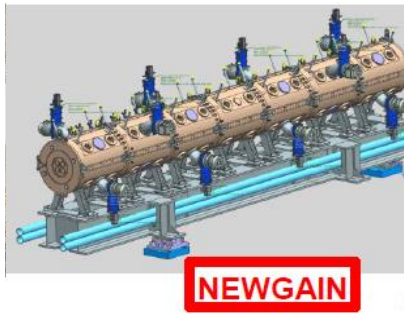
RFQ : objet complexe

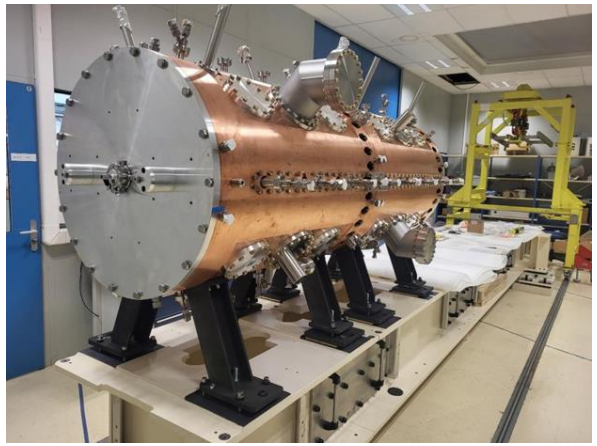


Défis technologiques :

- Brasage
- Usinage de précision

NEWGAIN Transmissions de 95% à 99%, ions (Q/A=1/7), E_{out} ~3MeV





Aimant pour la source ECRIS

Défis technologiques :

- Créer un champ magnétique intense et très homogène
- Maintenir les performances avec une grande chambre plasma
- Maîtriser les efforts électromagnétiques
- Assurer la protection des aimants supraconducteurs
- Gérer les interactions entre aimant, plasma et cryogénie
- Garantir la fiabilité et l'opérabilité

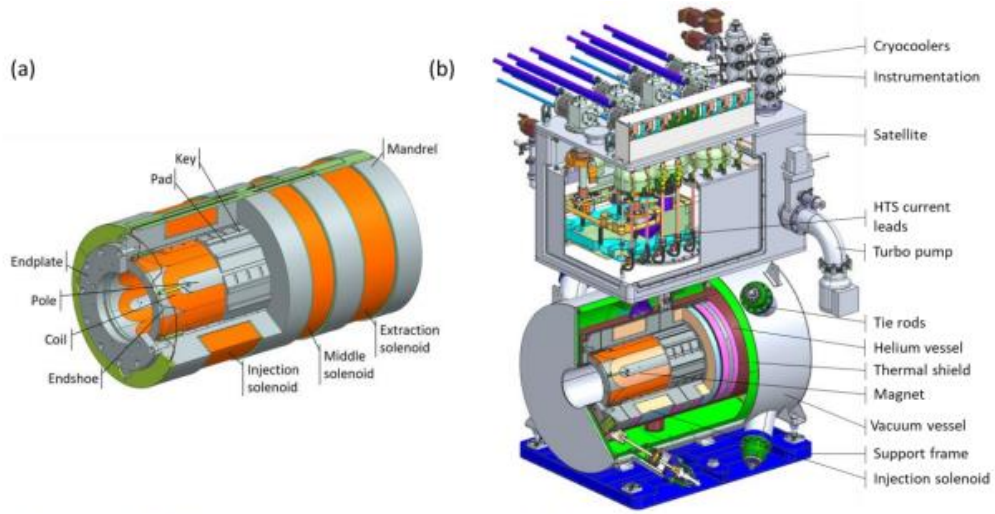
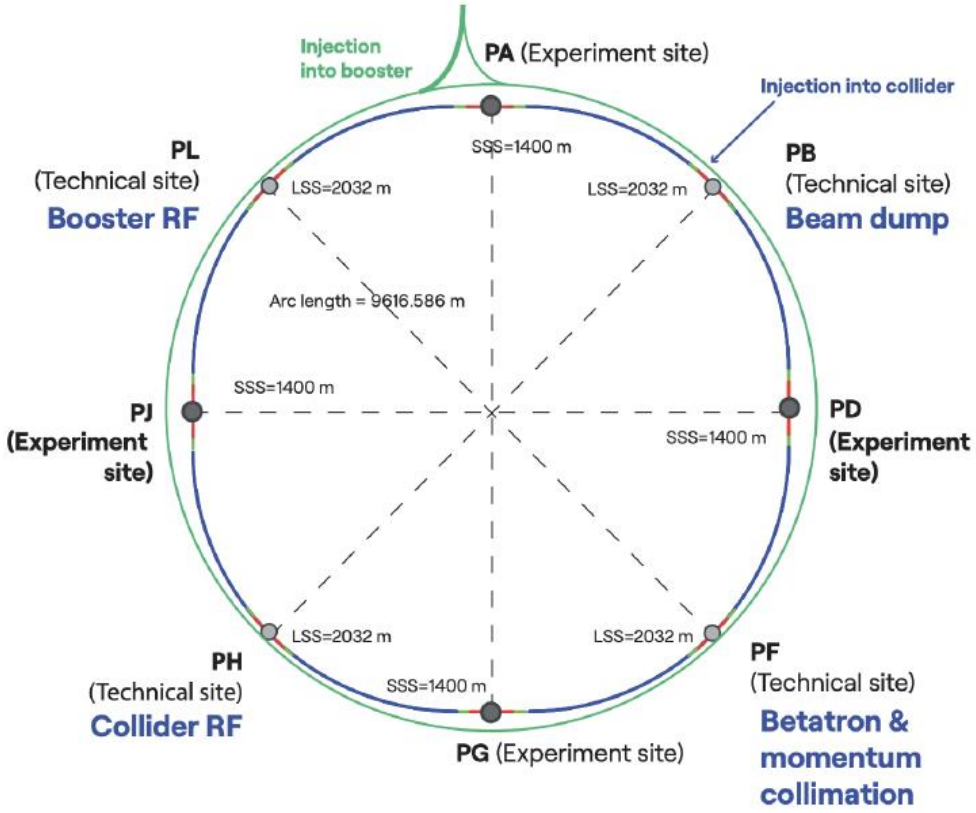


Figure 2 – The figure (a) represents the magnet with its coils in the bladders and keys mechanical structure while the figure (b) represents the full cryostated magnet with its satellite and support frame

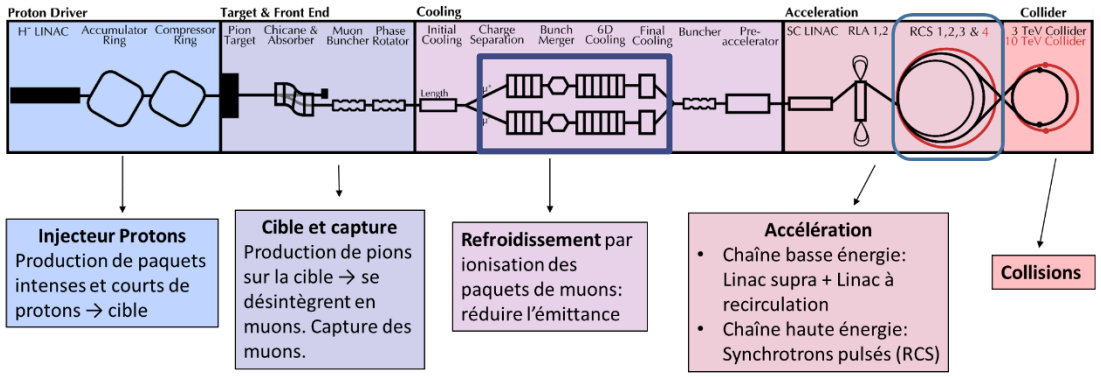
Préparer le FCCee : de l'Initial Study au pre-TDR

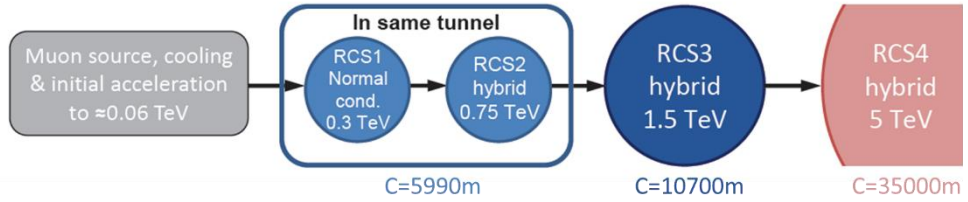
- FCC-ee: collisionneur d'e+/e- de 91 km jusque 182.5 GeV.
- CEA: Responsabilité de la tâche du booster dans le projet européen FCC-IS.
  - Accélération de 20 GeV à l'énergie de collision dans le même tunnel que le collisionneur.
  - Injection en continu (top-up).
- FCC-IS est officiellement terminé.
- Rapport final (650 pages!) a été soumis pour publication.
- Préparation d'une nouvelle phase de pre-TDR jusque fin 2027 pour finaliser complètement la conception.

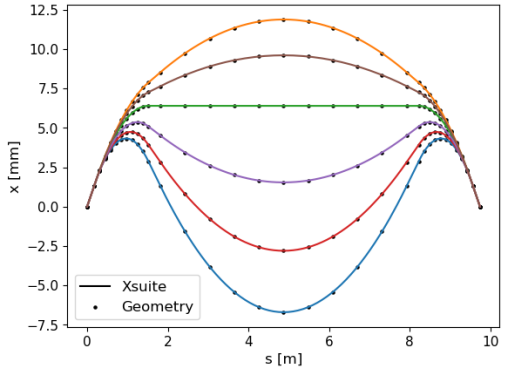


Développer les collisionneurs à muons

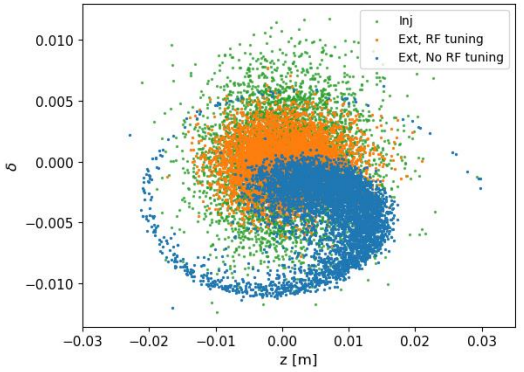
- Projet européen MuCol (jusque mars 2027)
- **Coresponsable WP6: Radio Frequency Systems**
  Design d'une cavité normal conductrice pour le système de refroidissement pour être compatible avec une cellule de refroidissement test.
- **Responsable WP5: High-energy complex**
  - Conception de l'optique de l'ensemble des synchrotrons pulsés.
  - Premières optiques déjà réalisées.







Trajectoires de l'injection à l'extraction

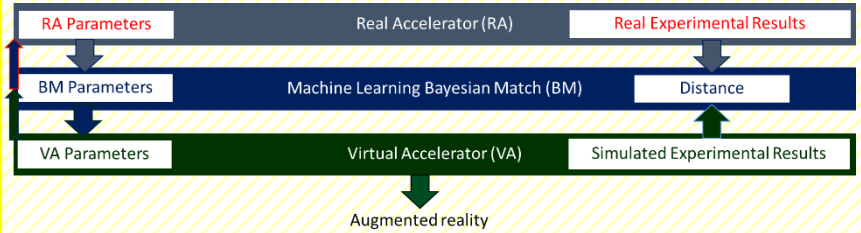


Transport longitudinal dans un RCS

L'Intelligence Artificielle : un nouvel outil

Operation

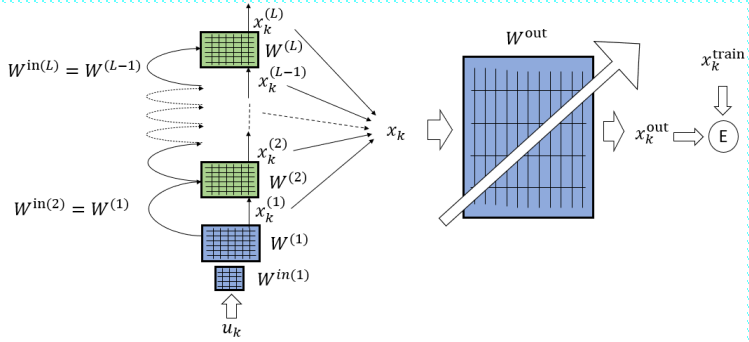
Improvement of an accelerator « digital twin » using Machine learning Bayesian inference methods



Machine operated by a Digital Twin

Modeling

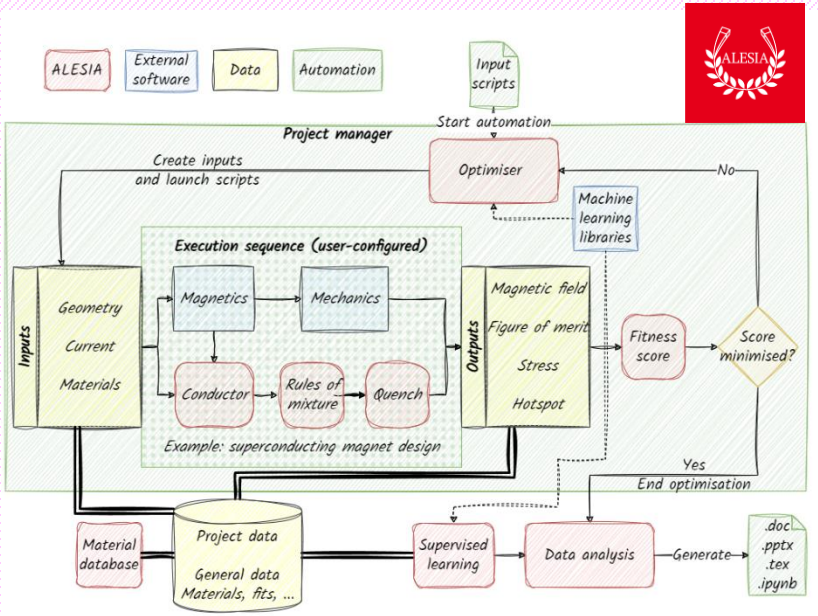
Optimization of optics design and beam measurements of present and future accelerators



Thèse de Q. Bruant

Technology

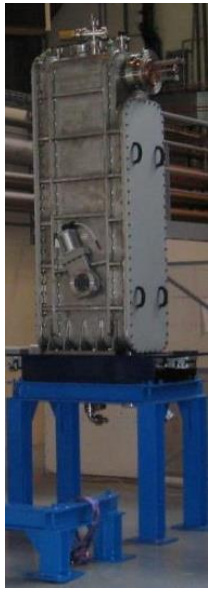
Superconducting magnet design through multi-physics optimization



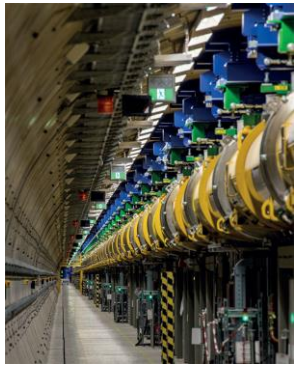
- Participation in **M4CAST** (French network of AI for Accelerators)
- Contribution to **InTheArt** seminars (DRF/CNRS network on transverse applications of AI)

Systèmes RadioFréquence Supraconducteurs

Booster | MACSE | SOLEIL TTF, SLS | SPIRAL2 XFEL | ESS, SARAF | IFMIF EVEDA | PIP-II | iSAS | IFMIF DONES | FCCee



SPIRAL2 : Twelve modules



XFEL: assembly of 103 cryomodules (1 CM/wk)



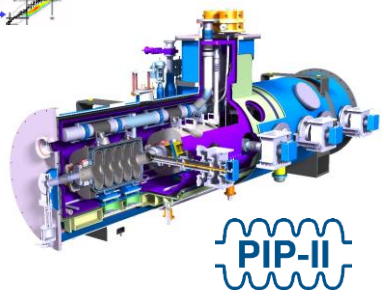
ESS: Components but cavities and assy of 30 cryomodules



IFMIF EVEDA: 1 cryomodule



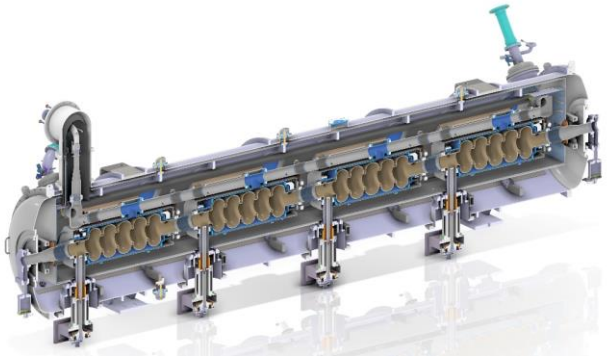
SARAF : 4 cryomodules



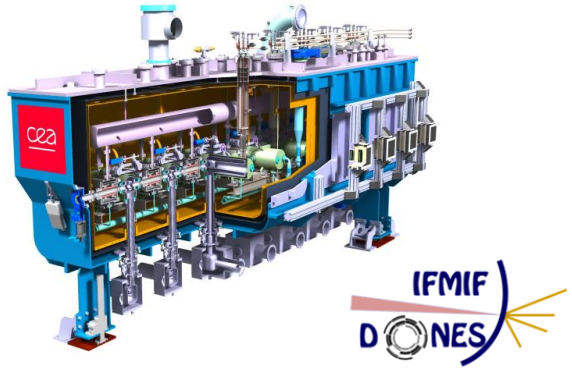
PIP-II



PIP-II: 9+1 cryomodules



iSAS : 1 cryomodule assembly



DONES : pré-étude cryomodules

Trois technologies pour aimants d'accélérateurs

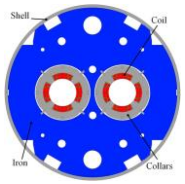
Nb-Ti

Quadrupoles pour HL-LHC (CERN/ CEA)

MQ spares



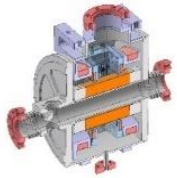
MQYY/MQYYM (Hilumi)



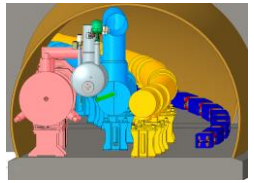


Aimants d'accélérateurs

SARAF



EIC Spin Rotators

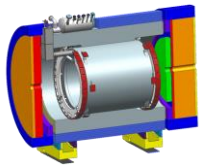




Super FRS

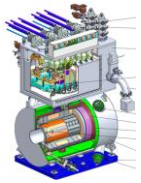
Aimant pour détecteur

EIC MARCO



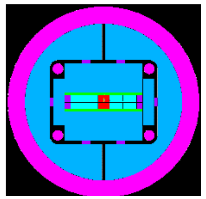
Aimant pour source d'ions

Asterics



Nb_3Sn

Accelerator magnets



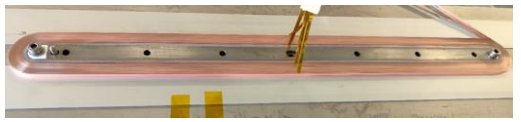
CERN/CEA



R2D2

HTS

Accelerator magnets



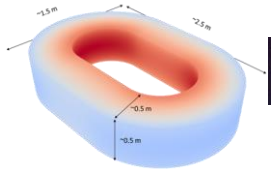
CERN/ CEA

Magnets for High field > 30 T

SUPER EMFL / FASUM









PEPR SupraFusion (scale 1 prototype PC4)

Dipoles 16 T Nb_3Sn pour FCC-hh

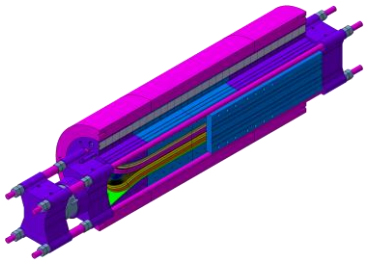
16 T demo

12-14 T demo

Subscales

Powered samples

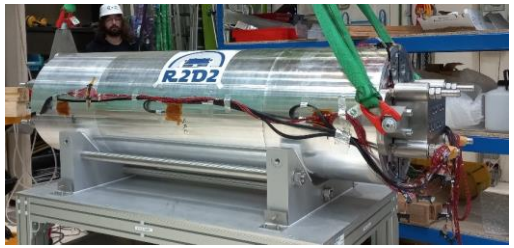
Non-powered samples



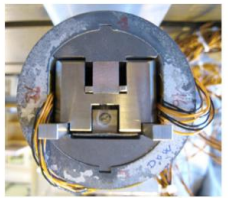
F2D2

R2D2





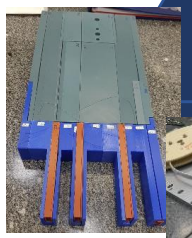






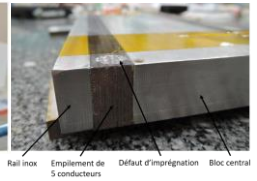


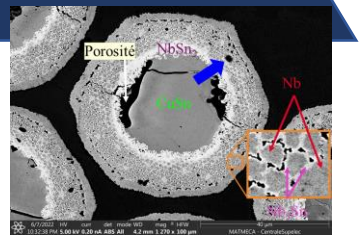
SMC





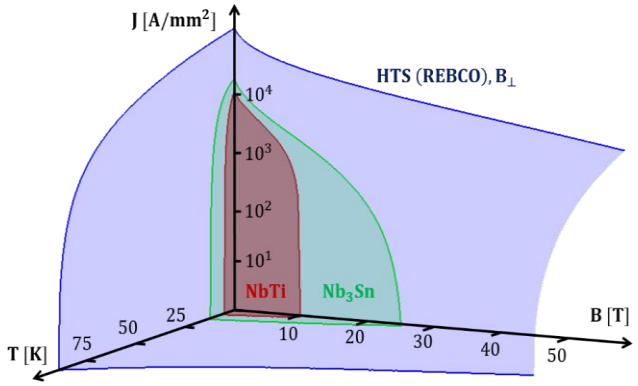




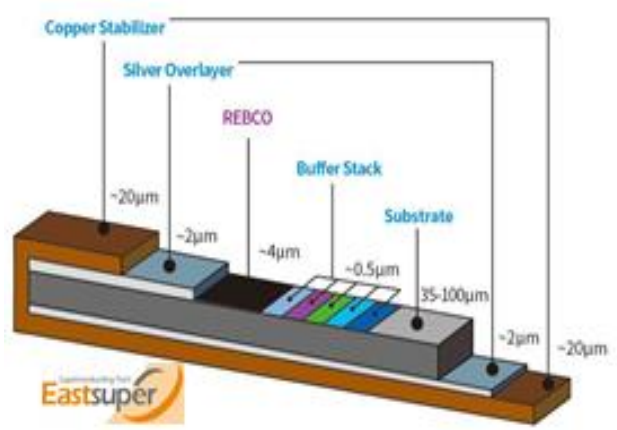


Courtesy of E. Rochepault

Dipoles en supraconducteur à haute température critique pour FCC-hh



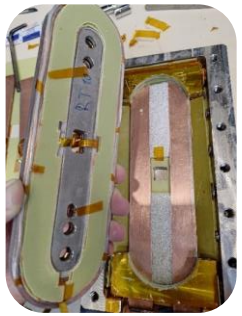
Surfaces critiques principaux supraconducteurs



*Architecture ruban HTc type REBCO (*Oxydes mixtes de baryum, de cuivre et de terres rares)

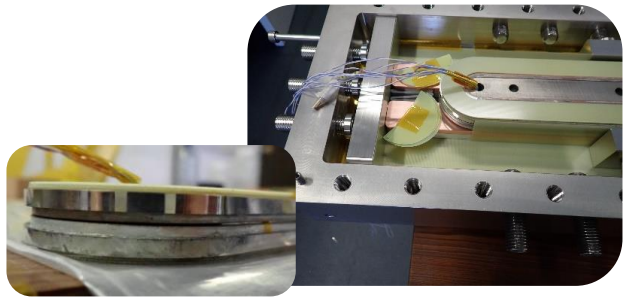
- Ruban 45-100 µm d'épaisseur et 2-12 mm de largeur
- Propriétés supraconductrices anisotropes
- Nouveau concept de bobinage
- Détection & protection contre le quench
- Courant d'écrantage et pertes AC différentes

Tests racetracks courtes



- **140 mm**
- **>5 T** @ 4,2 K, 2380 A/mm²
- 55-60 mT/s
- **Quench sans dégradation** visible

Tests aimant NARSIL (CERN ; Nov. 2025)



- **600 mm**
- **2,95 T** au centre (4,5 K, 1400 A/mm²)
- **70 quenches** sans dégradation supplémentaires
- Beaucoup de données magnétiques !

Refroidir quelques soient les conditions

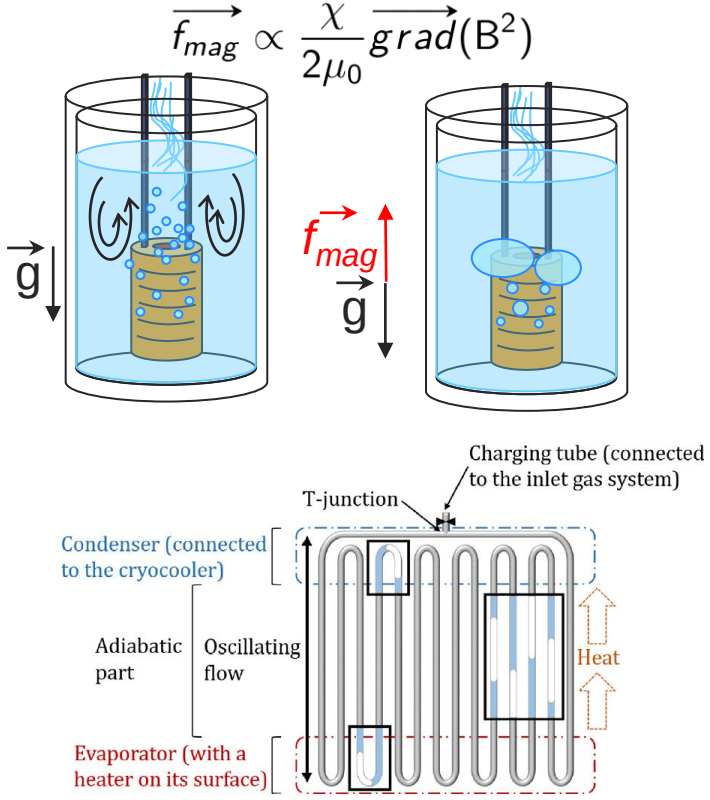
Transfert thermique en apesanteur

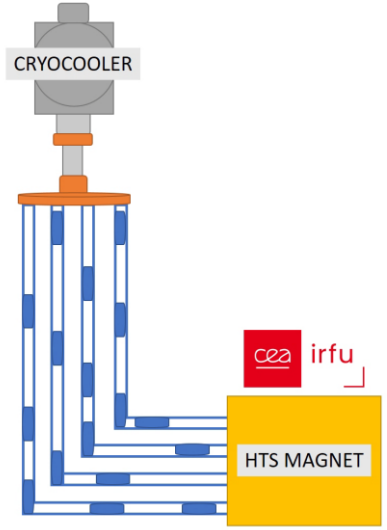
- Refroidissement d'aimants supraconducteurs dans un environnement à champ magnétique élevé (B > 20 T) où la force magnétique contrebalance la gravité
- Refroidissement de matériaux supraconducteurs destinés à des applications spatiales

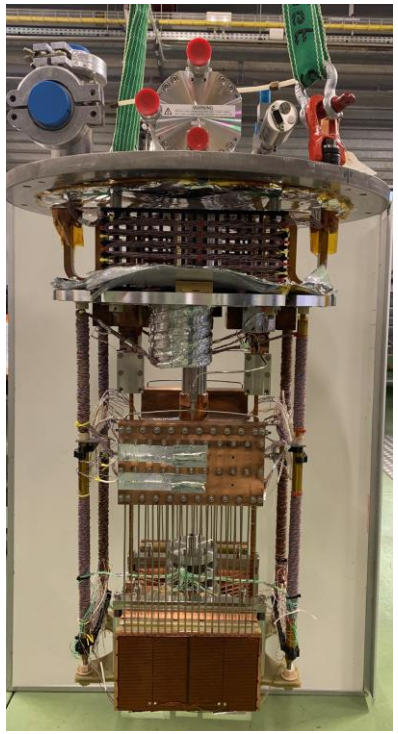
HTS 32,5 T solenoid (NOUGAT) cooled in He bath



Fazilleau et al., Cryogenics 106 (2020) 103053

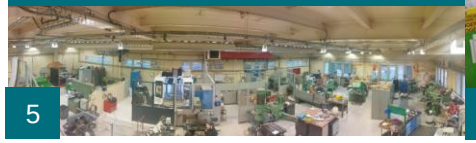






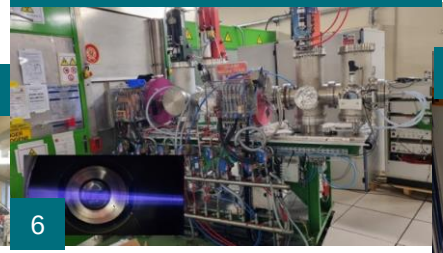
25 000m2 d’infrastructures

Atelier mécanique



5

BETSI



6

LUVAC / DIVA



7

Cobot



8

Préparation cavités



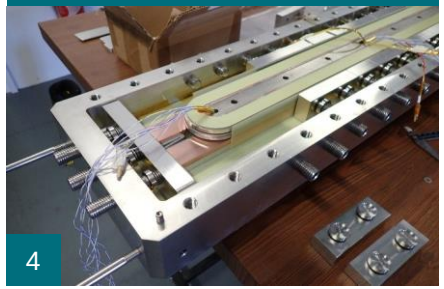
9

R&D Cavités

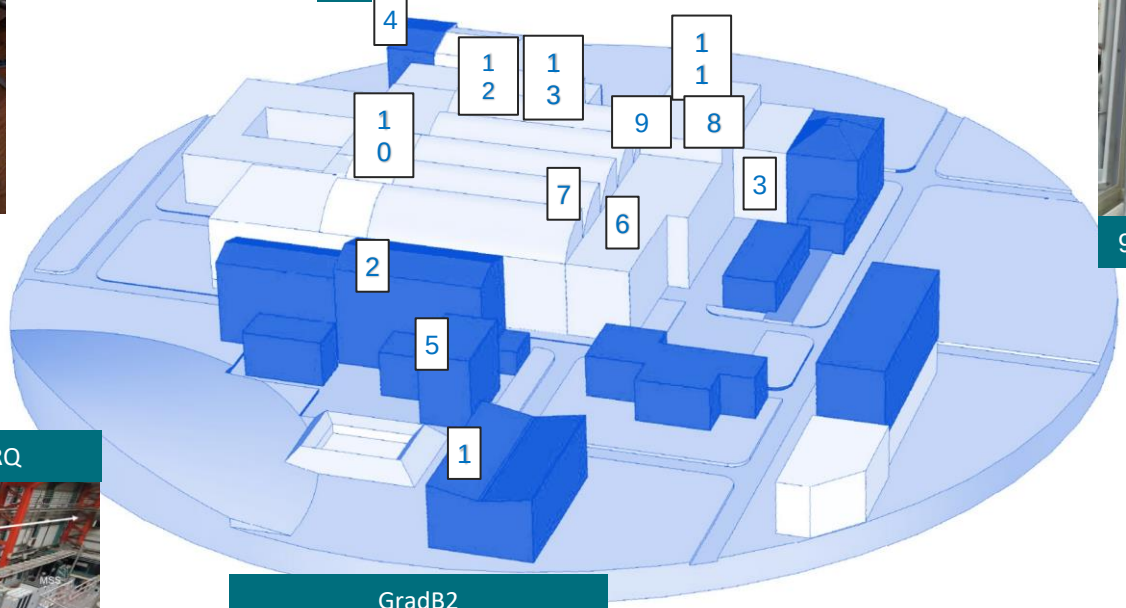


10

Développement HTS



4



R2D2



3

Assemblage cryomodules



11

Stations d'essais STAARQ



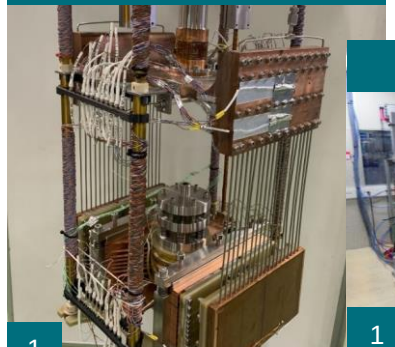
2

Station d'essais MATTRICS



2

GradB2



1

Coupleurs ESS



13

Supratech / Cryo HF



12

218

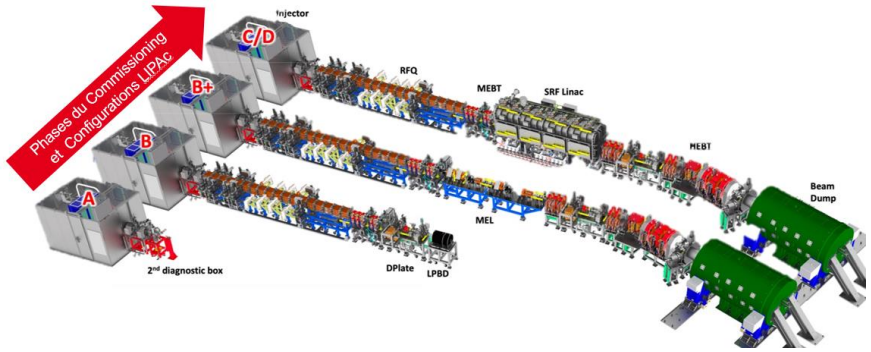
82

Les orientations

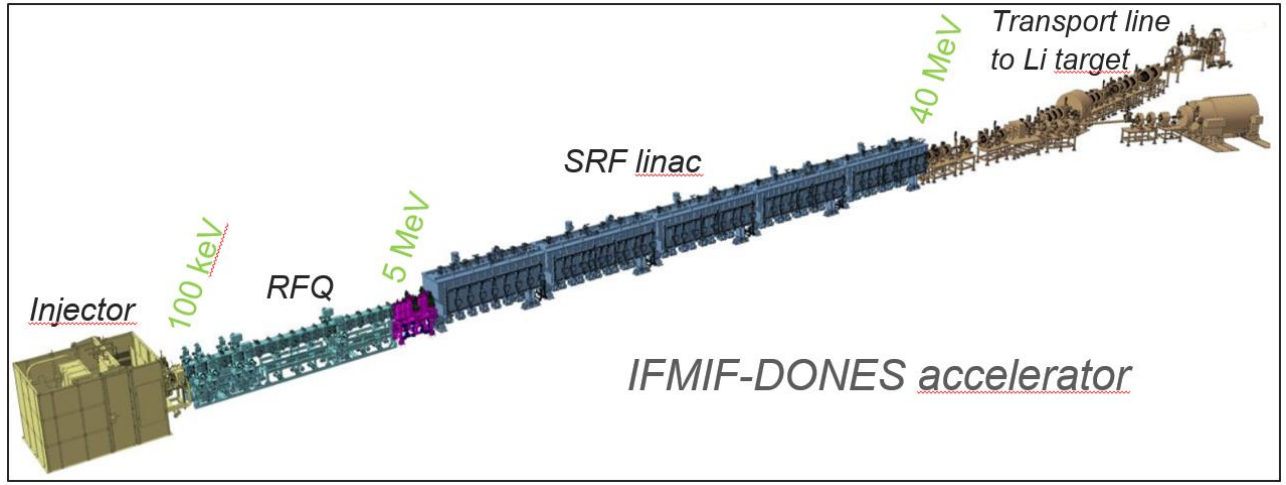
Terminer nos engagements :

- **PIP-II : 9 cryomodules à fournir et tester**
- **ICONE : R&D à finaliser**
- **NEWGAIN : Installation et commissionning**
- **ITN :** ILC Technology Network (CEA, CERN, INFN, KEK),
- **SARAF**
- **IFMIF**
- **ESS**
- **TITAN**
- **HL-LHC**
- **FCC**
- **SUPER-FRS (FAIR)**
- **EIC**
- **Call HORIZON : Préparation des calls 2027**
- **Suprafusion**
- **Accélération Laser Plasma**

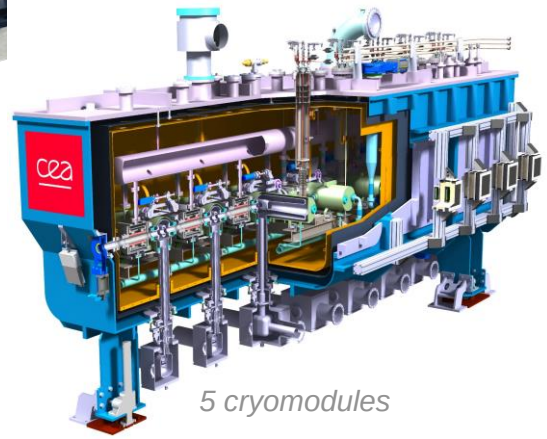
Impliquer sur IFMIF et bientôt DONES



IFMIF :
premiers faisceaux à travers SRF Linac







Contributions potentielles FR à l'accélérateur (Injecteur, SRF-Linac…)

Contribuer à FCC-ee

- Perspectives pour le High Energy Booster : participation du CEA au pre-TDR et TDR de FCC-ee.
  - Design de l'Optique. Ouverture dynamique et momentum acceptance.
  - Réglage de la Machine (préservation de l'emittance en présence d'erreurs). Incluant les erreurs d'alignement

- Changement de fréquence SRF: 400MHz-800MHz à 600MHz
  - Opportunité pour le CEA

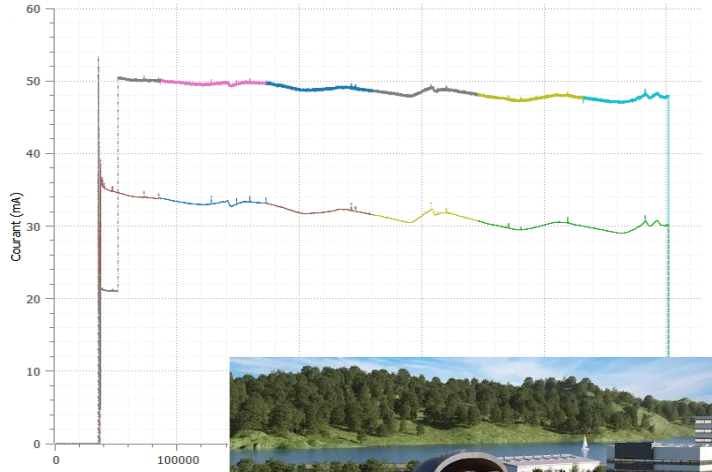
- Structuration de la FR pour préparation de TDR et in-kind contribution

- Contributions sur les détecteurs

Augmenter l'intensité des faisceaux de protons

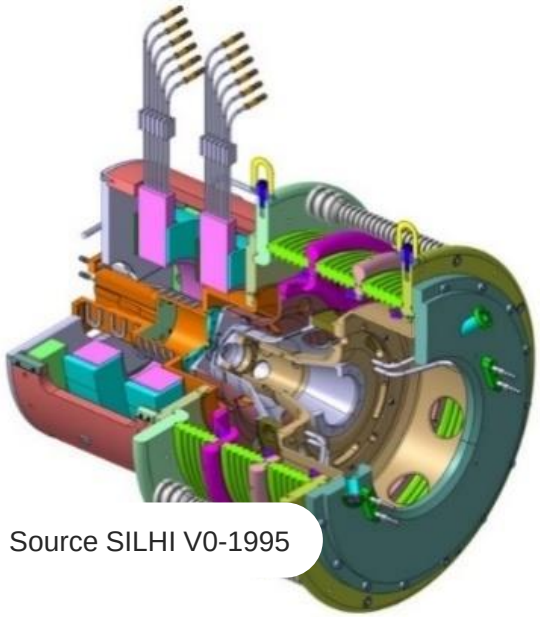
Développement des sources de protons :

- Compacité
- Maintenabilité
- Fiabilité (essai pour Transmutex)
- Réduction des coûts
- Compréhension
- Nouveau banc (COLIBRI et BETSI)

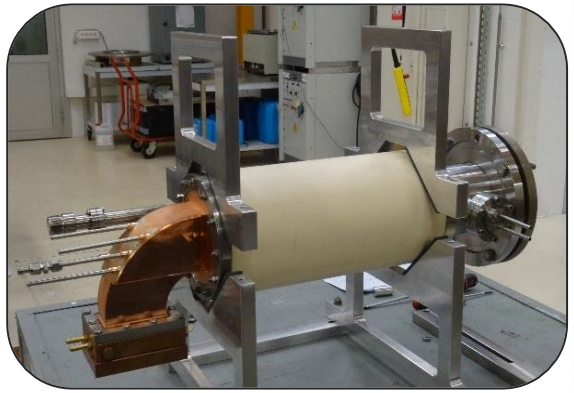




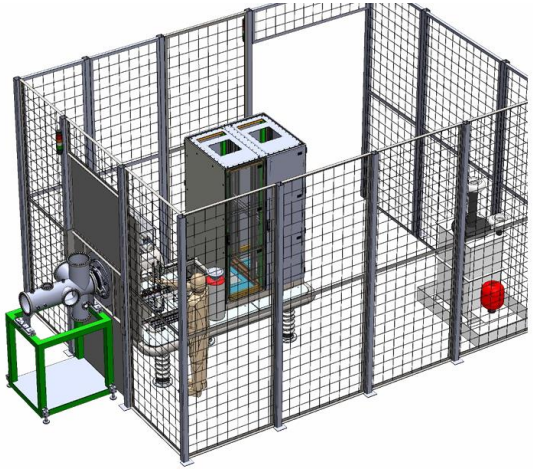
Accélérateur	Particules	Energie (keV)	Intensité (mA)	Mode
IPHI	H+	95	100	pulsé ou CW
SPIRAL 2	H+/D+	20/40	0.1 -5	pulsé ou CW
IFMIF-LIPAc	D+	100	140	pulsé ou CW
FAIR	H+	95	100 mA	pulsé (4 Hz)



Source SILHI V0-1995





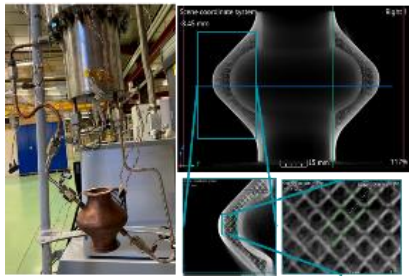


Réduire le cout cryogénique et augmenter le cham accélérateur en développant les supraconducteurs à plus haute Tc (Nb_3Sn, Nb_3Al …), pour un fonctionnement à 4,2 K ou plus

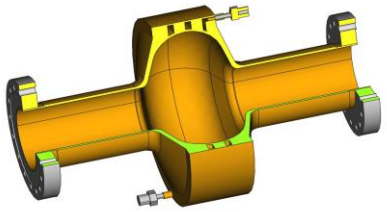
Fabrication additive de cavité en cuivre

testée sous vide et à basse température

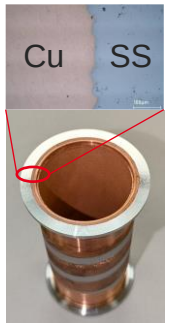
Cavité Cu par impression 3D



Fusion laser de poudre



Cold Spray



Multimaterial potential

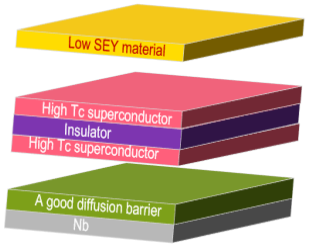


surface roughness ~ 0,1µm

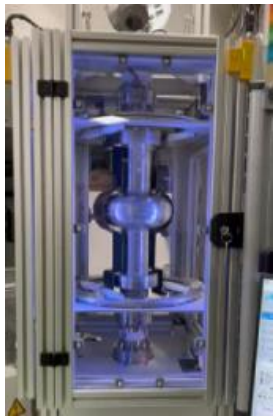
Films minces :

ALD processes :

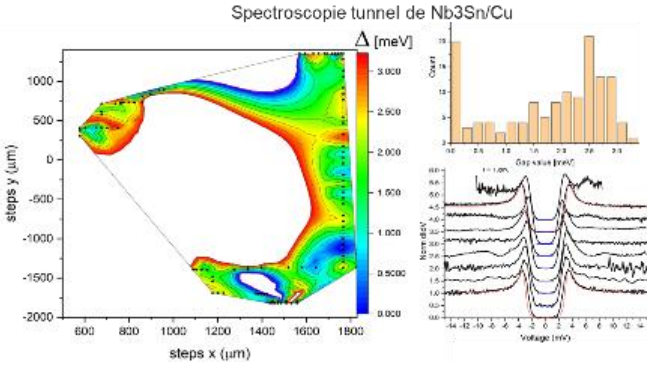
- diffusion barrier,
- thermocurrents,
- TEEY, …

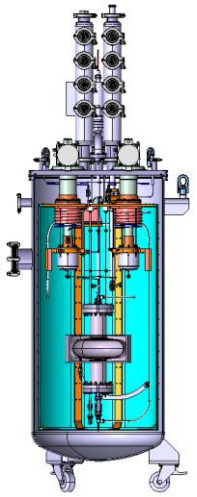


Pulvérisation magnétron impulsionnelle à haute puissance HIPIMS pour les HTC



Caractérisation





Spectroscopie tunnel

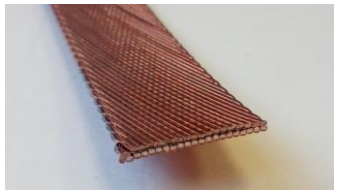
Cryostat avec cryocooler

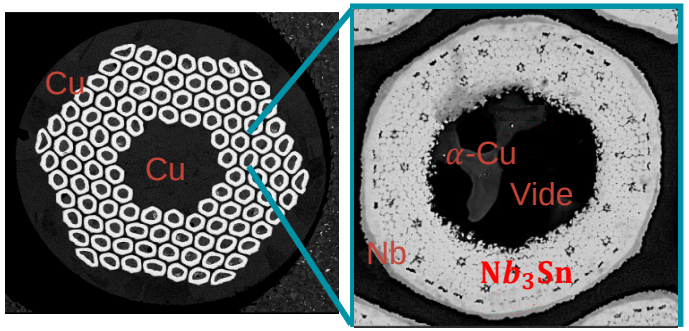
Tester les cavités avec dépot en conditions

Augmenter les champs magnétiques

Maîtriser la chaîne technologique complète Nb_3Sn :

conducteur, bobinage, traitement thermique, isolation, imprégnation, mécanique, protection et validation à froid





Développer les aimants à base de supraconducteurs à HTC

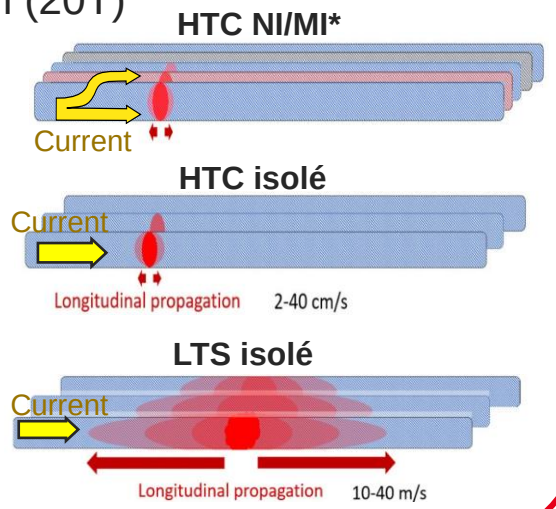
Modéliser le comportement lors des transitions

Détecter les transitions

Maitriser la chaine technologique pour les accélérateurs (15T), les très hauts champs (40T) et la fusion (20T)



4-12 mm de large -
~100 µm d'épaisseur
(REBCO 1-3 µm)

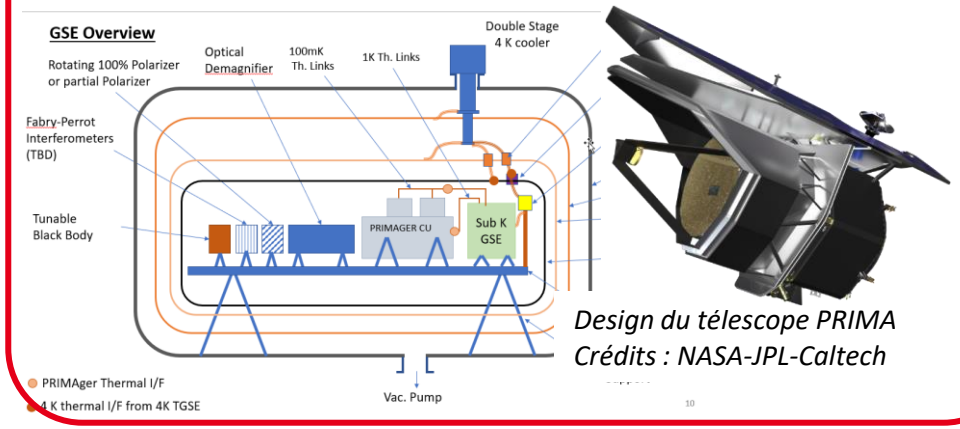


Refroidir quelque soit l'environnement : zéro gravité ou très fort champ

Construire un cryostat pour la qualification d'une caméra infrarouge pour la mission spatiale internationale PRIMA

Développer des PHP comme lien thermiques

Développer les systèmes cryogéniques innovants



Design du télescope PRIMA
Crédits : NASA-JPL-Caltech

Améliorer le refroidissement des aimants très haut champ (> 20T)

Visualiser les transferts thermiques sous champ

Atténuer l'influence des forces magnéto-gravitaires sur le refroidissement en hélium liquide des futurs aimants supraconducteur HTC







Des briques technologiques au service d'applications scientifiques et sociétales

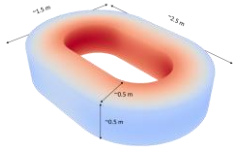
Des cavités aux Qbits : les qubits Qbits supraconducteurs 2D souffrent d'un temps de cohérence limités. Objectif : Augmenter le temps de cohérence en réduisant la densité des défauts - Passiver la surface à l'aide de films minces (ALD)



Des développements d'aimants supraconducteurs HTC vers la détection d'axions (GLEAD)



CRYONEXT : sécuriser l'approvisionnement français en système de cryogénie haute performance pour les technologies quantiques menées par les acteurs nationaux industriels et de la recherche



SUPRAFUSION : construire des aimants à champ magnétique élevé et de grande taille destinés aux centrales à fusion et à d'autres applications

Merci pour votre attention

DACM et ses collaborateurs :

