

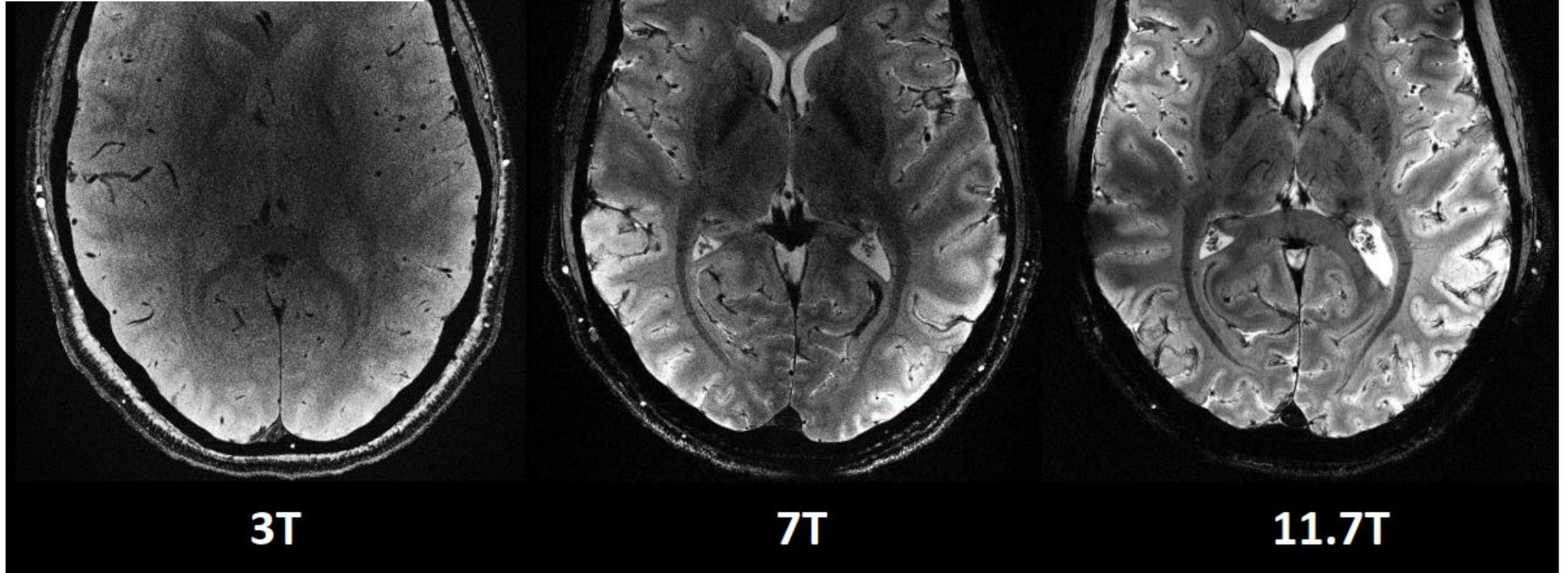
Accélérateurs et aimants à l'Irfu



17 décembre 2024

Pierre VEDRINE

Iseult IRM 11,7 T





1 Introduction à ■ l'IRFU

L'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (IRFU)

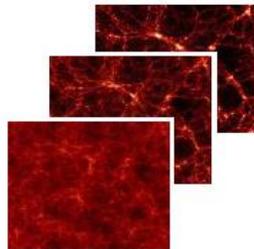
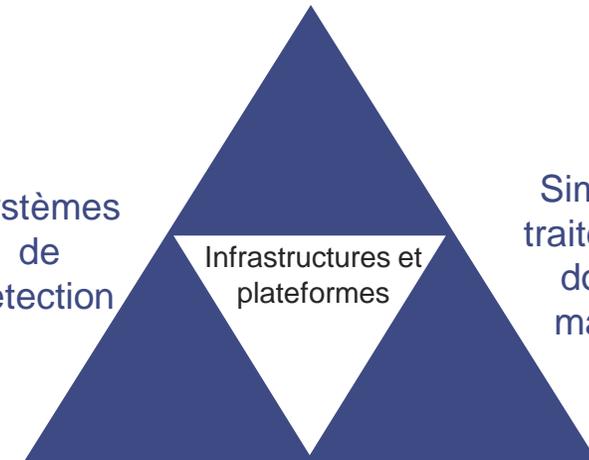
- ~1000 employés, 7 départements de recherche et de technologie
- **Mener des recherches technologiques et fondamentales** dans le cadre des missions du CEA, afin d'explorer les lois fondamentales de l'univers, des plus petites échelles (constituants élémentaires, matière nucléaire) aux plus grandes (contenu énergétique et structure de l'Univers).
- **Appliquer les innovations technologiques à de grands projets nationaux ou internationaux** : Aimants IRM ou de fusion, sources de neutrons, etc.
- Le travail sur les accélérateurs implique les **départements Accélérateur + Ingénierie + Détecteur + Physique nucléaire**
~ 270 ETP



Structure de l'univers

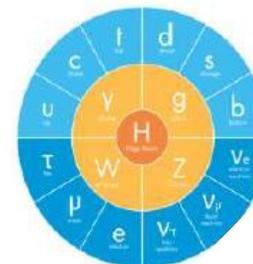


Systèmes de détection



Simulation, traitement de données massives

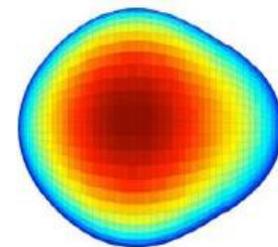
Constituants élémentaires, Symétries fondamentales



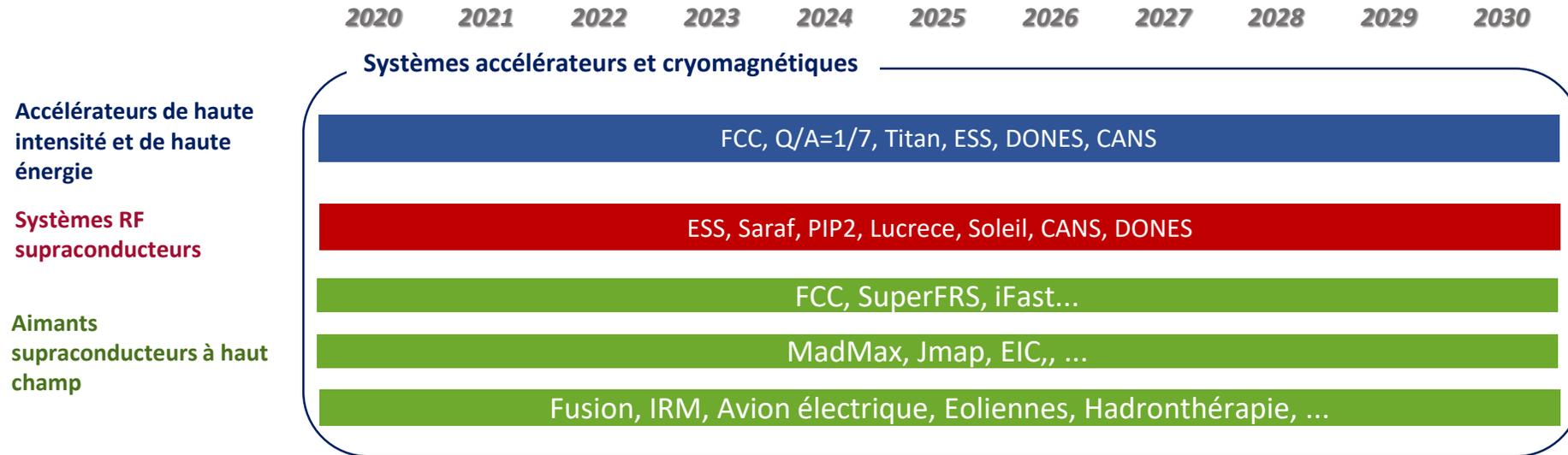
Systèmes d'accélération et



Propriétés de la matière nucléaire



Feuille de route



"Accélérateurs de haute intensité et de haute énergie" : Augmentation de l'énergie et de l'intensité des faisceaux de particules accélérés ; comprend les développements sur les sources et les injecteurs RF chauds et toutes les études sur les accélérateurs linéaires ou circulaires, actuels ou futurs (ILC, FCC, collisionneurs de muons, ERL, plasma laser, sources compactes de neutrons ou de lumière, etc.)

"Systèmes RF supraconducteurs" : Repousser les limites des gradients des cavités accélératrices supraconductrices et réduire la consommation ; comprend les cavités supraconductrices et les cryomodules ainsi que leurs systèmes d'alimentation RF.

"Aimants supraconducteurs à haut champ" : Comprend tous les aimants à haut champ (> 10 T, de grande taille, spéciaux, etc.) pour des applications physiques ou sociétales, ainsi que leurs systèmes de refroidissement cryogéniques.

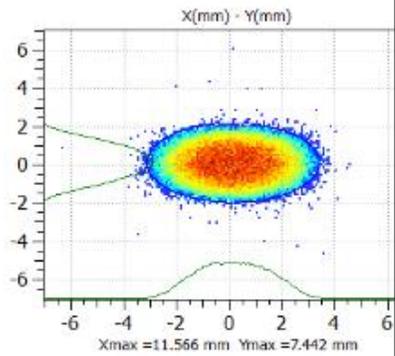


2 ■ Compétences et réalisations sur les accélérateurs

Compétences

Simulations de bout en bout

Linéaire et circulaire
Production de neutrons
Plasma



Conception

RF
Thermomécanique
Conception mécanique
Prototypage
Le vide
Refroidissement
Magnétohydrodynamique



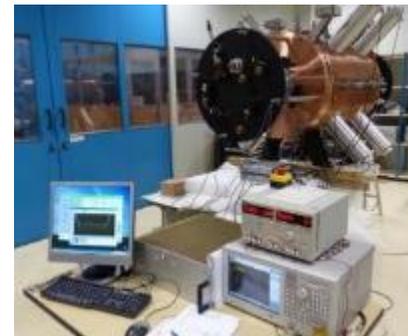
La construction

Suivi de la fabrication
Nettoyage / préparation
Assemblée
Intégration
Contrôle de la qualité



Test / validation

DEMANDE DE PRIX
Cavités SRF
Cryomodules
Objectifs



Mise en service & Fonctionnement

Acquisition de données
Systèmes de contrôle
Protection des machines
Optimisation



Sources d'ions légers

R&D nécessaire pour les sources de neutrons de haute intensité

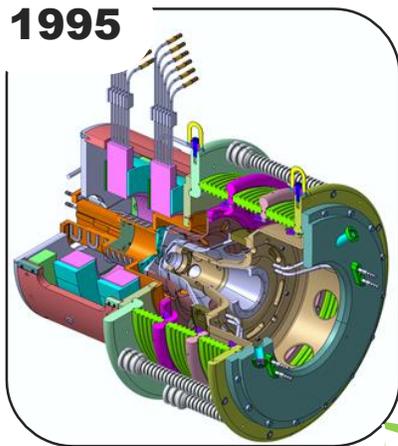
Intensité plus élevée,
Plus stable
Plus compact
Moins cher
Une maintenance plus facile

95 kV Mode CW
Ø9 - 130 mA
Ø6 - 60 mA

Ø6
Impulsion - 21 mA@ 23 kV

Ø6
Impulsion - 40,7 mA à 50 kV
CW - 48,5 mA à 50 kV

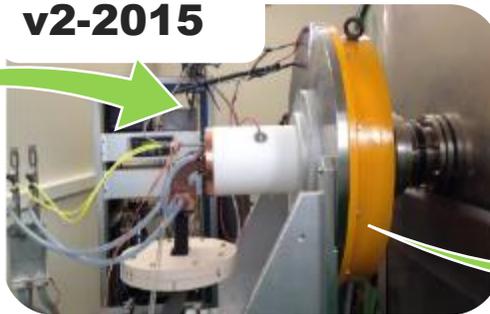
Ø6
Impulsion - 41 mA à 70 kV
CW - 50 mA à 76 kV



v1-2012



v2-2015



v3-2018 - 2024



Performance
record atteinte en
2024 :

100 mA à 75 kV

Source SILHI

- FAIR
- IFMIF
- (SPIRAL2)
- TITAN

ALISES v1

- ▶ Réduction LEPT
- ▶ Décharges de stylos
- ▶ Essais de réduction de la taille par chambre à plasma

ALISES v2 et v2 mod

- ▶ Isolant électrique en céramique simple
- ▶ Validation de la réduction de la taille de la chambre à plasma
- ▶ Quelques résultats inexplicables

ALISES v3

- ▶ Source compacte
- ▶ Longues séries et qualification des faisceaux jusqu'à 75 kV
- ▶ Deuxième conception de l'isolateur pour atteindre 100 kV

Lignes de transport de faisceaux

Objectif des lignes de transport de faisceaux :

- Diagnostic des faisceaux de la maison
- Focaliser le faisceau à l'entrée des étages d'accélération
- " Hacher " les impulsions
- Distribuer le faisceau



Ligne de transport de faisceaux à basse énergie pour le linac à protons FAIR au CEA Saclay

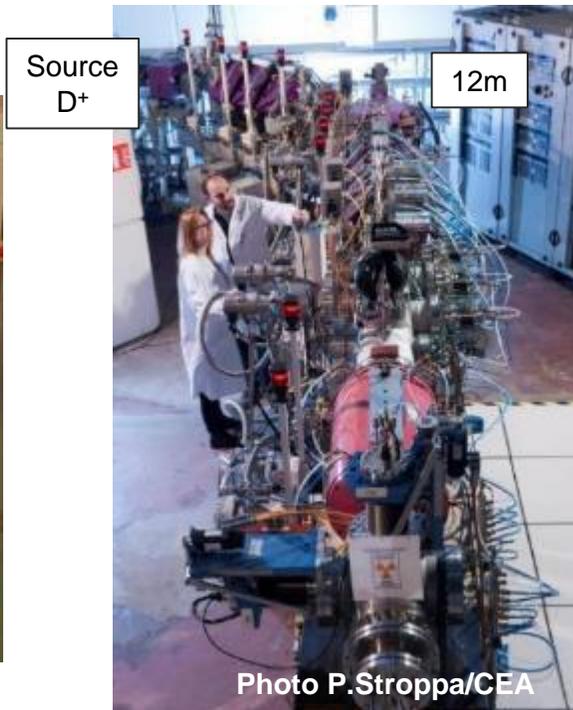
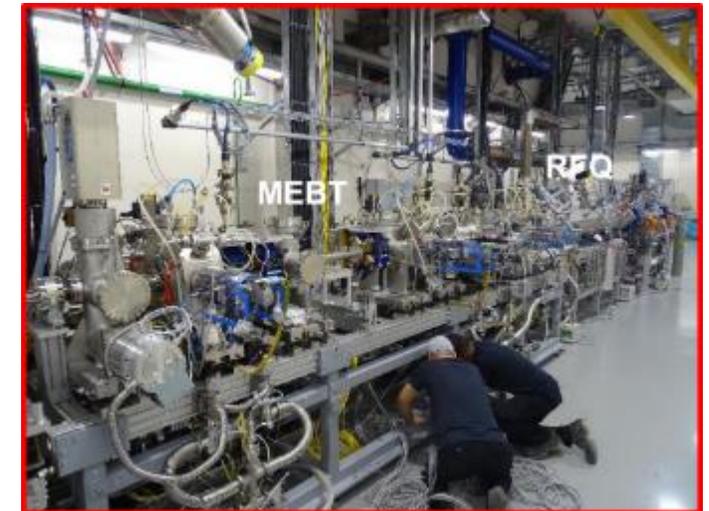
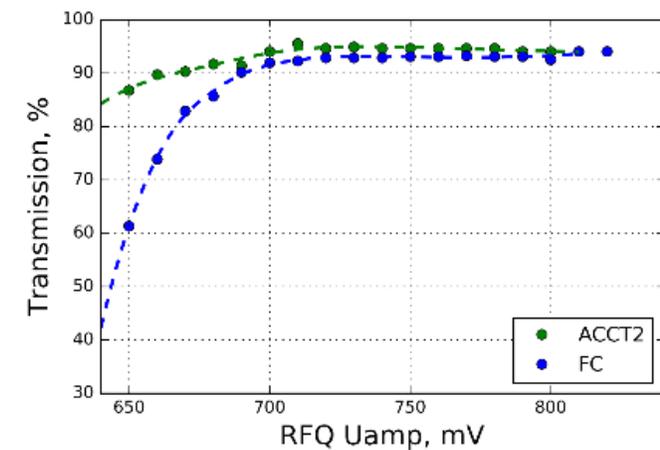


Photo P.Stroppa/CEA

SPIRAL2 LEBT à Saclay en 2012



SARAF2 MEBT installé après le RFQ



Transmission par rapport à la LEBT mesurée en MEBT

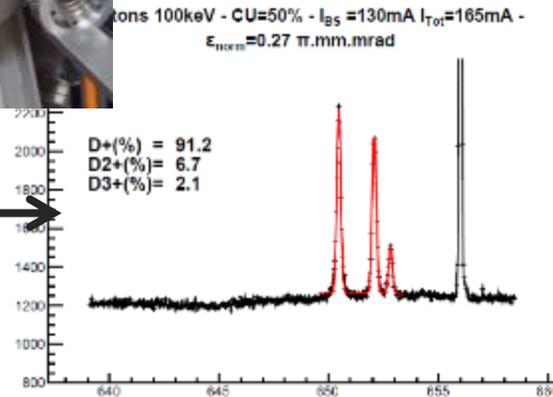
Diagnostic des faisceaux

- Nécessaire pour caractériser le faisceau : courant, position, taille, émittance, proportions
- Acquisition de données, commande et contrôle (DIS)

*Emittancemètre refroidi
avec écran thermique*



*Proportions mesurées
par la méthode du
décalage Doppler*



*Moniteur de profil
(grille SEM)*

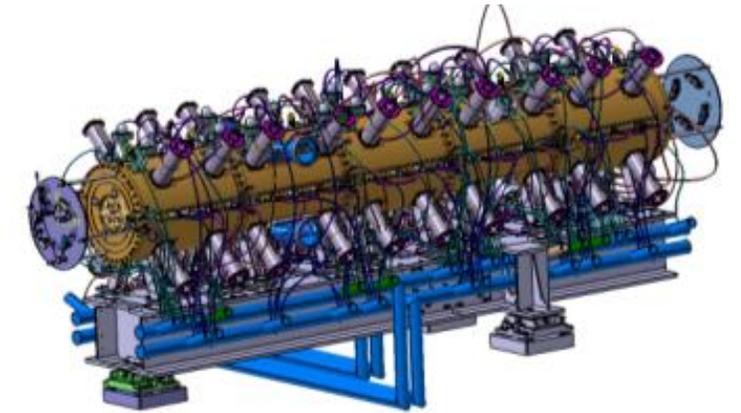
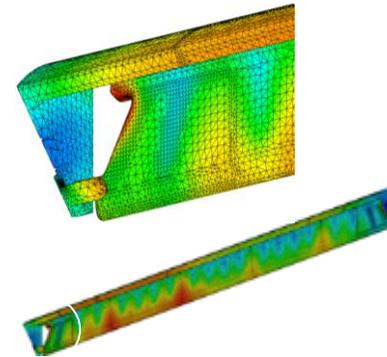
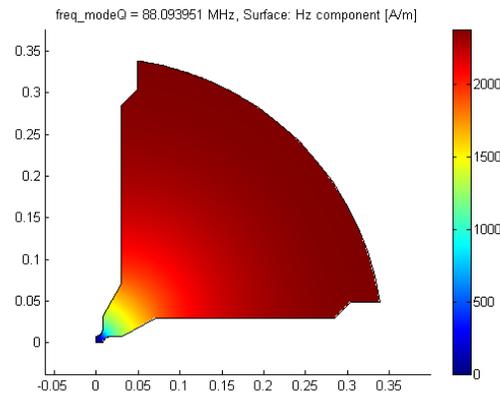
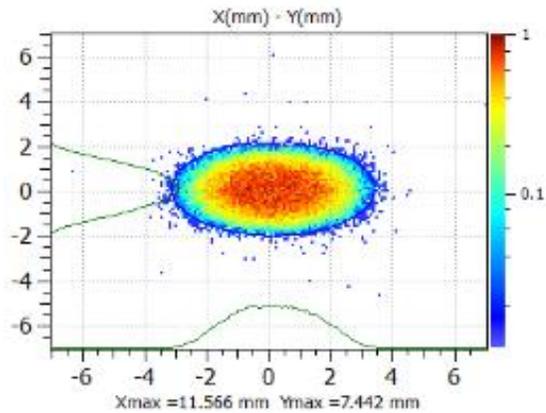


Moniteur à neutrons (DEDIP)

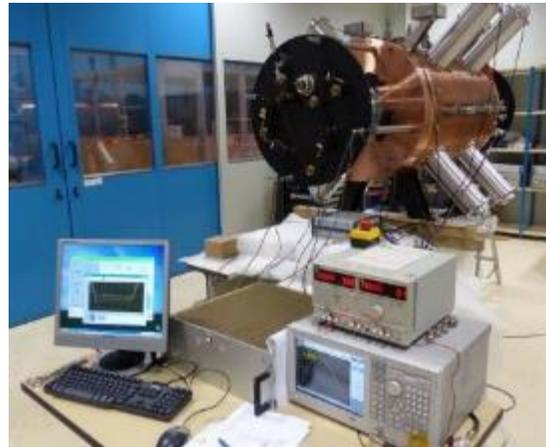


*Contrôle de la
position du
faisceau (BPM)*

Quadripôles de radiofréquence (RFQ) : de la conception à la réalisation, l'installation...



Conception du RFQ : dynamique des faisceaux, simulation RF, thermomécanique, conception mécanique



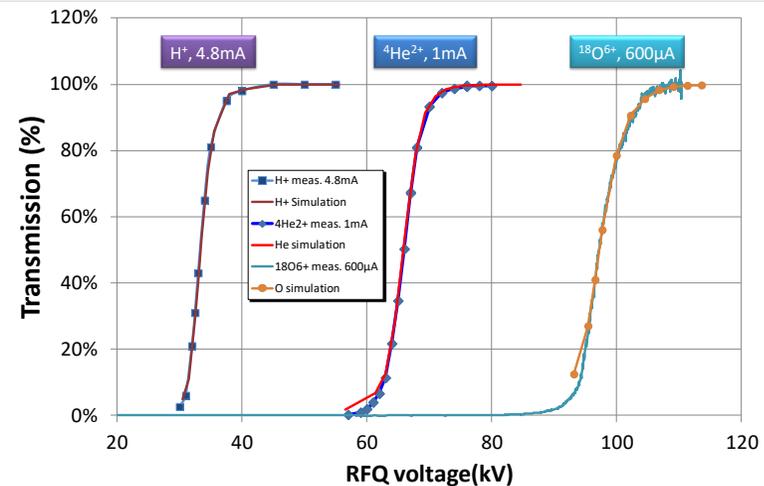
Exemple d'appel d'offres pour le Spiral2 : assemblage, tests RF de bas niveau et équipement complet.

... à la mise en service

DEMANDE DE PRIX	Fréquence (MHz)	Continu / pulsé	Actuel	L'énergie	Première poutre
Conception du LINAC4	352.2	Impulsion 7,5	80 mA H ⁺	3 MeV	2013 au CERN
SPIRAL2	88.05	En continu	5 mA H ⁺ , D ⁺ 1 mA q/A = 1/3	0,75 MeV / n	2015 au Ganil
IPHI	352.2	En continu	100 mA H ⁺	3 MeV	2016 à Saclay
ESS	352.2	Impulsé 4	70 mA H ⁺	3,62 MeV	2021 à Lund
NEWGAIN	88.05	En continu	q/A de 1/3 à 1/7	0,59 MeV / n	202x à Ganil



Premier faisceau accéléré par le Spiral2 RFQ,
03/12/2015

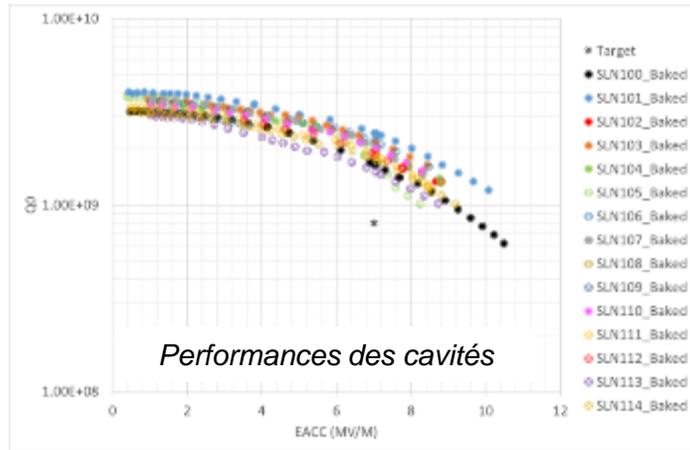


Transmission de la spirale2 RFQ



L'appel d'offres ESS a été lancé à Lund en août 2019, le premier faisceau a été accéléré le 26 novembreth, 2021.

Technologies RF supraconductrices : des cavités aux cryomodules



4 cryomodules, 27 cavités, 20 solénoïdes de focalisation



Conception et intégration de cryomodules



IFMIF = International Fusion Materials Irradiation Facility (installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion)

- EVEDA = Engineering Validation and Engineering Design Activities (Japon)
- DONES = Demo Oriented NEutron Sources (Espagne)

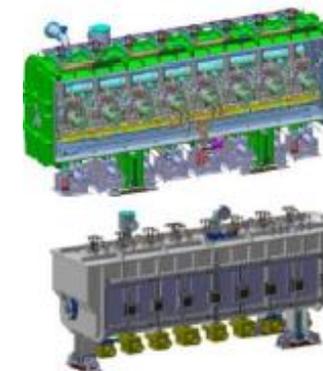
ESS = European Spallation Source (Suède)



SARAF = Soreq Applied Research Accelerator Facility (Israël)



PIP-II = Proton Improvement Plan II (États-Unis)



Premier CM installé dans le tunnel ESS

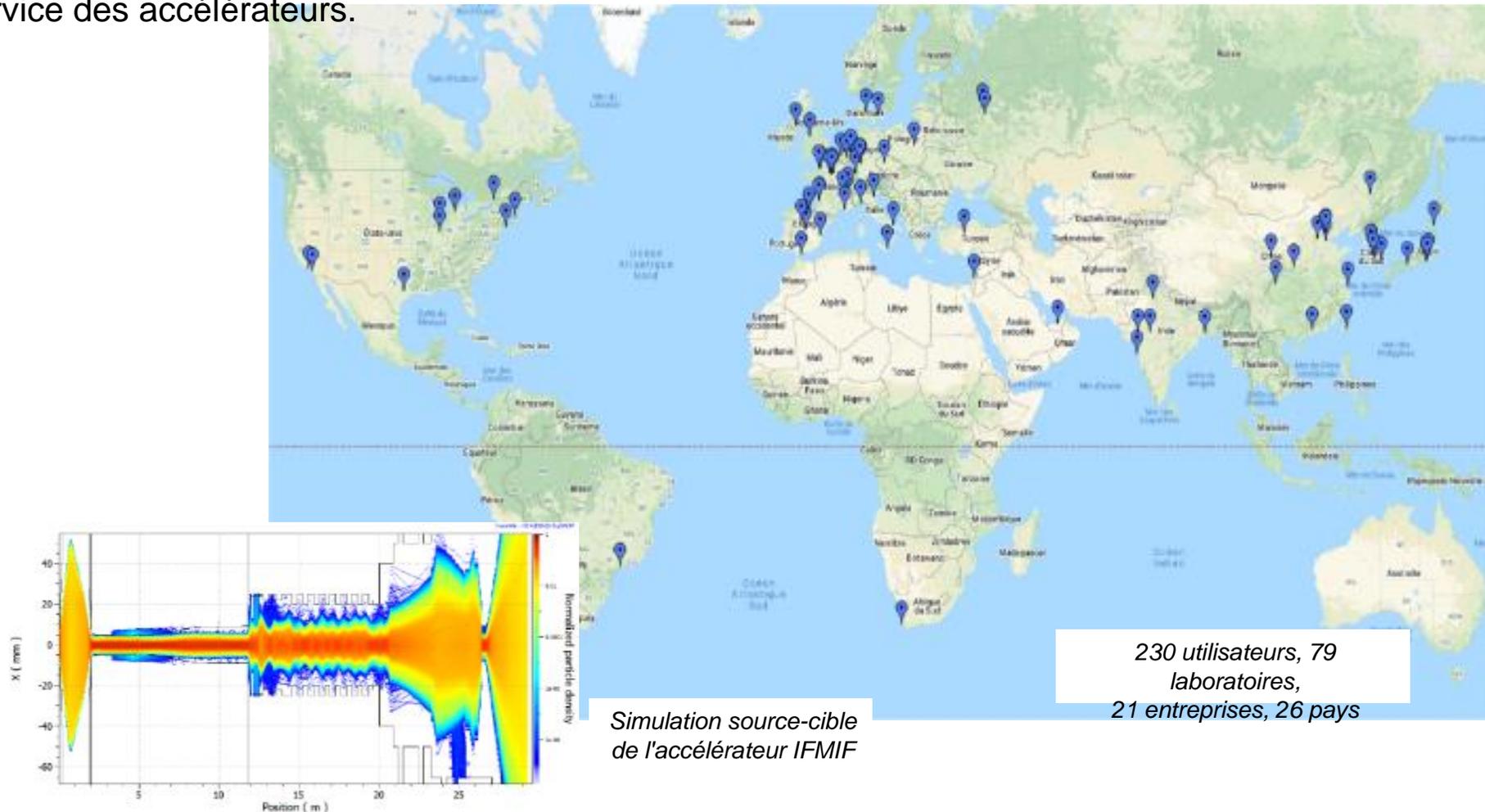


Premier CM livré à la SOREQ en juin 2023



Codes de la dynamique des poutres

- DACM développe des codes depuis les années 90. TRACEWIN est distribué commercialement.
- Les codes de dynamique des faisceaux sont obligatoires pour la conception, l'optimisation et la mise en service des accélérateurs.

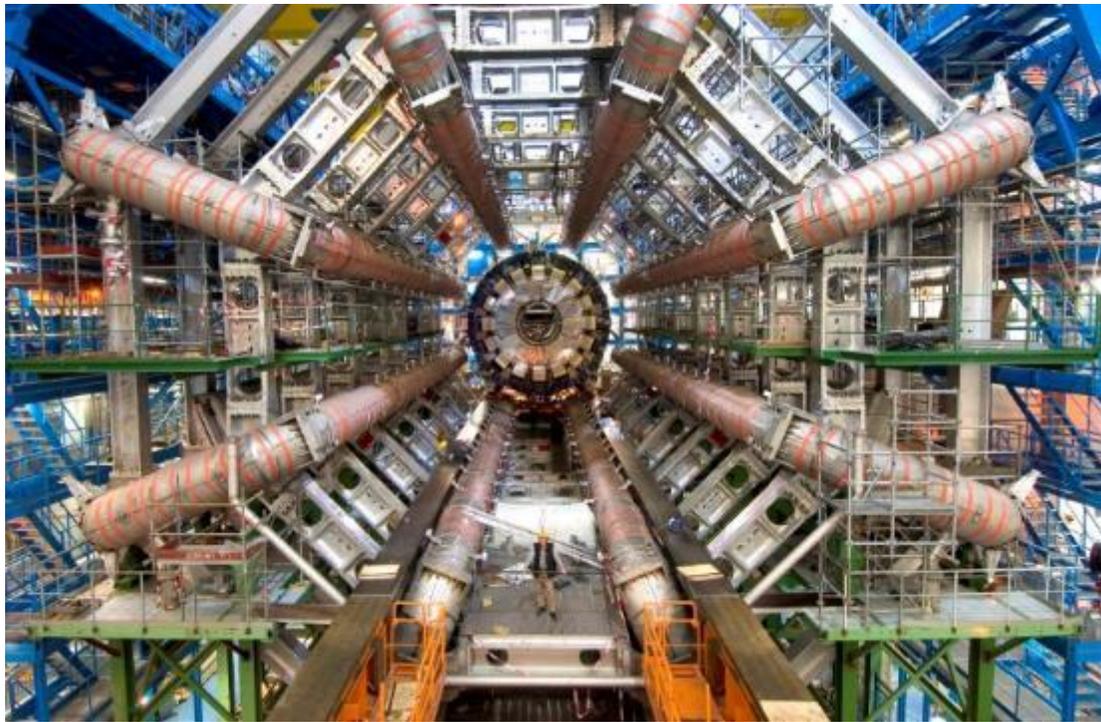




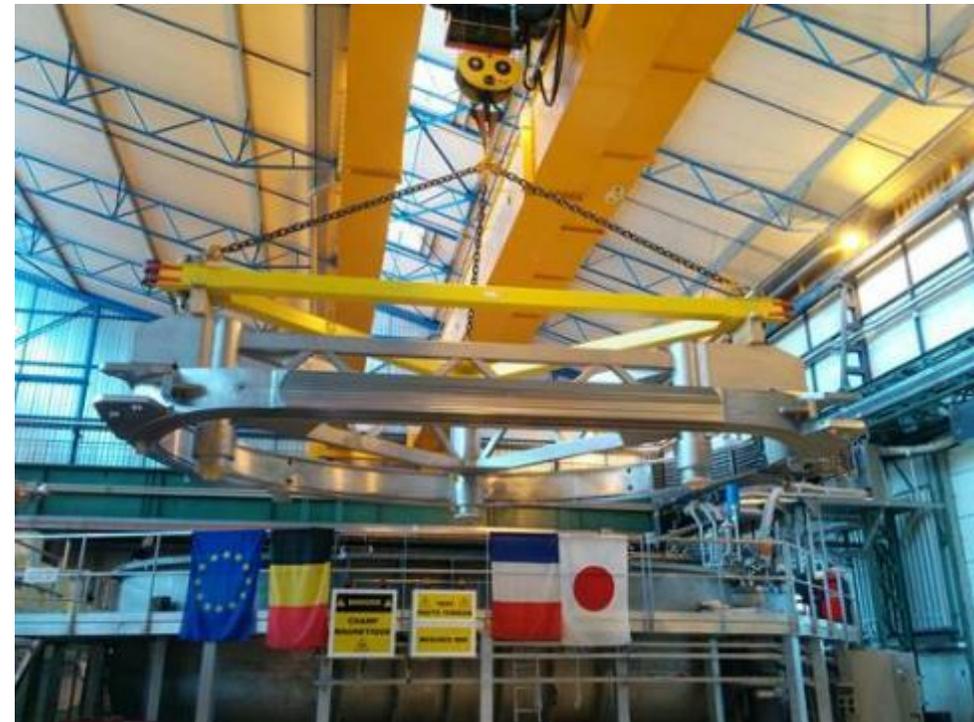
3 ■ Compétences et réalisations sur les aimants

Une longue histoire...

Le CEA a une longue expérience dans la conception, la fabrication, l'intégration et le test d'aimants de grande taille et/ou à haut champ pour les accélérateurs, les détecteurs de particules, l'énergie ou les applications médicales.



*Aimant toroïdal ATLAS
Assemblage mécanique Nov. 2005
Test au courant nominal Nov. 2006*



*Test des bobines JT60-SA
Première bobine testée en 2016*

Projets autour de 3 matériaux

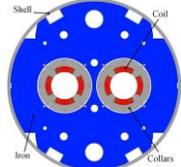


Nb-Ti

LHC Aimants accélérateurs (CERN/ CEA)
MQ spares

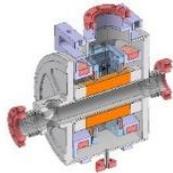


MQYY/MQYYM (Hilumi)



Autres aimants d'accélérateurs

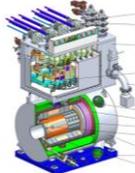
SARAF



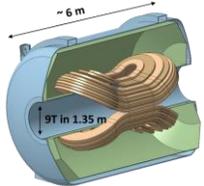
Super FRS

Source d'ions

Asterics

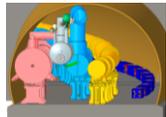
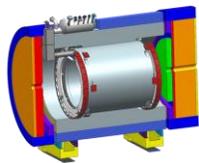


Aimants détecteurs



MADMAX

EIC MARCO + SR



Aimants haut champ

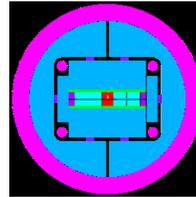
Aimant SC
LNCMI 43T



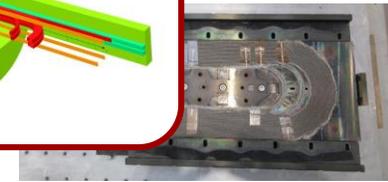
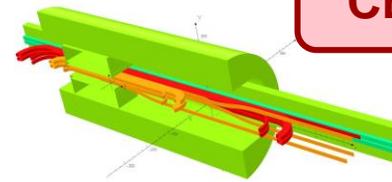
Aimant IRM:
ISEULT



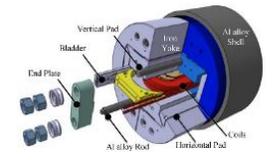
Nb₃Sn
CERN/ CEA



R2D2



SMC



Aimants d'accélérateurs et de détecteurs



GLEAD

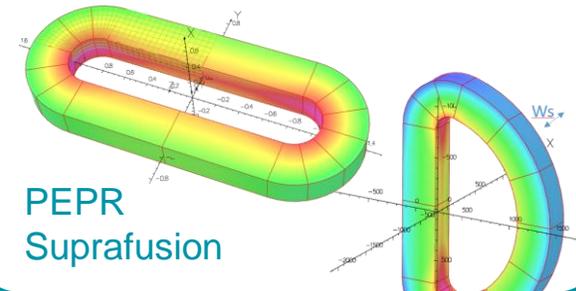


CERN/CEA
collaboration

HTS (REBaCuO)

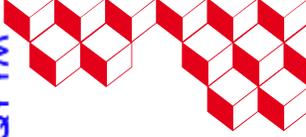
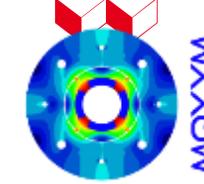
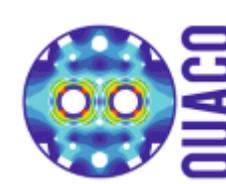
Aimants très fort champs > 30 T

SUPER EMFL / FASUM



PEPR
Suprafusion

Aimants MQYY pour le HL-LHC

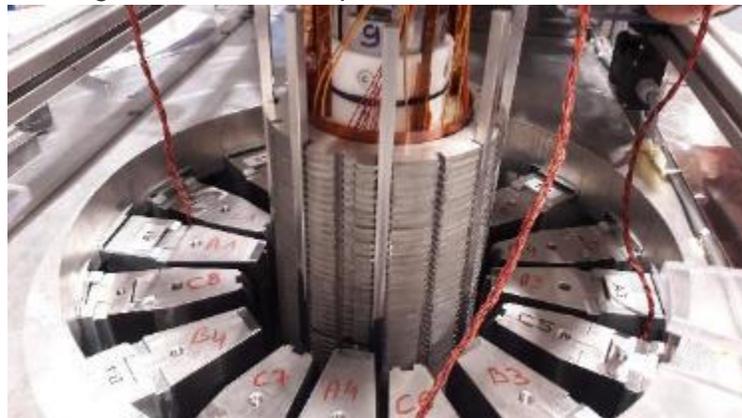


- Double aimant quadripolaire en NbTi d'une ouverture de 90 mm développé en collaboration avec le Cern
- Prototype court (1,2 m) bobiné à Saclay, assemblé au Cern, testé à 4,2 K à Saclay en 2021
- Deux aimants de grande longueur (3,7 m) ont été fabriqués et livrés à Saclay pour y être testés.



Détail d'une tête de bobine pendant le bobinage

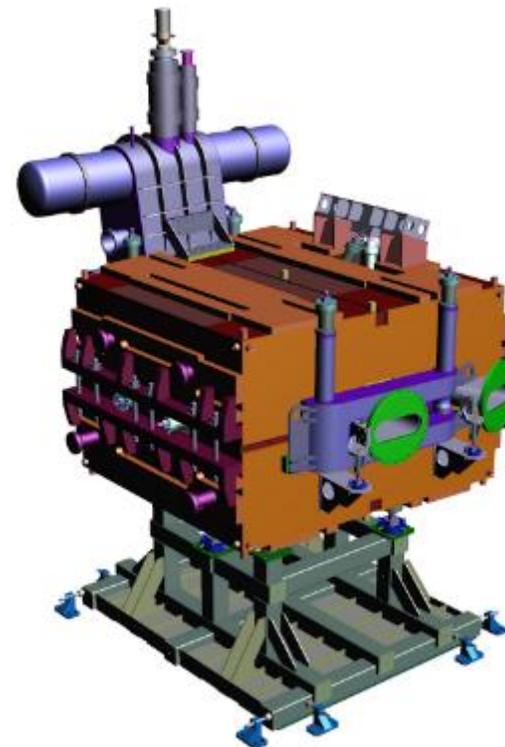
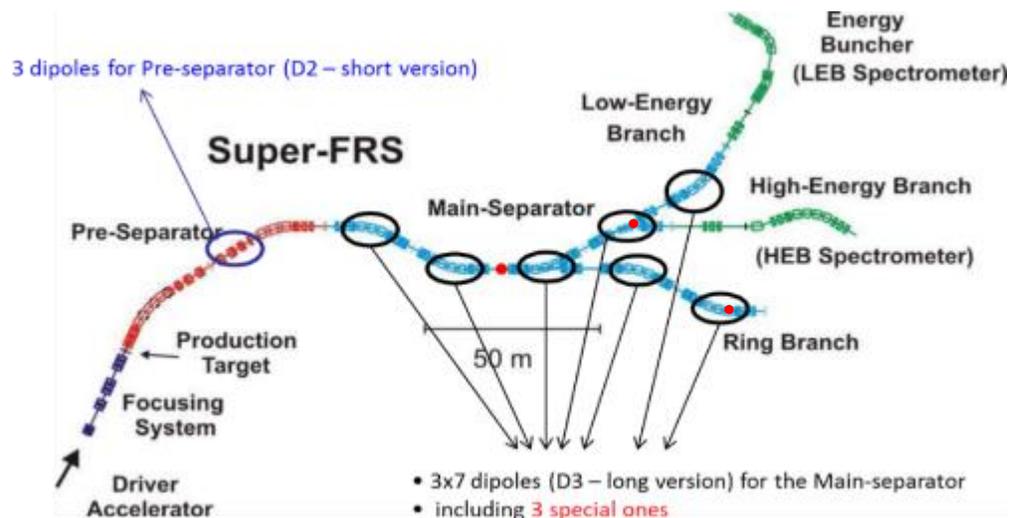
Mise en place des colliers avec une presse verticale au Cern



Fabrication des prototypes pleine longueur

Dipôles Super-FRS

- DACM chargé de la conception et du suivi de la fabrication de 24 dipôles superferriques
- Premier aimant D2 envoyé au Cern en janvier 2022 pour des essais à froid, testé en octobre, performances conformes aux attentes



Dipôle ramifié

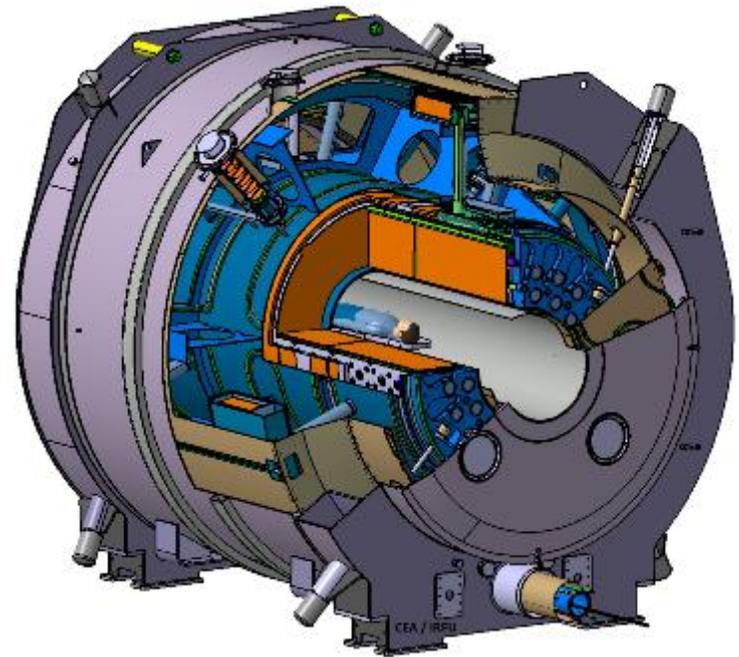


Premier dipôle standard de la série

Super-FRS (séparateur de fragments supraconducteur)
à Fair, Darmstadt, Allemagne

L'IRM corps entier ISEULT de 11,72 T

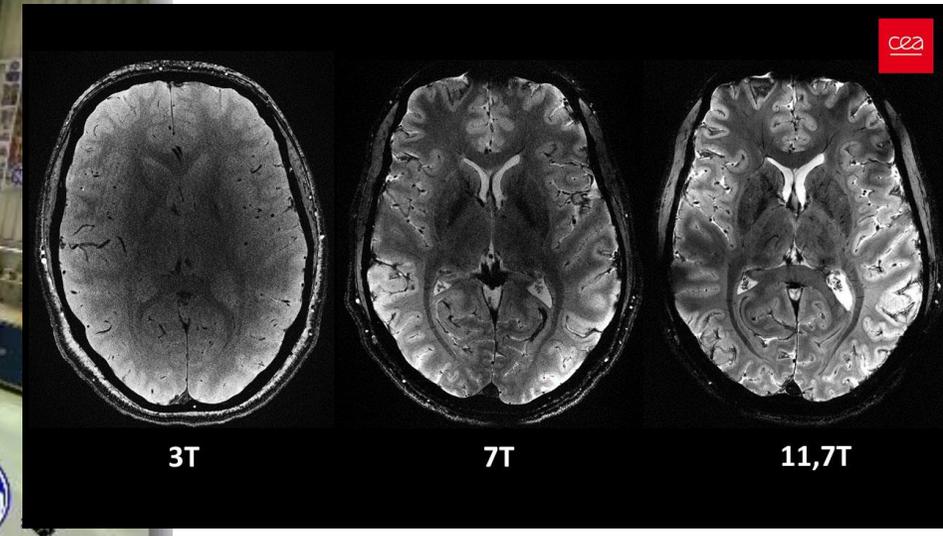
- Livré au CEA NeuroSpin en juin 2017
- Aimant à 1,8 K depuis mars 2019
- A atteint son champ magnétique nominal en juillet 2019, 8 mois d'integration
- Images de cerveaux humains en avril 2024



Coupe transversale de l'aimant de 11,72 T. Les bobines sont représentés en orange, la masse froide à 1,8 K en bleu et le cryostat en violet.



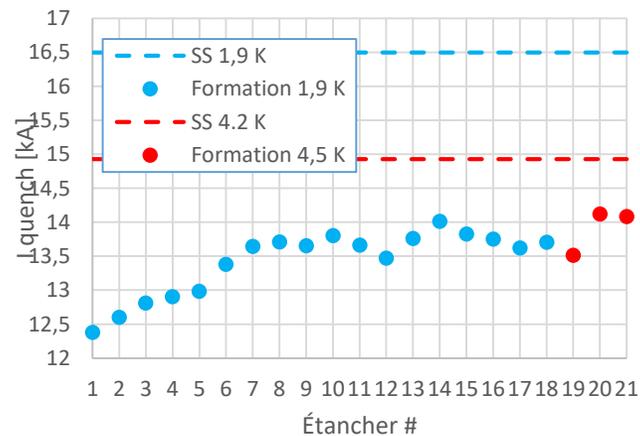
Fin de la construction de General Electric, Belfort



Premières photos de de cerveaux humains en 2024

R&D sur les aimants Nb_3Sn

- Bobine modèle court (SMC) entièrement fabriquée à Saclay en 2021
- Assemblé et testé au Cern en 2022
- 12 T atteint à 4,5 et 1,9 K
- R&D en cours avec le Cern pour atteindre 16 T, 50 mm d'ouverture



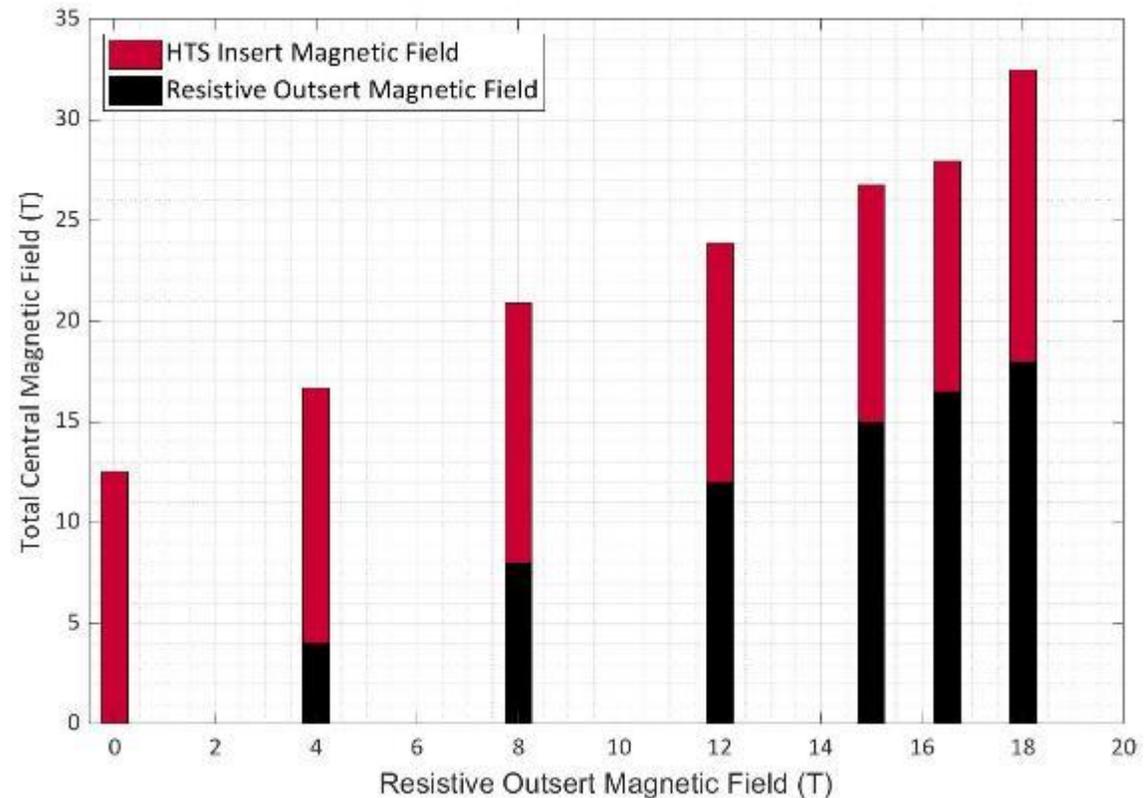
R&D sur les aimants HTS



- L'aimant hybride Nougat (CEA - CNRS collab.) a été testé au LNCMI (Grenoble) en 2019.
Champ total 32,5 T (14,5 T de l'insert HTS, 18 galettes de câble Rebcu)
- Etude (numérique et expérimentale) du refroidissement en champ fort, de la protection, de la déformation mécanique, des courants d'écrantage, ...



Insertion de l'aimant dans le cryostat de Grenoble





4 ■ Faits marquants et nouveaux projets

Accélérateurs pour la physique nucléaire : contributions à SPIRAL2

Depuis 2005, l'IRFU participe à l'acquisition d'éléments clés pour SPIRAL2 à GANIL.



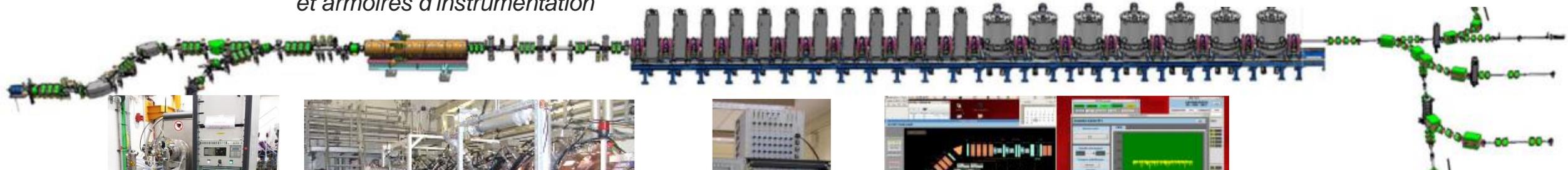
Lignes de transport de faisceaux et armoires d'instrumentation



Cryomodules à faible β



Convertisseur deuteron - neutron NFS



source p / d



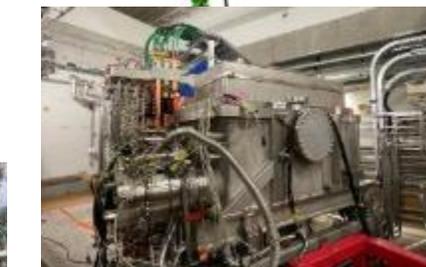
RFQ et son système de refroidissement



Numérique LLRF



Système de contrôle



S³ ligne de sélection

NEWGAIN : début de la construction ➤ NEWGAIN

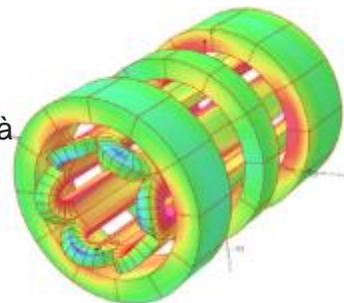
Nouvel injecteur GAnil : Nouvel injecteur $A/q = 7$ pour SPIRAL2

- Début de la fabrication de l'appel d'offres



Première girouette de l'appel d'offres Coupleur de puissance

- Conception et dé
- $B_r = 2,4$ T sur la chambre à plasma à $r=91$ mm, $B_z = 3,7/0,1/2,5$ T à $r=0$



Sextupole en solénoïdes



Essai d'enroulement

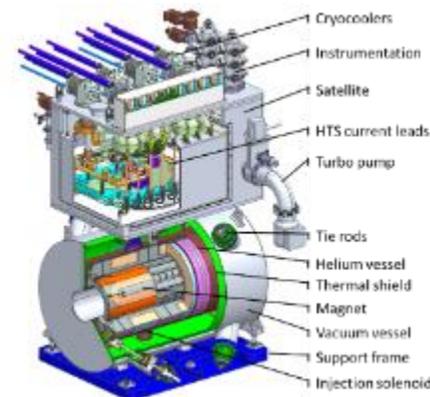
Caractéristiques principales :

- 7m de long
- Diamètre de 0,8 m
- 14 tonnes de cuivre
- Précision d'usinage $\pm 20\mu\text{m}$
- Précision d'assemblage $\pm 50\mu\text{m}$
- Vide level $\square 10$ mbar⁻⁹
- 150 kW Puissance RF
- 100 m³ / h eau de refroidissement

NOU
EAU



Outil d'assemblage RFQ avec une précision de $\pm 20\mu\text{m}$



Système cryogénique autonome

PIP II

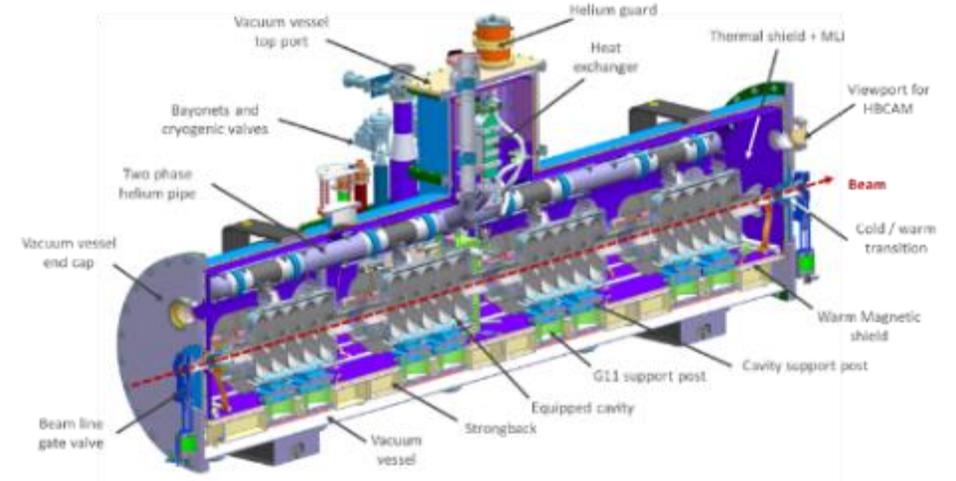
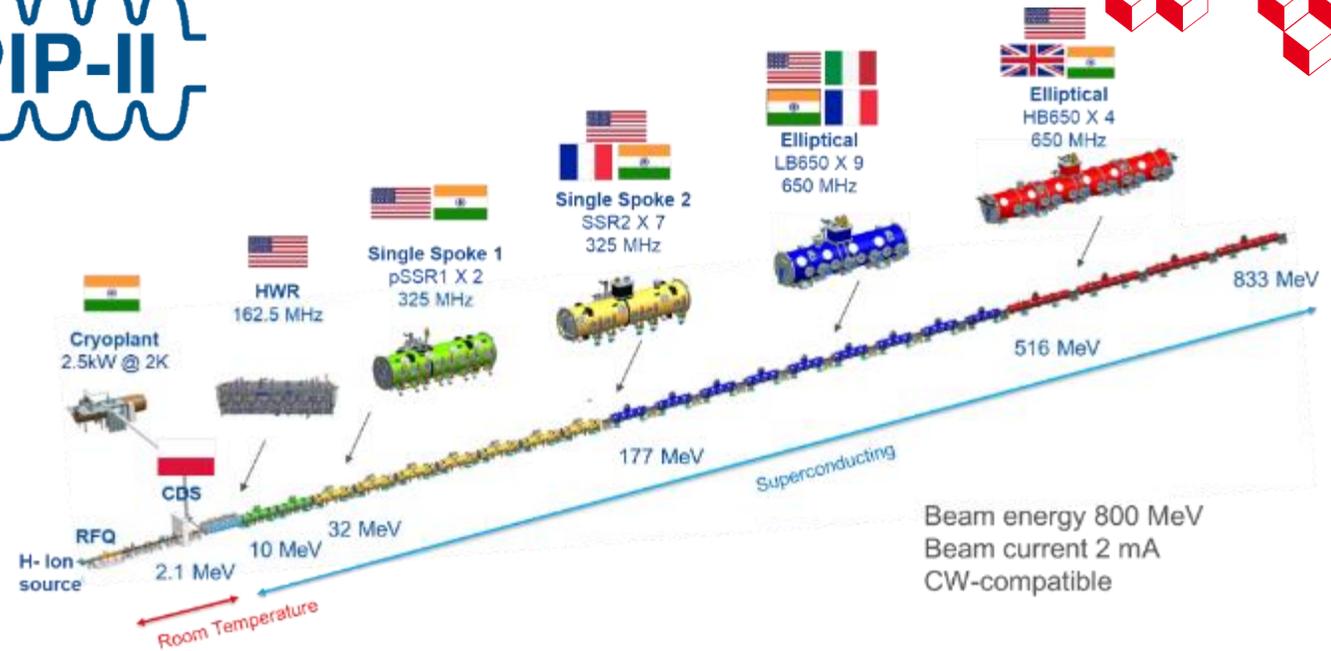
NOUVEAU



Contribution du CEA : conception, fabrication et qualification de 10 cryomodules LB650

- Avril 2023 : Validation de l'examen final de la conception
- 2024 : Lancement de la plupart des contrats pour la production de composants de cryomodules
- Août 2024 : début de l'installation d'une nouvelle chambre froide pour moderniser l'installation d'essai des cryomodules
- 2025-2026 : assemblage et test du cryomodule de préproduction

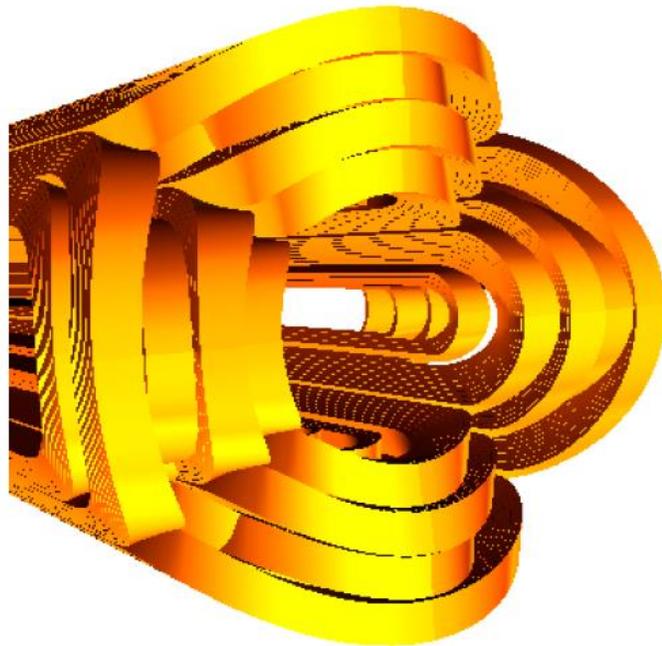
L'assemblage des cryomodules du PIP-II bénéficiera de plus de 30 ans d'expérience en matière d'assemblage de cryomodules au CEA.



Collisionneurs de haute énergie

HL-LHC

- Effets du champ frange de l'aimant sur le faisceau
- Carte de transfert non linéaire intégrée au code SixTrack du CERN



Modélisation de l'aimant quadripolaire avec l'aimable autorisation de S. Bagnis



FCC-hh :

- Responsable du WP2 dans EuroCirCol
 - Conception des arcs et dynamique du faisceau unique
 - Optique du collisionneur complet

[Eur. Phys. J. Special Topics 228, 755–1107 \(2019\)](#)
© The Author(s) 2019
<https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900087-0>

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL
SPECIAL TOPICS

Regular Article

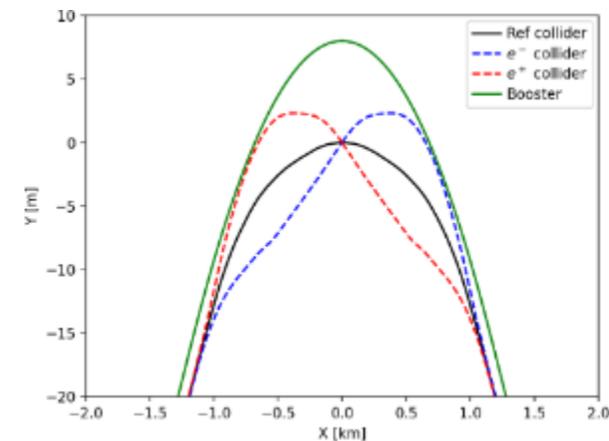
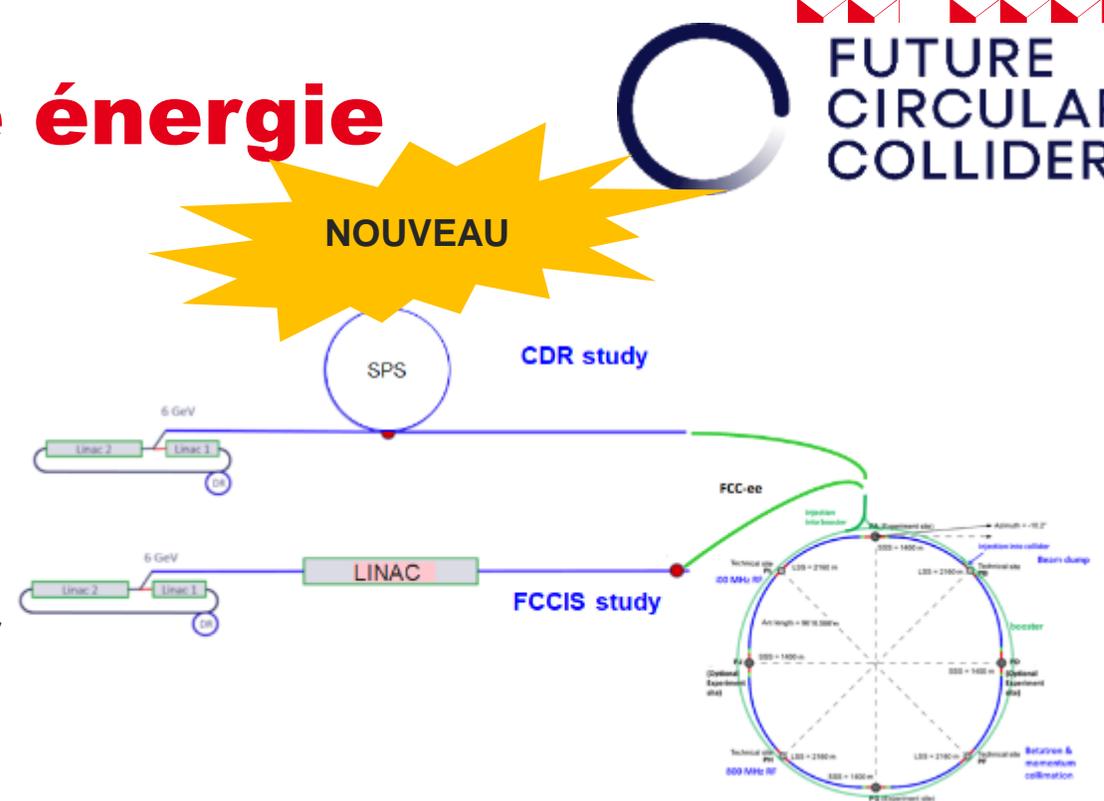
FCC-hh: The Hadron Collider

Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 3

FCC-ee booster de haute énergie

L'IRFU participe au projet européen H2020 Future Circular Collider Innovation Study (FCC-IS)

- Responsable de la tâche 2.4 *Conception d'un booster d'énergie complet et d'une injection d'appoint*
- Objectif : achever la conception du booster pour accélérer e^-/e^+ de 20 GeV à l'énergie de collision dans le même tunnel de 91 km.
- Produit final (mars 2025) : Rapport de conception FCC-ee, participation à la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.



Collisionneurs de muons



Travailler dans le cadre du projet européen
MuCol (jusqu'en 2027)

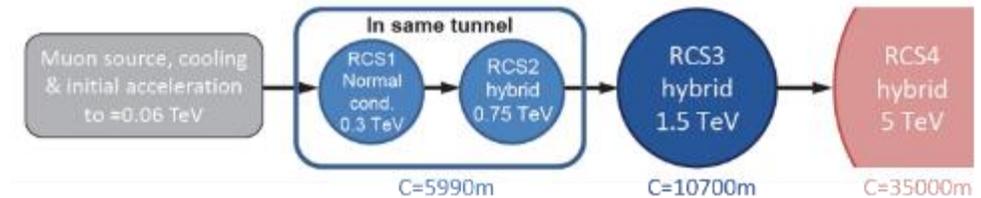
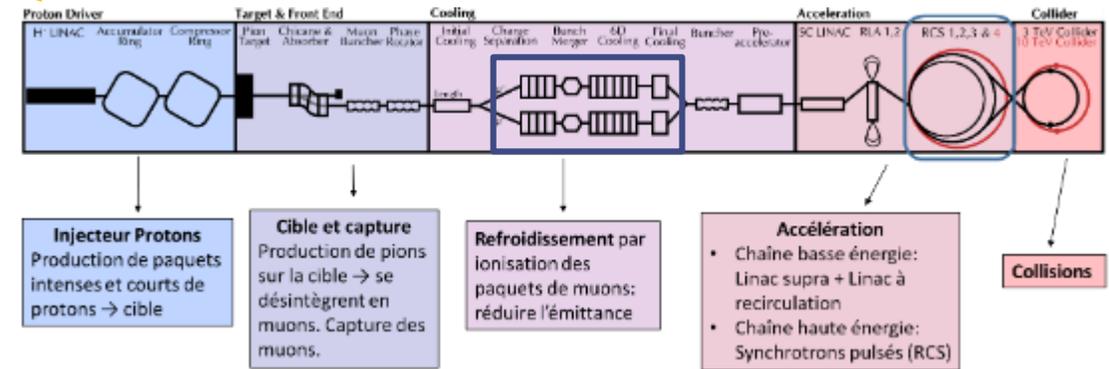
■ Responsable du WP5 : Complexe de haute énergie

- Conception optique pour tous les synchrotrons à impulsions

Thèse de doctorat en cours Lisa

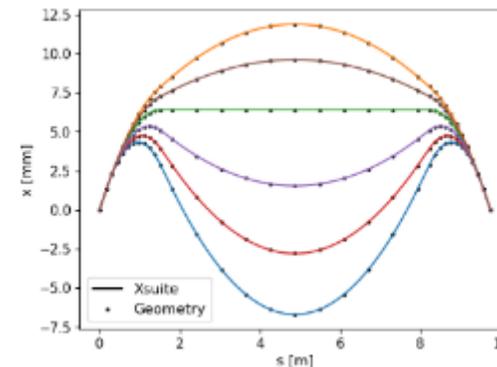
SOUBIROU Conception de synchrotrons

pulsés pour la chaîne d'accélération à haute énergie d'un collisionneur de muons

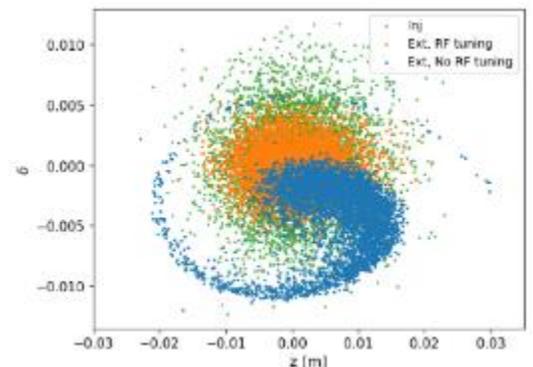


■ Responsable adjoint du WP6 : Systèmes de radiofréquences (avec INFN)

- Conception d'une cavité conductrice normale pour le système de refroidissement, compatible avec une cellule de refroidissement d'essai
- Étude du claquage dans un champ magnétique élevé



Trajectoires de l'injection à l'extraction



Transport longitudinal dans un synchrotron à cycle

Sources de neutrons basées sur des accélérateurs

■ L'Irfu s'intéresse depuis longtemps aux sources de neutrons basées sur des accélérateurs :

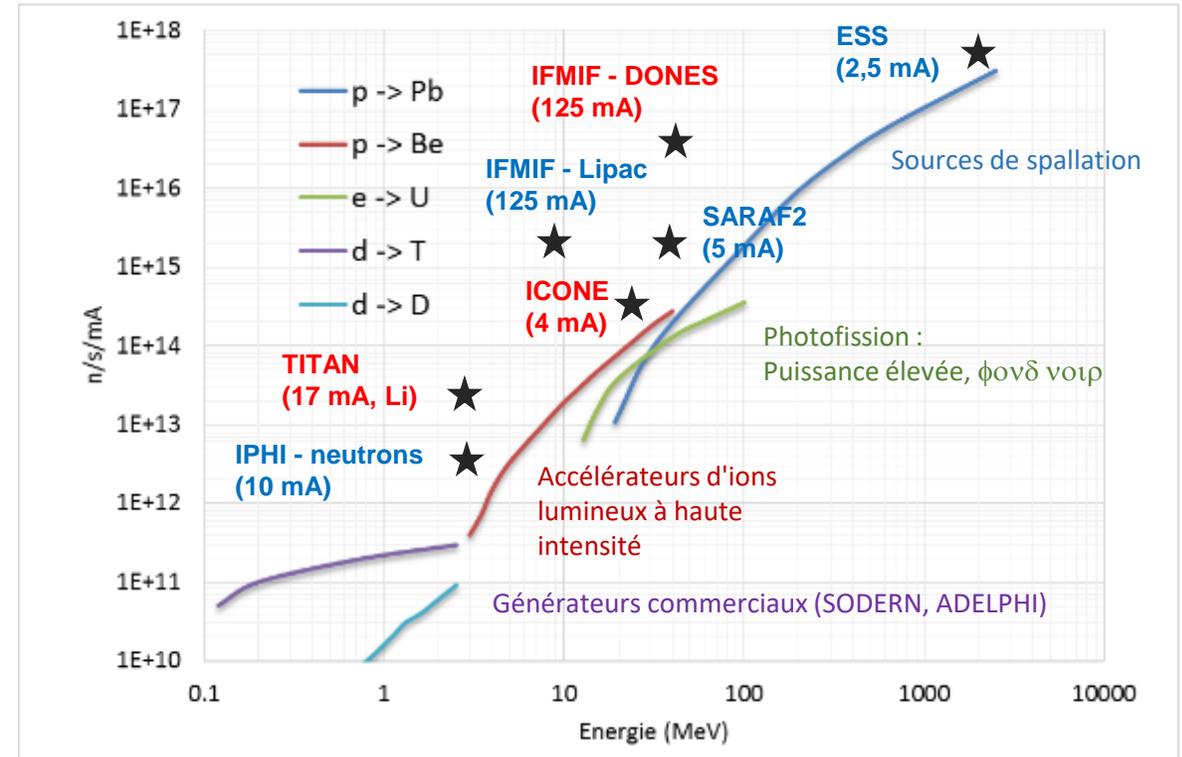
- Participation à la source de spallation **ESS**
- Participation à l'**IFMIF - Lipac**
 - Courant d'enregistrement de la source de deutons
- Conception et fourniture du Linac **SARAF2**

■ Le besoin de sources compactes (sans spallation) se fait de plus en plus sentir :

- Remplacer les réacteurs de recherche en cours de fermeture (Orphée à Saclay)
- Étudier les matériaux pour les futurs réacteurs de fusion (IFMIF - DONES)
- Privilégié par le CEA et l'AIEA pour les pays en développement (Neutrons4NA, atelier à Saclay 14-17 octobre 2024).
- Développement du BNCT en Asie, en Finlande et au Royaume-Uni



Increasing need for high current compact neutron sources either for irradiation (DONES) or neutron scattering (ICONE), rather than reactors.



Contributions à ESS



L'IRFU est responsable de la livraison des principaux composants de l'accélérateur :

- **Diagnostic des faisceaux** : émittancemètre, mesure Doppler, moniteurs de profil non invasifs, moniteurs de perte de faisceau de neutrons
- **L'appel d'offres** a été lancé à Lund en août 2019, le premier faisceau a été accéléré le 26 novembre 2021.
- **Intégration et livraison de 30 cryomodules** :
 - Intégration sous-traitée à un partenaire industriel
 - En septembre 2024, 25 CM ont été livrés, 15 testés, 14 acceptés et installés.
 - ESS dispose des cryomodules nécessaires pour fonctionner à 2 MW



Le RFQ et un cryomodule installé dans le tunnel ESS

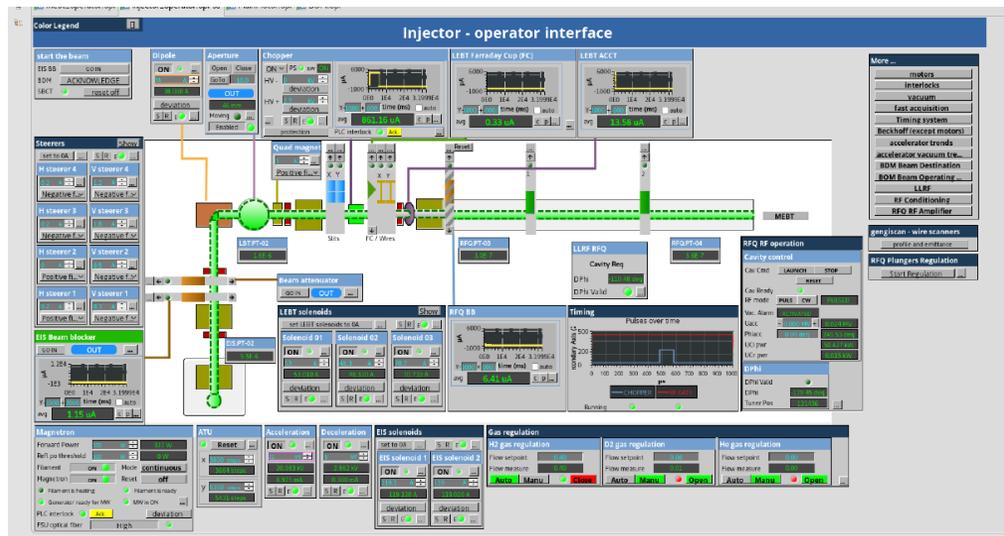
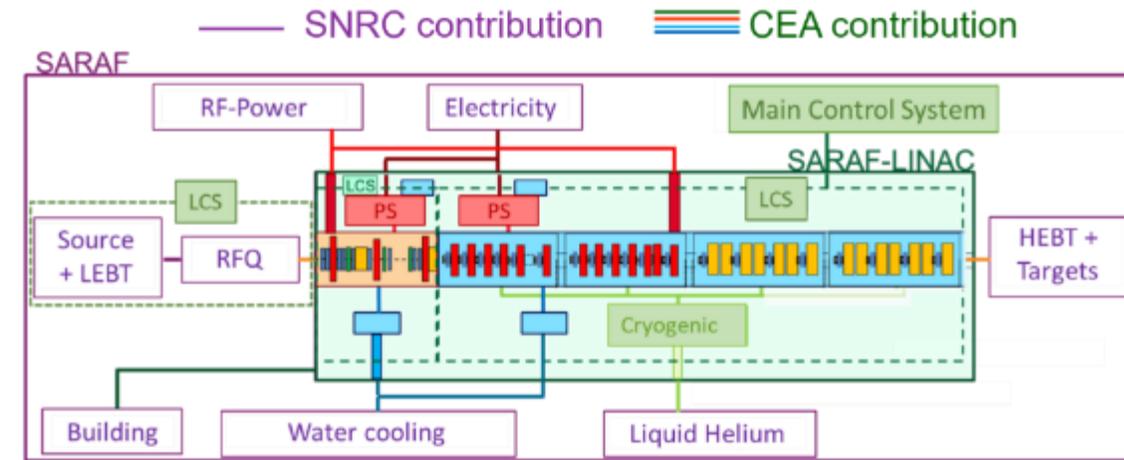
nBLM au SSE

SARAF2 : un accélérateur pour remplacer un réacteur de recherche

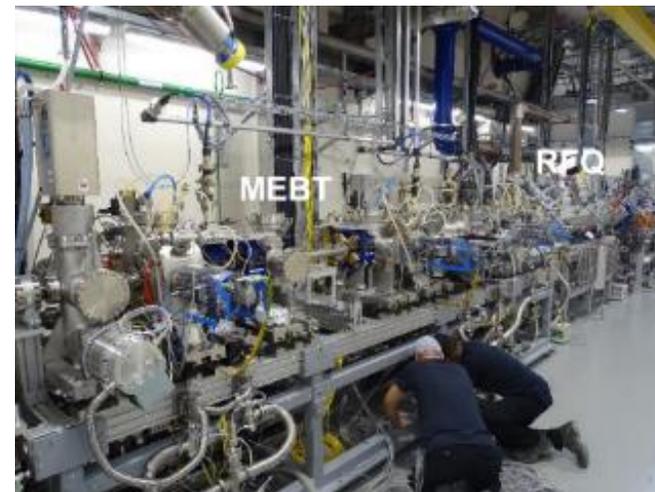


CEA en charge du Linac et du Système de Contrôle Local de la Source, du LEBT et du RFQ

- 2015-2018 : conception et prototypage
- 2018-2023 fabrication en série et qualification individuelle
- Les MEBT et les cryomodules sont désormais intégrés dans les sous-systèmes du linac et ont été qualifiés à la Soreq (MEBT) et à Saclay (cryomodules).



Système de contrôle LEBT



La MEBT est livrée en août 2020 et validée avec le faisceau en juin 2023.



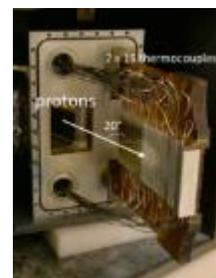
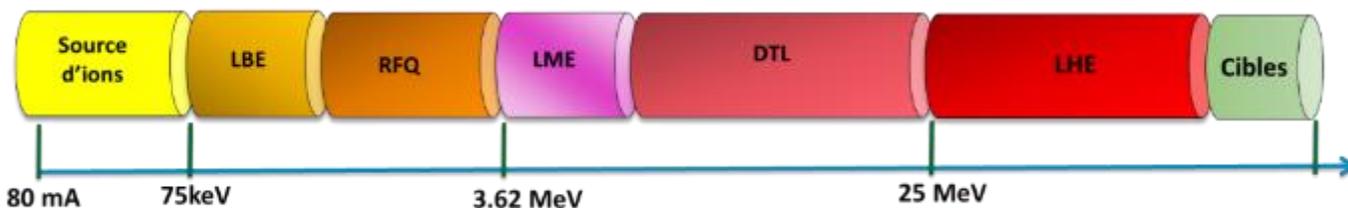
Premier cryomodule installé après le MEBT

https://irfu.cea.fr/en/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=5194

ICONE : étude de conception

Projet CEA - CNRS de construction d'une source nationale compacte de neutrons pour la communauté de diffusion des neutrons

- Début. 2024 : début de l'étude de conception pour 2 ans
- Accélérateur (responsabilité de l'IRFU) :



LLB - IRFU cible



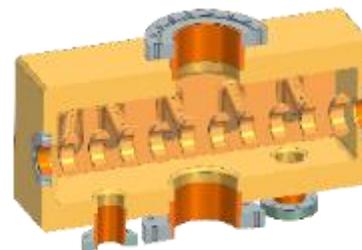
Source de protons à haute intensité



APPEL D'OFFRES ESS



Accélérateur à chaud : ESS DTL (INFN) ou IH-Cav CEA-IRFU

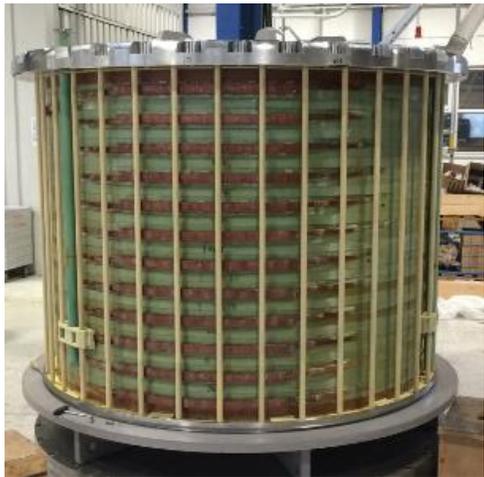
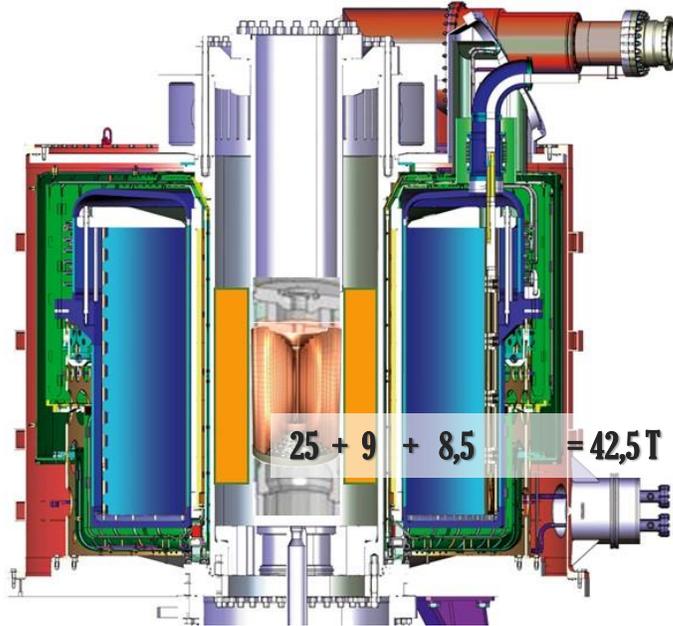


SOURCES requirements	High Flux	High Resolution
Energy p ⁺ [MeV]		25
Peak Intensity p ⁺ [mA]		80
Pulse Duration [ms]	2	0,4
Pulse Repetition Rate [Hz]	20	50
Duty Cycle	4%	2%
Average Flow p ⁺ [/s]	~2 10 ¹⁶	~10 ¹⁶
Average Flow n _{fast} [/s]	~4 10 ¹⁴	~2 10 ¹⁴
Average Flow n _u [/s/cm ² /sr]	~4 10 ¹⁰	~2 10 ¹⁰
Neutron Sources	5+2	5+2

Caractéristiques : impulsions courtes et longues simultanées

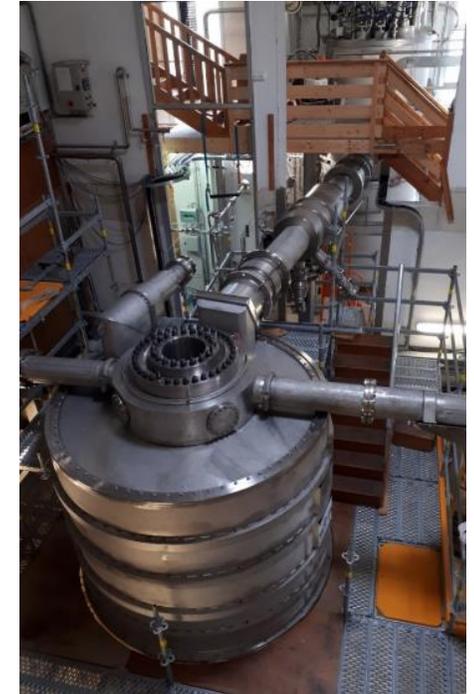
	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
APS/APD							Consolidation coûts/délais		Opération HF					
ICONE-Phase 1	Etudes		Construction					Commissioning						
ICONE-Phase 2						Etudes		Construction			Commissioning		Opération HR	

Calendrier prévisionnel

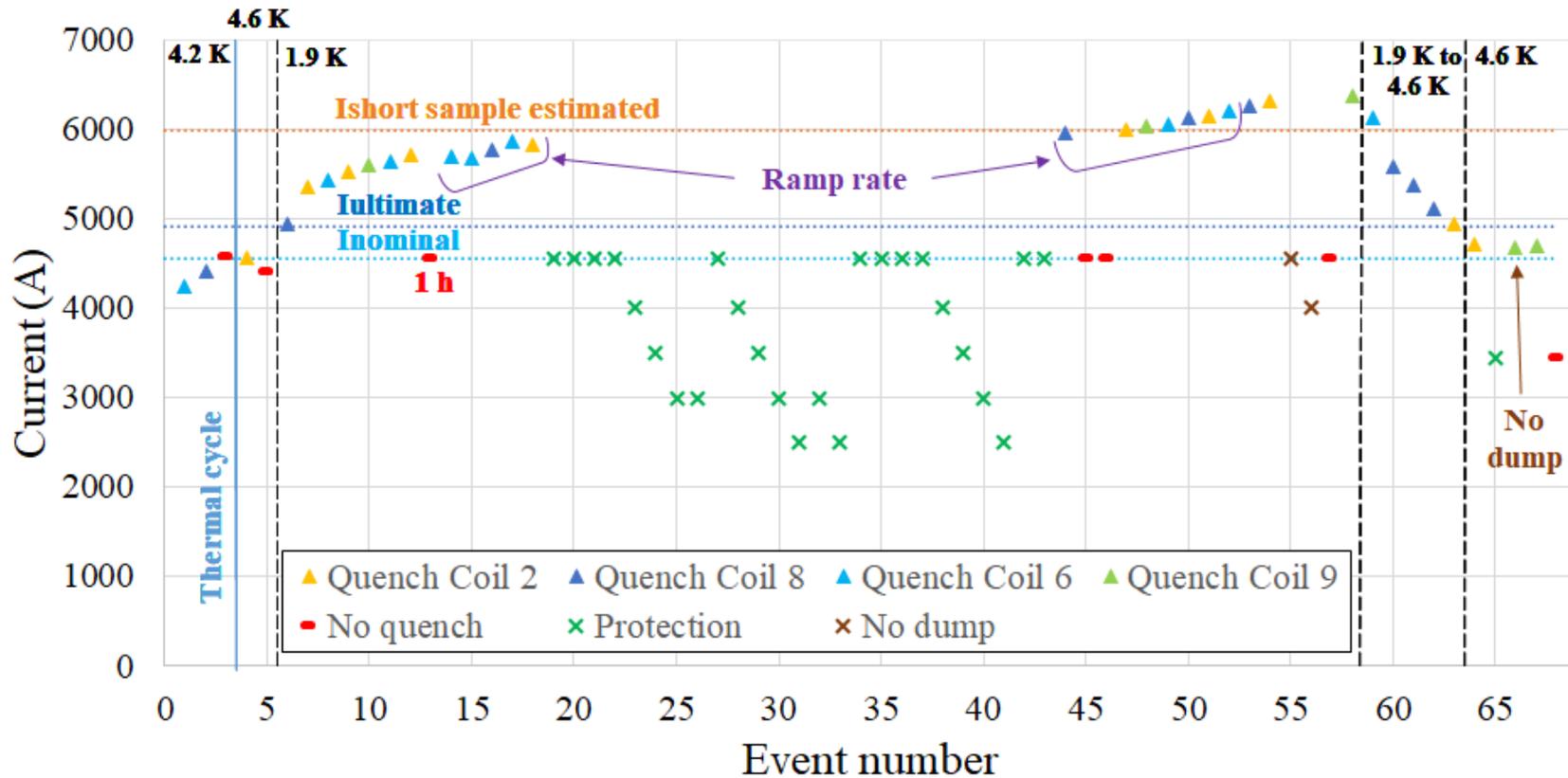


Bobine NbTi

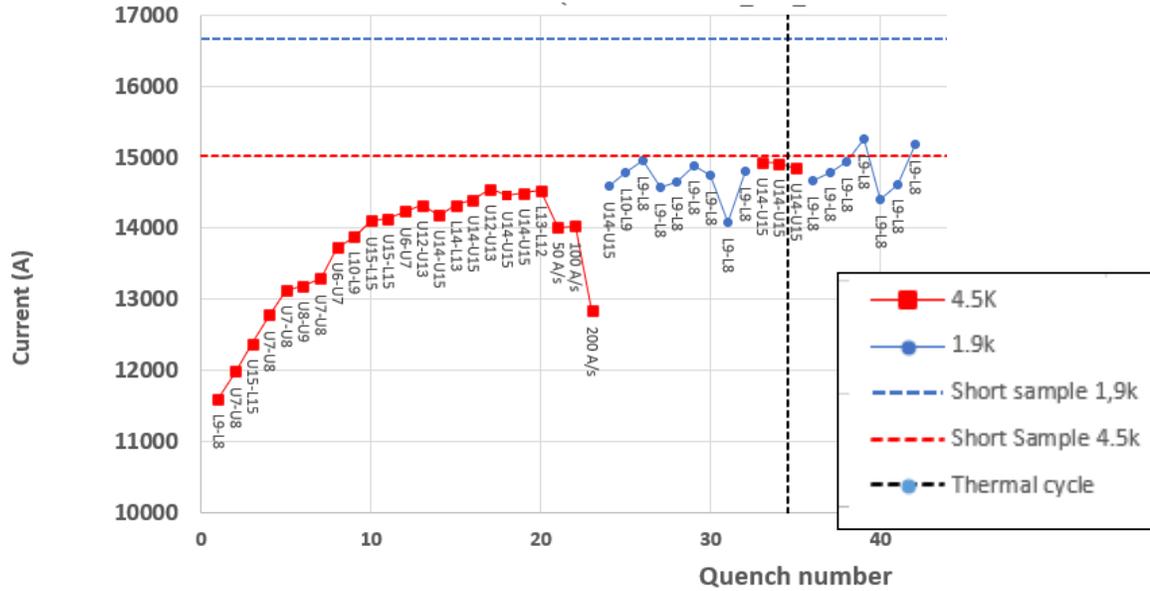
- Dispositif :
 - Aimant SC (NbTi): 8,5 T (atteint en 2023).
 - Bitters (Cu): 8,9 T
 - Poly-hélices (Cu): 25T (26/06/24)
- Quelques aléas ..
 - Quench mou (06/2024)
 - Dégradation alimentation NbTi (06/2024)
- Records européen :
 - Montée à 40 T: 25 + 6,5 + 8,5 T (7/11/24)
 - **Montée à 42 T: 25 + 8,5 + 8,5 T (7/11/24)**



→ Validation du plan de test de l'aimant MQYYM à 1,9 K (avec le commissioning de STAARQ)



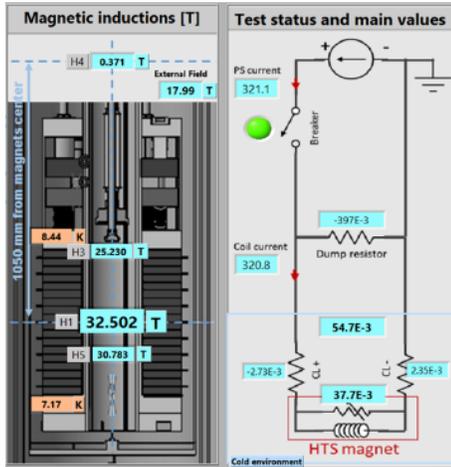
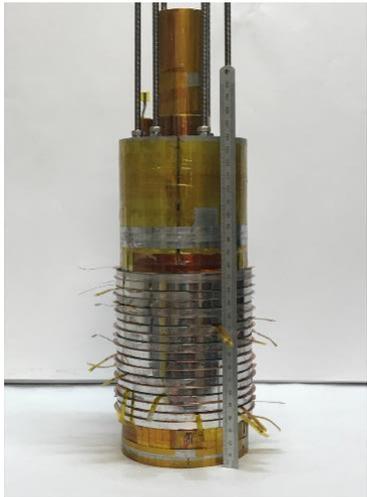
✓ 99% de la limite à 4.5 K !



Aimants ultra haut champ



Solénoïde NOUGAT
32.5 T en 2019
 14.5 T HTS
 +
 18 T bobine résistive



SuperEMFL SC 32 T+ / 40 T+

11 partenaires européens,
 Budget total alloué 2.9 M€
 Design/ prototype pour aimants HTS/ LTS



2024



FASUM SC 40 T

Forty Tesla Superconducting User Magnet

3 partenaires français (CEA/LNCFMI-G,UGA)
 Budget total alloué 3.4 M€
 Designs/ fabrication d'un aimant utilisateur HTS/ LTS



2026



SINPAH hybride 50 T

Système d'INsert Pour Aimant Haut champ

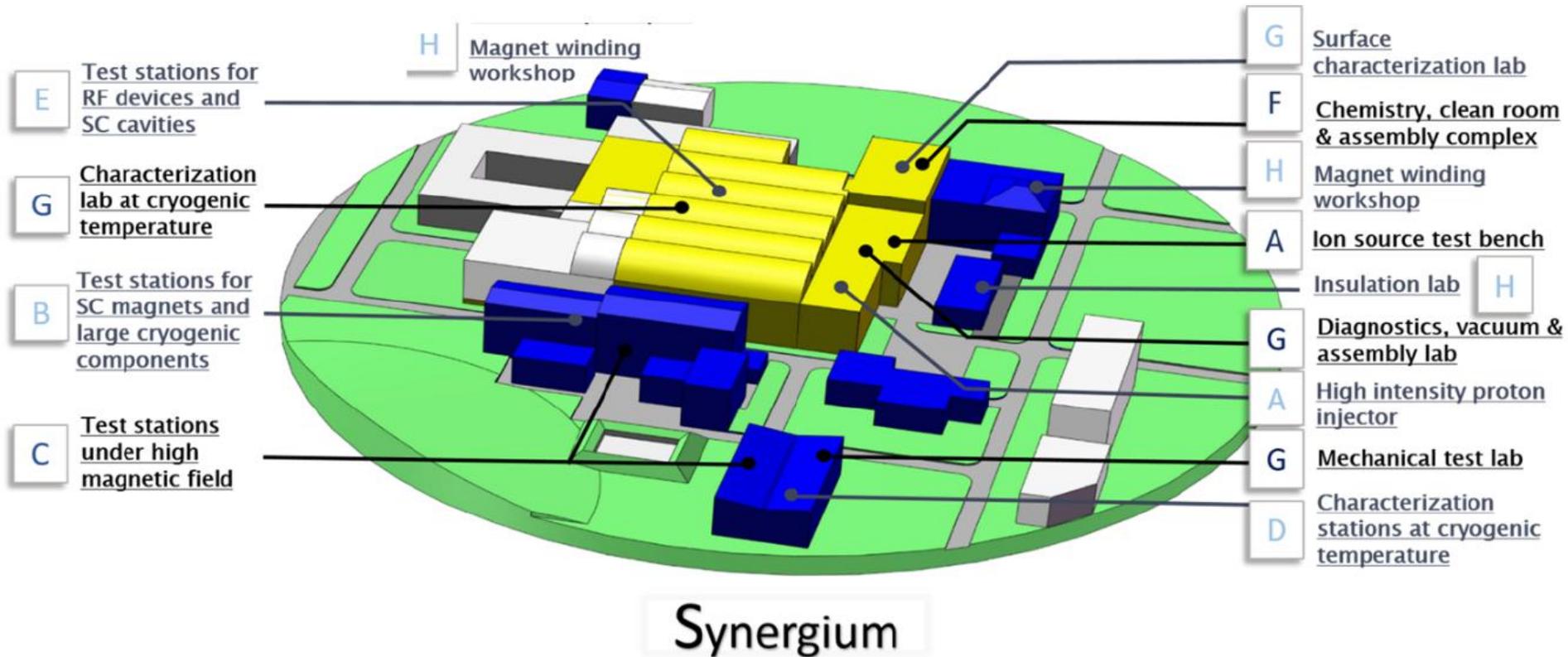
2 partenaires français (CEA/LNCFMI-G)
 Budget total demandé 800 k€
 Designs & fabrication d'un insert HTS fonctionnant à 50 T





5 ■ Infrastructures

Le synergium: une infrastructure technologique au CEA



Synergium complex

- ✓ 25 000 m²
- ✓ 100 M€ technical platform
- ✓ 200 FTE
- ✓ 40 M€ / year turnover

Member of the

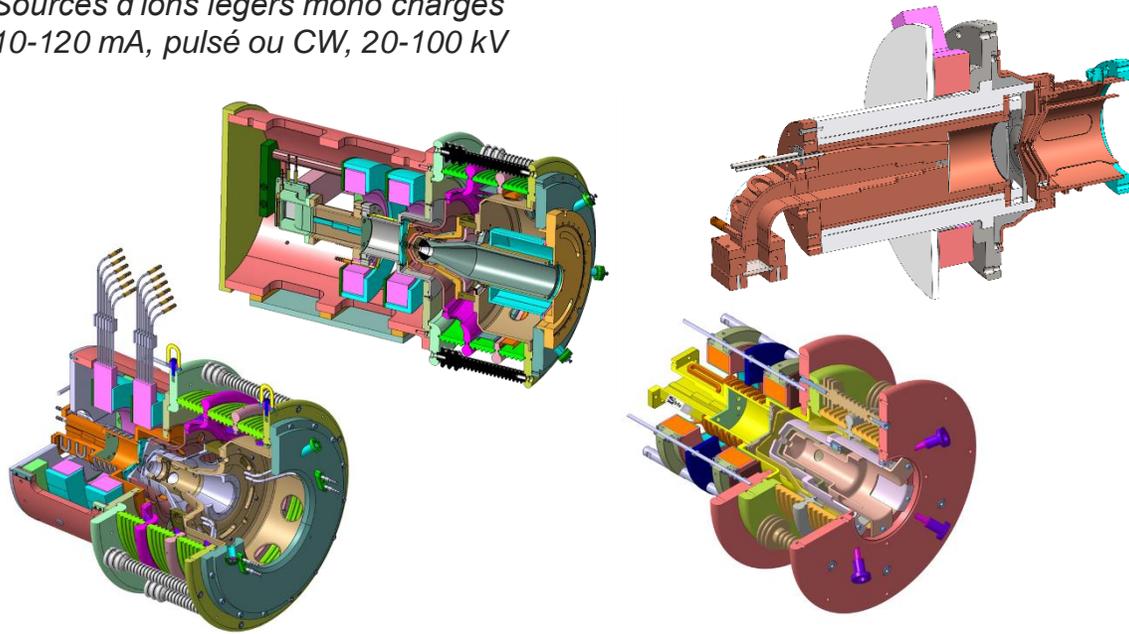


European project

ACCELERATOR AND MAGNET
INFRASTRUCTURE
FOR COOPERATION AND
INNOVATION
EUROPEAN TECHNOLOGY
INFRASTRUCTURE

Bancs de test de sources d'ions

Sources d'ions légers mono chargés
10-120 mA, pulsé ou CW, 20-100 kV



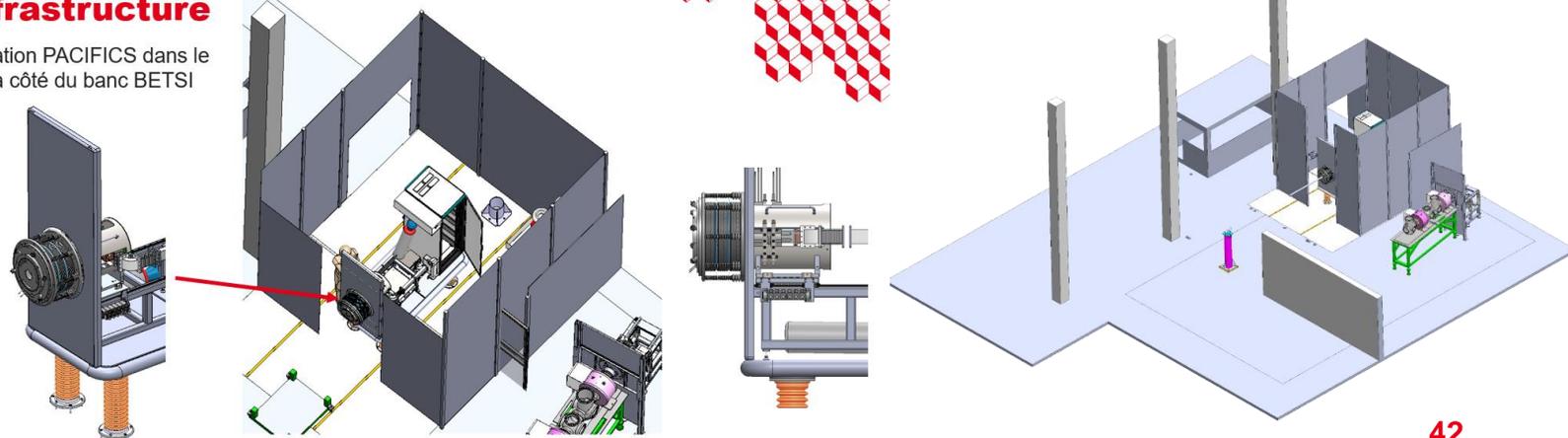
Source exit Solenoid 1 Diagnostic location (WF or EMU) Solenoid 2 Cooled beam dump with current measurement

Particle **AC**celerators Initiative for
Future Innovative and **Ch**allenging **S**ystems



Définition de la nouvelle infrastructure

Implantation PACIFICS dans le
Hall 4E à côté du banc BETSI



Next generation of particle sources

High current single charged particle sources and heavy ions sources

AXE4 – 10 Juillet 2023



Infrastructure dédiée aux cryomodules



Hall d'assemblage (x2)
~3000 m²

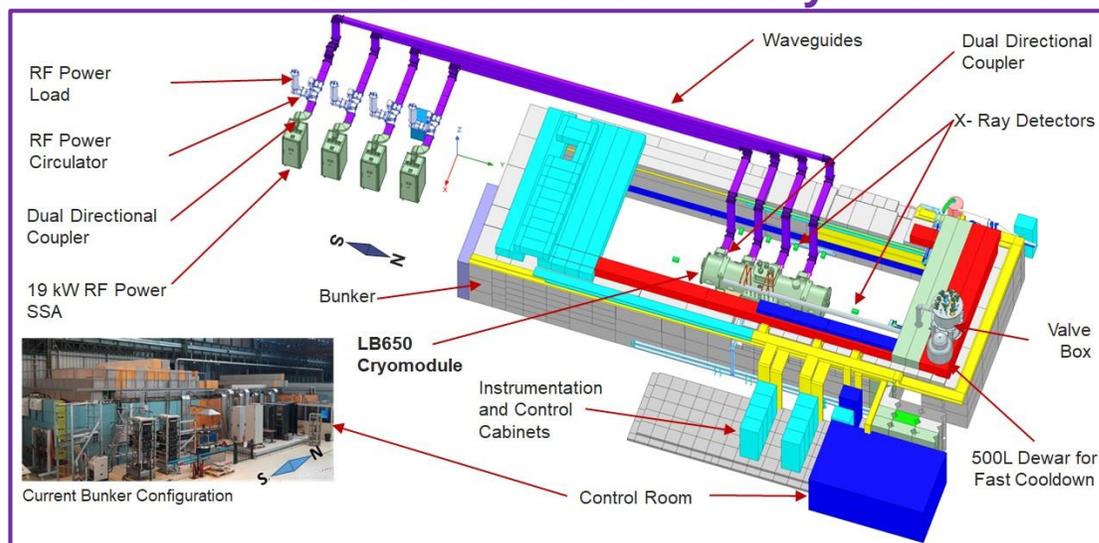


Salle blanches
~300 m²



Préparation chimique
BCP + EPV

Infrastructure de test de cryomodules



Stations de test R&D

2 HPRs



Station d'essais STAARQ (Station de Test pour Aimants d'Accélérateurs Quadrupôles)

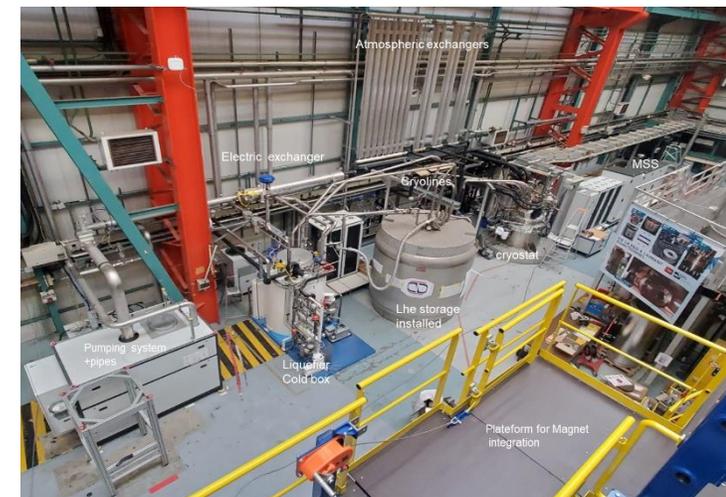
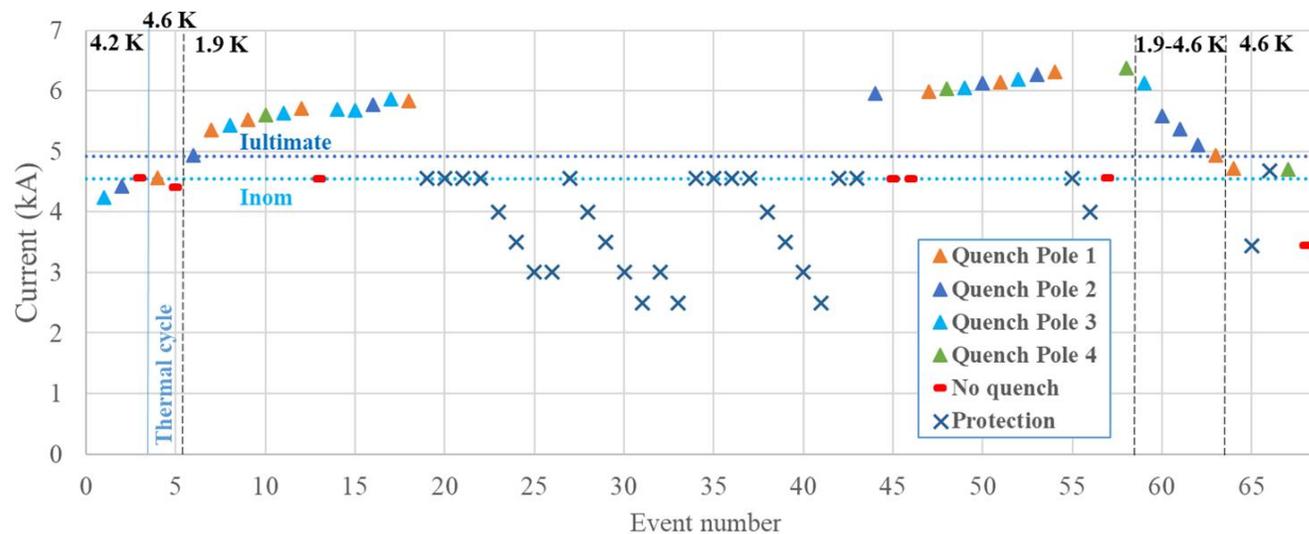


Station conçue pour tester des aimants quadrupôles pour le LHC.

Très bons résultats obtenus en 2024 sur MQYYM:
Cryogénie performante
Aimant a supporté ~60 quench

Main parameters

- Pressurized LHe bath at 1.9K (cryogenic power :45 W)
- I max: 13 kA
- Liquefier: 65 l/h
- Numerical // Analogical MSS
- Weight max magnet: 12 t
- Useful diameter: 640 mm
- Useful Length : 5.2 m

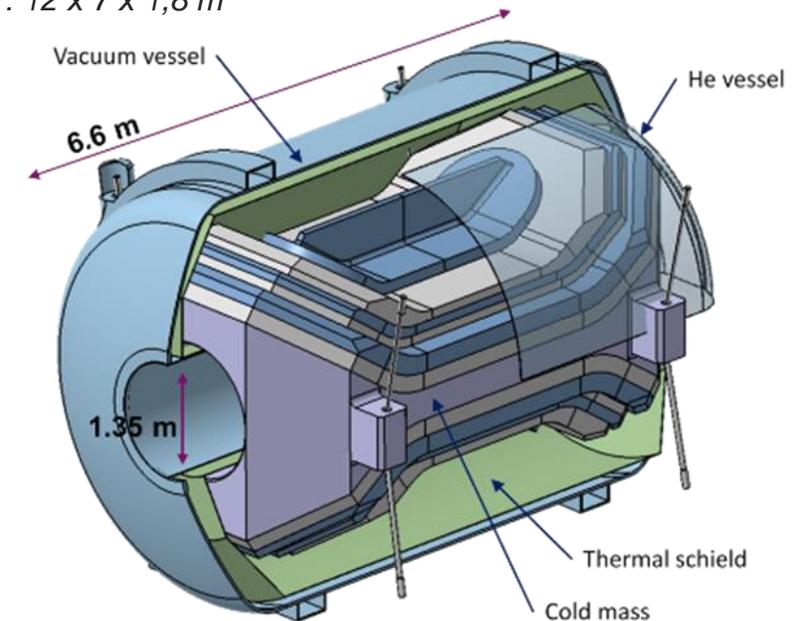


Test de l'aimant MQYYM réalisé de mi juin à mi-juillet 2024

De la station d'essais JT-60SA-CTF à la nouvelle station MATTRICS (MAGnet Technology Testing Research InfrastruCTureS)



Cryostat MATTRICS : 12 x 7 x 1,8 m

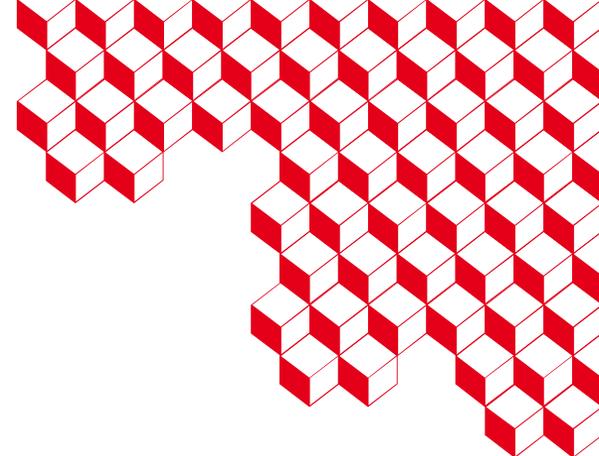


Objectif :

Préparer les tests futurs:

- le détecteur **MADMAX** (« *very large-scale dipole for dark matter experiment* »)
- Conception en cours du Démonstrateur **MACUMBA**
- La faisabilité de démonstrateurs avec des aimants à haute température (HTS) **PEPR Suprafusion**

10 T NbTi coils



**Merci de
votre
attention.**

CEA SACLAY

91191 Gif-sur-Yvette Cedex

France

pierre.vedrine@cea.fr

Téléphone : +33 1 69 08 71 28 +33 1
69 08 71 28