



Rencontres Accélérateurs de la SFP 2022

Développements Accélérateurs au CEA

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

13 septembre 2022

Pierre Vedrine

Sommaire

Programmes en cours

Perspectives

Infrastructures

Conclusions

Programmes en cours



**Défense
et sécurité**
du pays



Énergies nucléaire
et renouvelables

Accélérateurs au CEA

~ 300 FTE



**Recherche
technologique**
pour l'industrie



**Recherche
fondamentale**

9 centres

Cadarache (nucléaire fission, fusion, propulsion, nouvelles technologies de l'énergie)

Cesta (architecture et garantie des têtes nucléaires, Laser Mégajoule)

DAM Île-de-France (physique des armes nucléaires, simulation numérique, lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme, ingénierie, Très Grand Centre de Calcul, Centre d'alerte aux tsunamis)

Gramat (vulnérabilité des systèmes d'armes et efficacité des armements)

Grenoble (nouvelles technologies pour l'énergie, la santé, l'information et la communication, nanosciences, cryogénie, biosciences et biotechnologies)

Le Ripault (matériaux non nucléaires pour la dissuasion, pile à combustible, stockage de l'hydrogène),

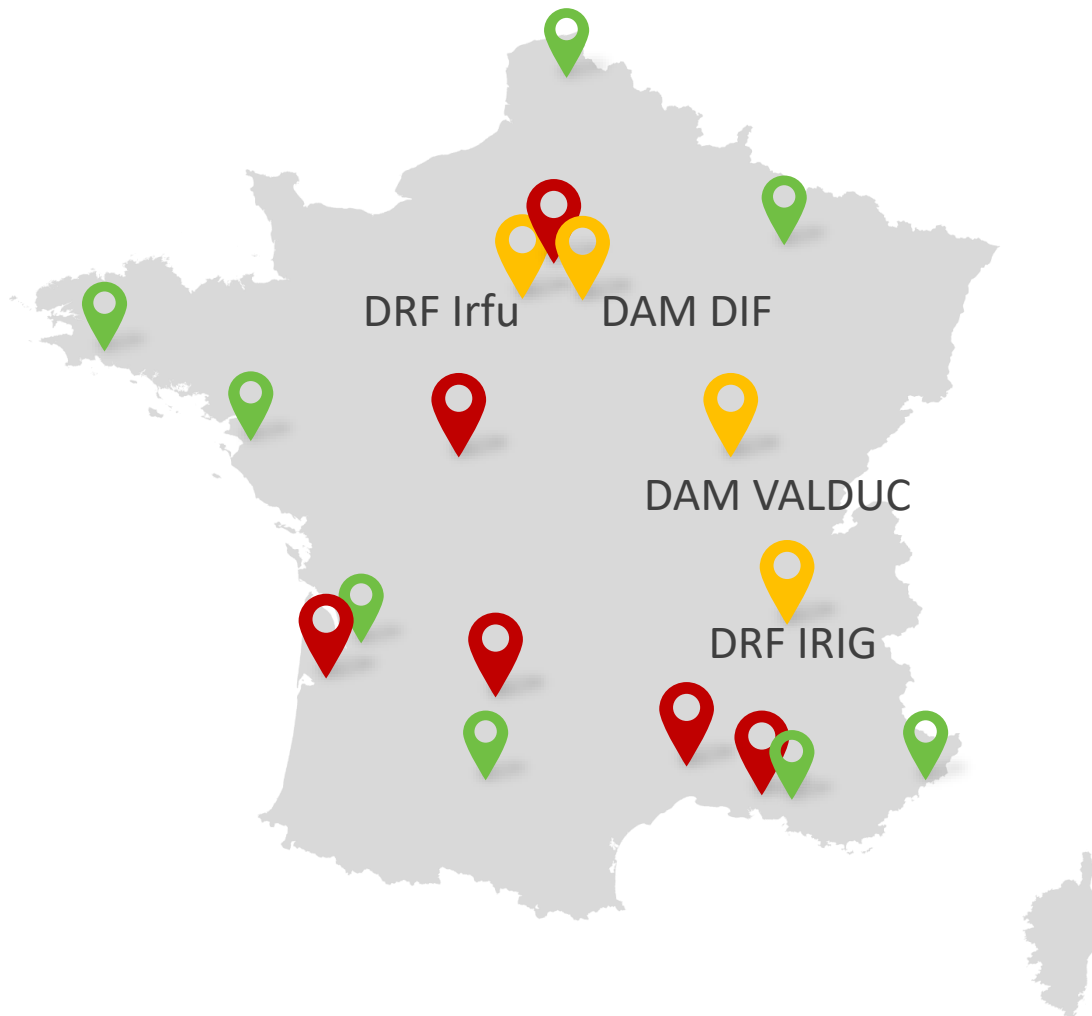
Marcoule (nucléaire : cycle, déchets)

Paris-Saclay (nucléaire, climat et environnement, sciences de la matière, recherche technologique, sciences du vivant et de la santé)

Valduc (matériaux nucléaires pour la dissuasion, installation radiographique Epure)

Des plates-formes régionales de transfert technologique

Nantes-Quimper, Bordeaux, Toulouse, Metz, Lille, Cadarache-Nice



2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030

Systèmes accélérateurs et cryomagnétiques

Accélérateurs haute intensité et haute énergie

FCC, Q/A=1/7, Titan, ESS, DONES, CANS

Systèmes RF supraconducteurs

ESS, Saraf, PIP2, Myrrha, Lucrece, Soleil, CANS, DONES

Aimants supraconducteurs à haut champ

FCC, SuperFRS, iFast...

MadMax, Jmap, EIC, Wave, ...

Fusion, IRM, Avion électrique, Eoliennes, HITTRI+, ...

La ligne "Accélérateurs haute intensité et haute énergie" qui regroupe les développements sur les sources et injecteurs RF "chaud" et toutes les études sur les systèmes accélérateurs linéaires et circulaires présents et futurs (ILC, FCC, Muons, ERL, etc..)

La ligne "Systèmes RF supraconducteurs" qui comprend toutes les cryomodules et les cavités supra... Nous commençons aussi à développer des cryomodules pour aussi des accélérateurs circulaires (Soleil, FCC ee, ILC, etc..) en plus des linéaires..

La ligne "Aimants supraconducteurs à haut champ" qui comprend l'ensemble des aimants haut champ, grande taille, spéciaux, etc

Infrastructures



<https://irfu.cea.fr/dacm/publications/DACM2016%20FR.pdf>

- ▶ **EURATOM : DONES Preparatory Phase**

- ▶ **H2020 - INFRA INNOV-04-2020 Innovation Pilots :**
 - IFAST Innovation Fostering in Accelerator Science and Technology

- ▶ **H2020 - INFRAIA-02 Integrating Activities for Starting Communities**
 - HITTRIplus Heavy Ion Therapy Research Integration plus

- ▶ **H2020 - INFRADEV-03 Long-term sustainability of new research infrastructures :**
 - ISABEL Improving the sustainability of the European Magnetic Field Laboratory

- ▶ **H2020 – INFRADEV-01 Design studies :**
 - SuperEMFL: High Field Magnet 60 T EMFL

 - FCCIS : FCC ee infrastrucutre

► FAIR

- Livraison de la source et de la LBE du proton linac

► ESS

- Livraison du RFQ à Lund, commissioning en cours
- Diagnostics en développement
- Cryomodules : livraison du premier à Lund, intégration en cours des suivants à Saclay



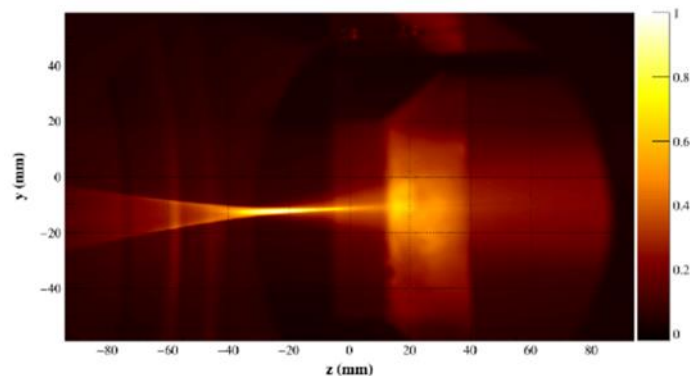
► Saraf : livraison de la ligne de transport de moyenne énergie

providing proton and deuteron beams of variable energy between 5 and 40 MeV with an intensity of up to 5mA for SOREQ in Israel.



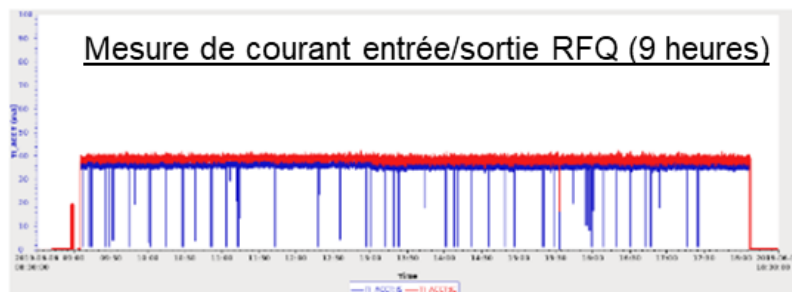
► Ifmif

- Mise en service de la source et de la LBE au Japon
- Commissioning en mode continu

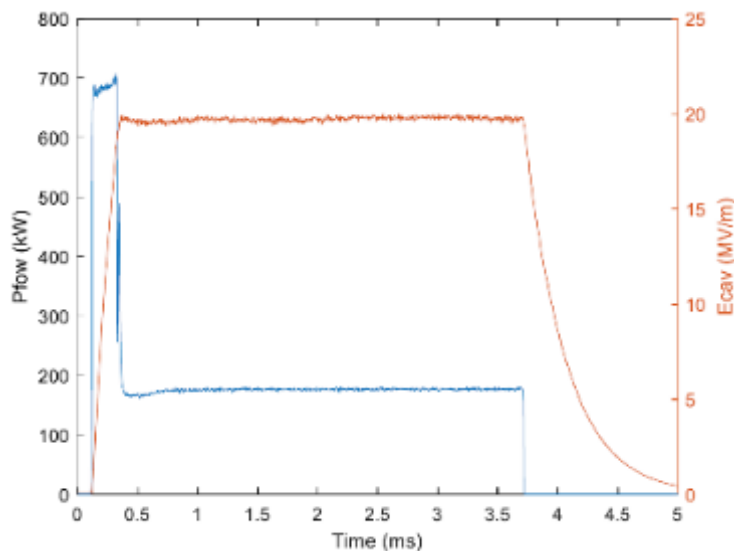


► Iphi 3 MeV 100 mA

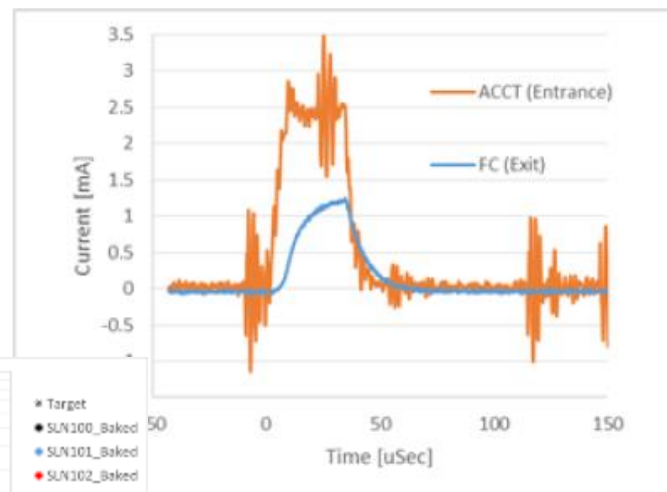
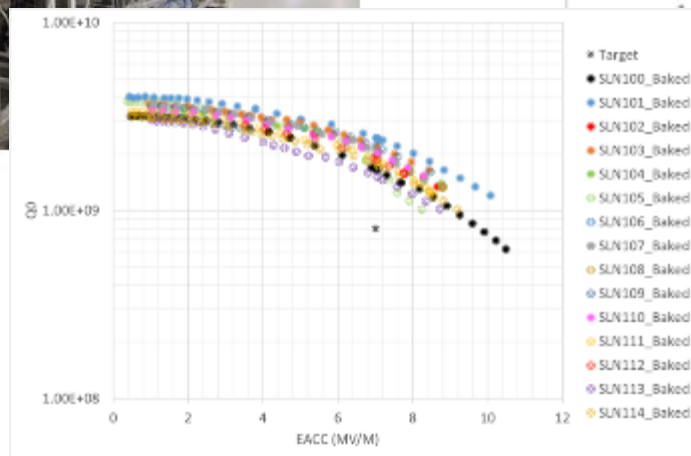
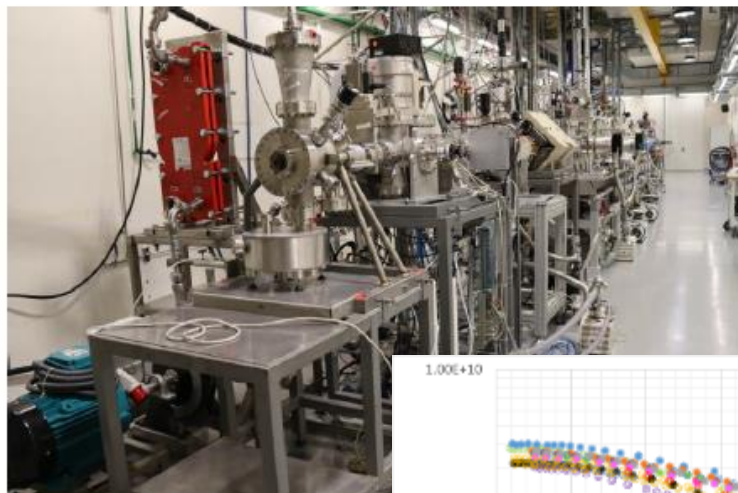
- Faisceau stable avec des cycles utiles allant jusqu'à 50% et courant jusqu'à 50 mA
- Des tests de montée en puissance faisceau ont été effectués jusqu'à 80 kW



- Test RF à Saclay des premiers cryomodules avec des résultats très encourageants :
 - Toutes les cavités ont atteint les spécifications d'accélération
 - L'accord des cavités est très efficace
 - La consommation cryogénique est dans la fourchette attendue

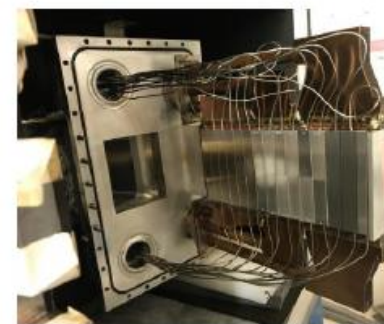
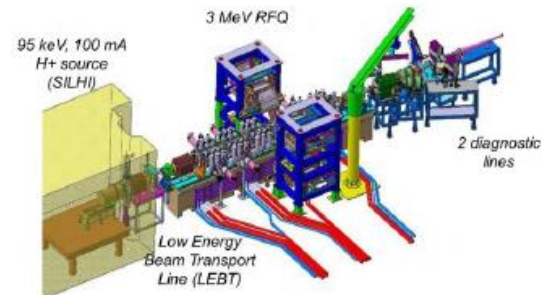


- ▶ Premier faisceau dans la ligne de moyenne énergie (MEBT) , livrée à Soreq
- ▶ Qualification des cavités, préparation de l'intégration du premier cryomodule



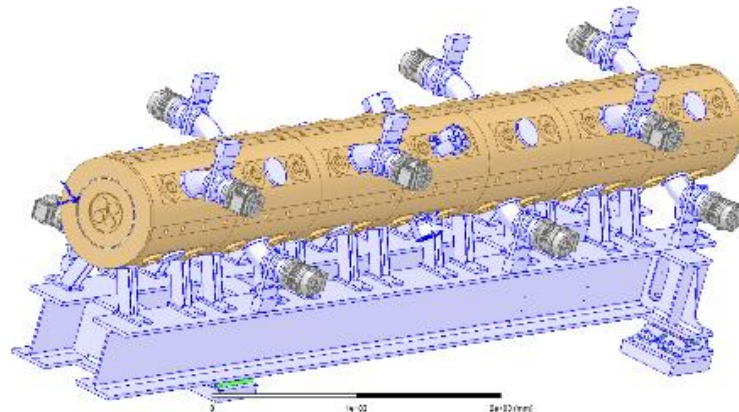
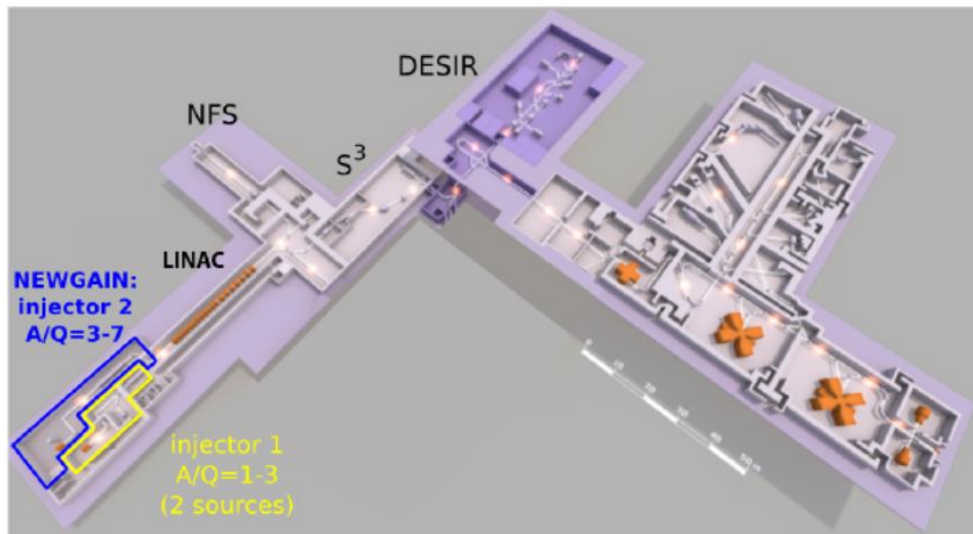
Démonstration de la production de neutrons à partir d'IPHI

- ▶ Jouvence partielle de l'accélérateur
- ▶ Montée en puissance de l'accélérateur (> 30 kW)
- ▶ Tests de cible en Béryllium
- ▶ Première circulation de la boucle de Lithium liquide



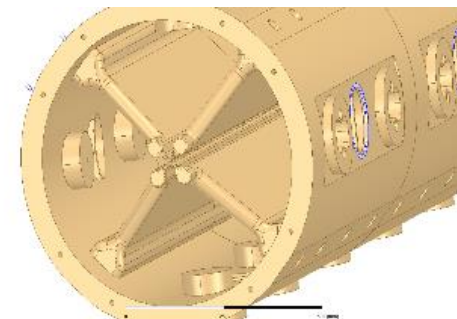
► construction de l'injecteur $A/Q = 7$

- Participation à l'APS/APD : dynamique faisceau, système RF, aimant supra de la source



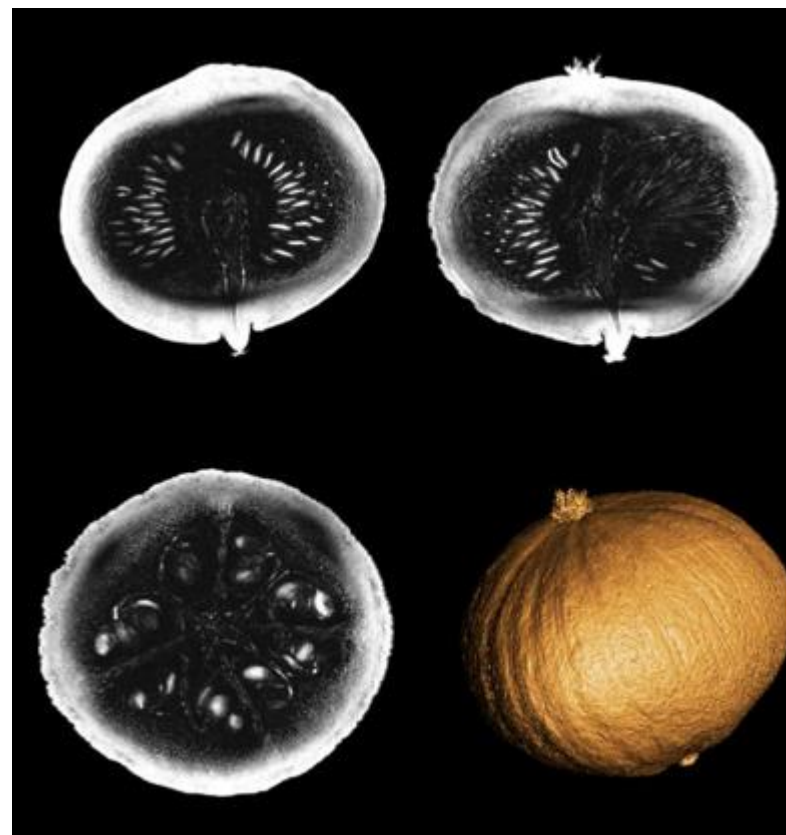
- Etudes conceptuelles RF (V18) et thermomécaniques quasiment finies

- 2022: Mise en plan et appel d'offre pour la fabrication du RFQ





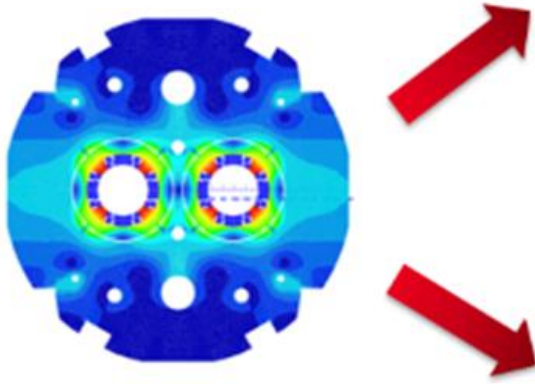
A gauche de la porte le côté patient avec le lit motorisé; à droite l'accès à l'aimant. © F. Rhodes/CEA



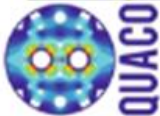
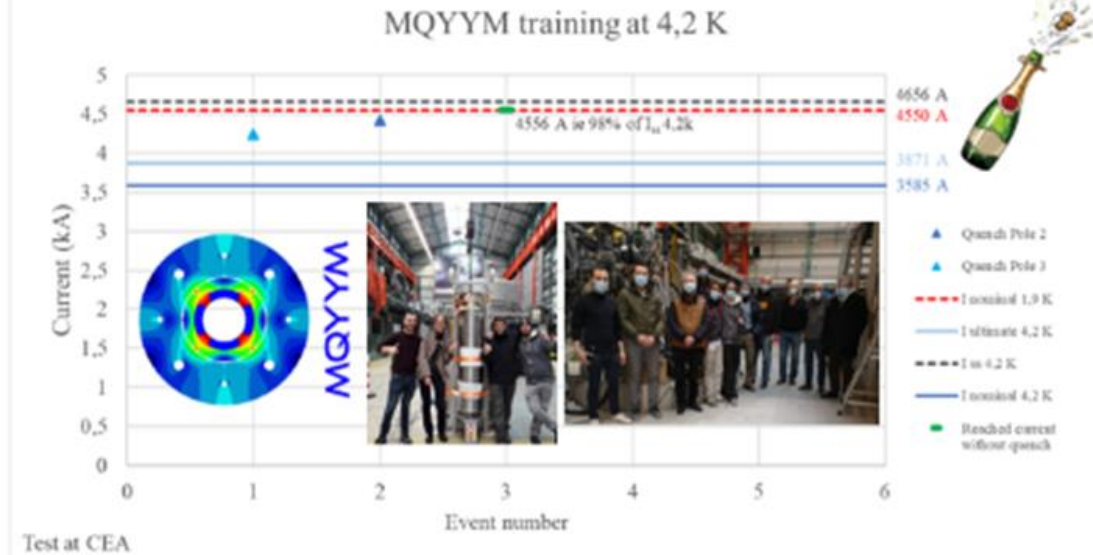
Les premières images du potimarron réalisées à partir de l'IRM 11,7 T du projet Iseult - Résolution de 400 microns

PREMIER TEST RÉUSSI POUR LE QUADRIPOLE D'INSERTION "MQYYM" POUR LE PROJET DE HAUTE LUMINOSITÉ AU LHC

- L'aimant MQYYM a été bobiné à Saclay puis assemblé au CERN par le LEAS
- Tests réalisés au 198 à 4,2 K avec succès en mars 2021
- Prochain test dans STAARQ à 1,9K



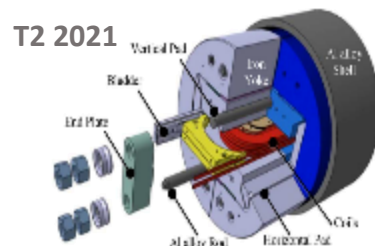
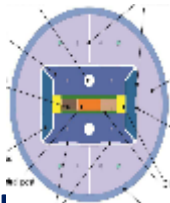
- Après 5 ans de travail avec l'industrie sur le projet européen QUACO, les deux aimants long MQYY ont été mesuré magnétiquement à chaud avec succès au CERN
- Les aimants sont arrivés au CEA pour être testé à froid



SMC 11T (=Short Model Coil)

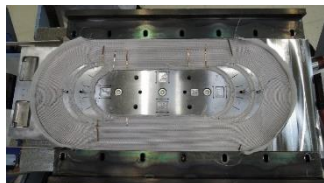
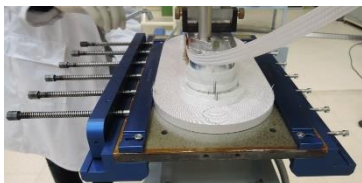
Racetrack coils, 11T-dipole cable

13 T, 15 kA, no aperture

→ **Demonstrate fabrication technology**

**1^{ère} bobine Nb₃Sn réalisée
entièrement à Saclay depuis
le quadrupôle en 2012 !**

Bobinage



Réaction



7 jours de Traitement thermique sous argon :

3 paliers 48 @ 210°C @ 400°C @ 650°C.

(VAMAS et brins pour mesure RRR)

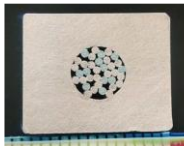
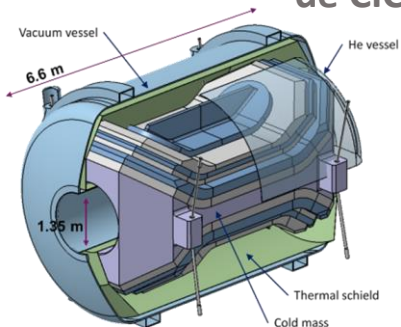
Imprégnation



L'Equipe



► Développement et qualifications d'un nouveau concept de CICC ayant un profilé et un wrapping en cuivre



10 T NbTi coils

► Design, fabrication, intégration et tests de quench de l'aimant prototype MACQU

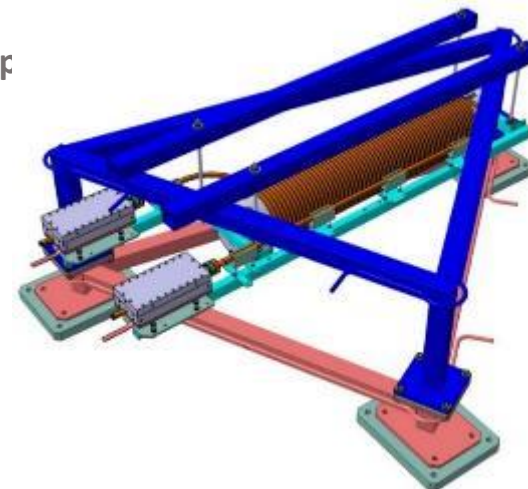
- CICC en cuivre développé et qualifié → 90 m fabriqués et bobinés
- Concept boîtes de jonctions « type W7X » développé et réadapté
- Upgrade station JT-60SA et refroidissement à 1,8 K sans bain uniquement via 8 mm² de CICC

→ Tests réalisés avec succès → Validation conducteur & ρ

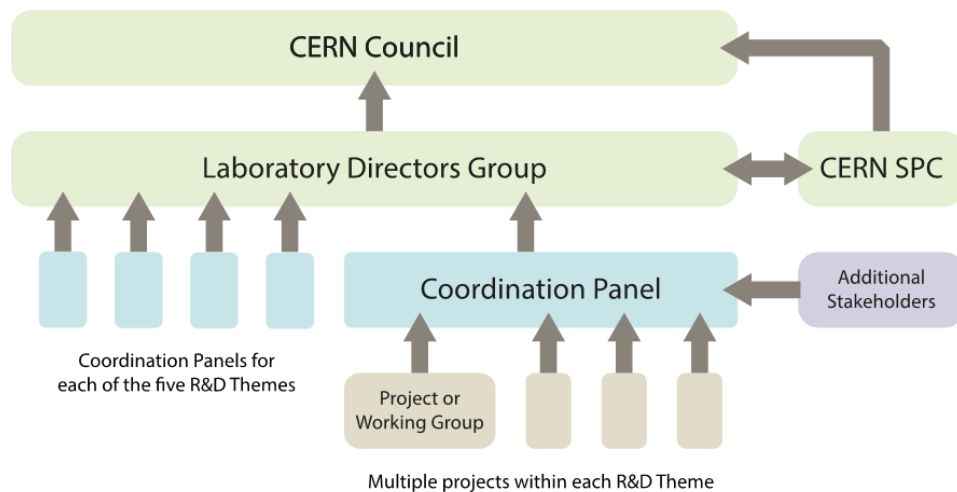
A new QCD Dark Matter Axion Experiment



► Avancement du design détaillé de l'aimant final



- ▶ Aimants haut champ 16 T – 20 T
- ▶ RF Supra
- ▶ Collisionneur à muons
- ▶ Accélération laser plasma
- ▶ ERL



Rapport publié en janvier 2022



Perspectives

► Amélioration des performances:

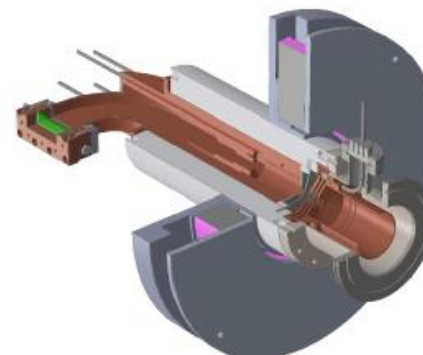
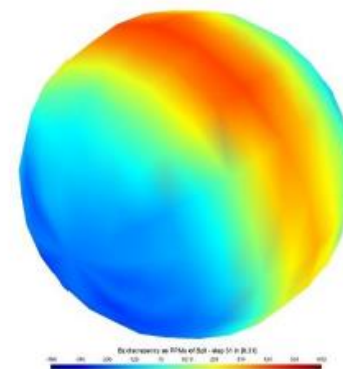
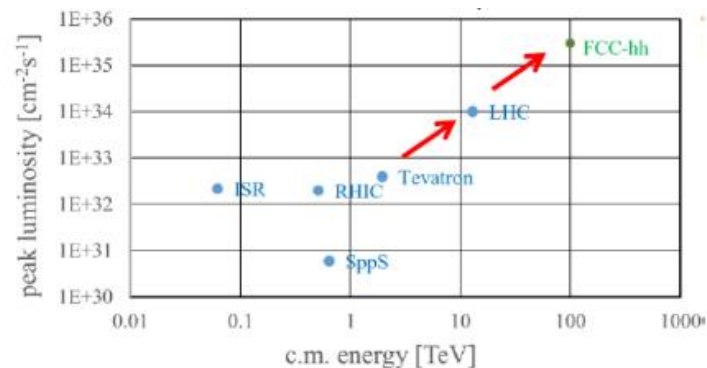
- Gradient accélérateur
- Champ magnétique
- Courant de particules
- Résolution des diagnostics
- ...

► Amélioration de la qualité:

- Homogénéité
- Fiabilité
- Stabilité
- Reproductibilité
- Sécurité
- ...

► Réduction des coûts:

- Coûts de réalisation
- Coût d'opération
- Temps de calcul
- Compacité
- Accessibilité (autonomie...)
- Empreinte écologique
- ...



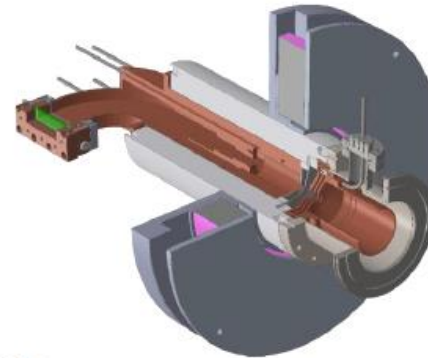
► Sources de type ALISES:

- compacité (source et environnement)
- maintenabilité
- réduction des coûts

► Financement interne

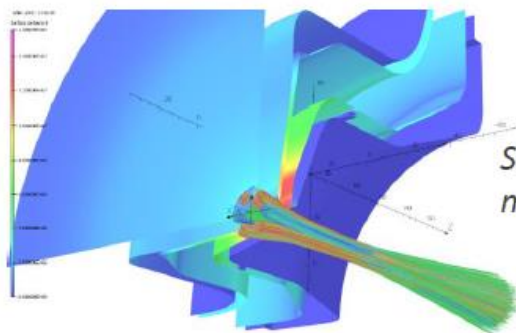
► En 2021, démonstration du fonctionnement:

- Mode pulsé: 42 mA @ 78 kV
- Fonctionnement en mode continu: 40 mA @ 45 kV, fonctionnement sans arrêt pendant plusieurs jours
- Tension limitée par céramique d'isolation → en cours de correction

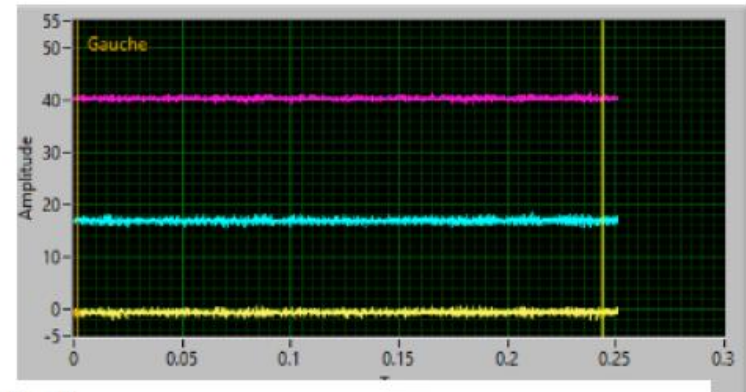


► Perspectives:

- Sources ~ 200 mA (PACIFICS + DONES)



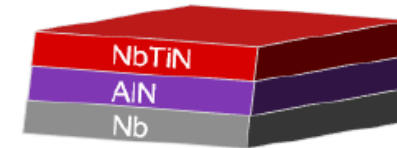
Simulation extraction multi-trous



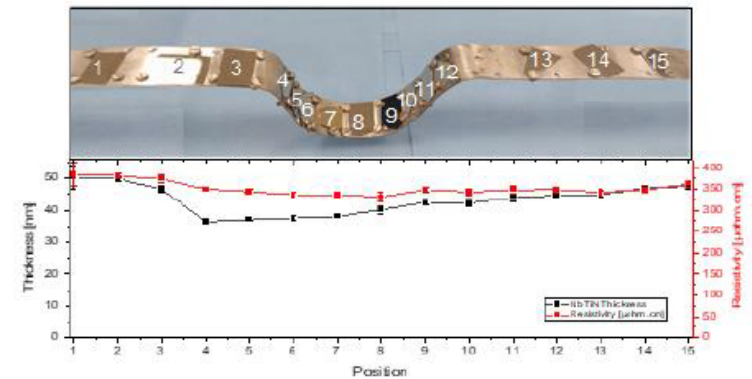
Sept 2021:
faisceau de 40 mA @ 45 kV (18 mA sur bloc d'arrêt)

► Amélioration des performances de supraconducteurs sous champs intenses

- Démonstration de l'homogénéité des dépôts multicouches sur une cavité test. Dépôts ALD, traitement thermique et tests RF sur une cavité en Niobium
- Financements DACM, CEA, ARIES / I-FAST
- Partenaires IJCLab, INFN, HZB, STFC

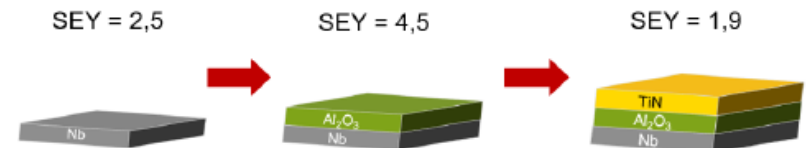


Test 2 : purge 20s



► Optimisation du coefficient d'émission secondaire

- Démonstration de faisabilité sur des échantillons en Si avec dépôts ALD d' Al_2O_3 et de TiN. Soumission d'un brevet.
- Partenariat ONERA

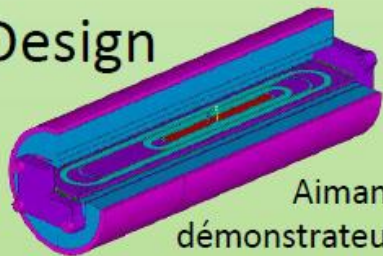


Nano Hétéro-structures pour l'amélioration des performances des cavités Radio-fréquence sous champs intenses

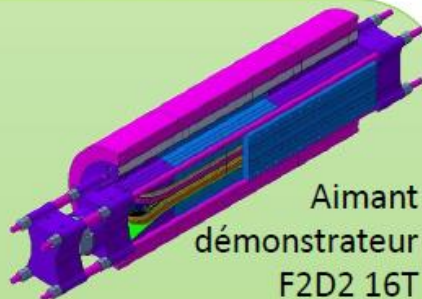
Voir exposé Yasmine Kalboussi

- Objectifs:**
- Proposer de nouveaux concepts de design
 - Etudier les matériaux pour les futurs aimants d'accélérateurs

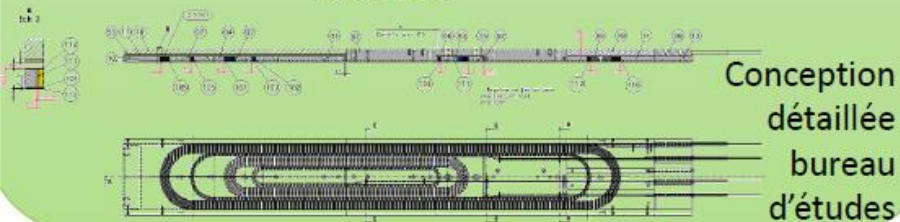
Design



Aimant démonstrateur R2D2 12T

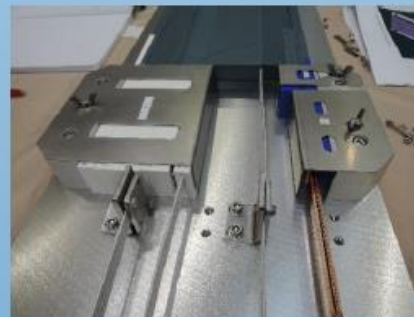


Aimant démonstrateur F2D2 16T

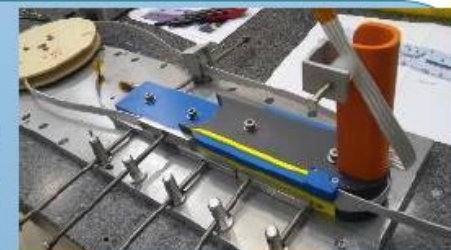


Conception détaillée bureau d'études

Méthodes



Maquette de jonctions externes

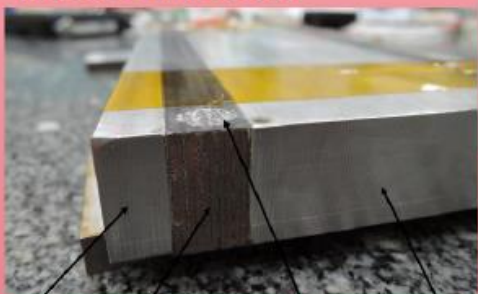


Maquettes de bobinage



Contraction des bobines pendant le traitement thermique

Matériaux



Rail inox Empilement de 5 conducteurs Défaut d'imprégnation Bloc central

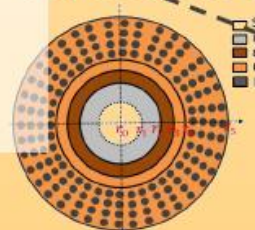
Comportement mécanique de sections de bobines

Cf thèse M. Abdel Hafiz

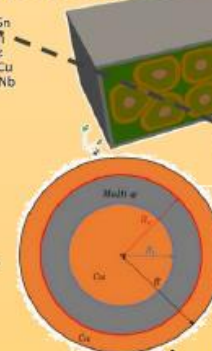


Comportement thermo-mécanique durant le traitement thermique

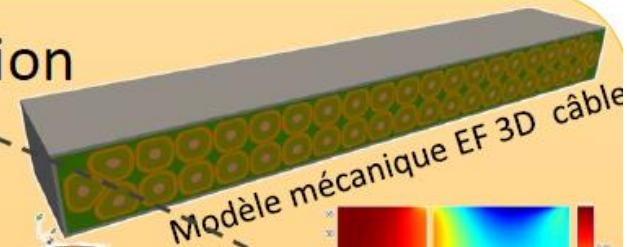
Modélisation



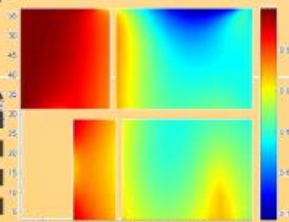
Modèle métallurgique DF sous-élément Nb_3Sn



Modèle thermo-mécanique DF brin Nb_3Sn



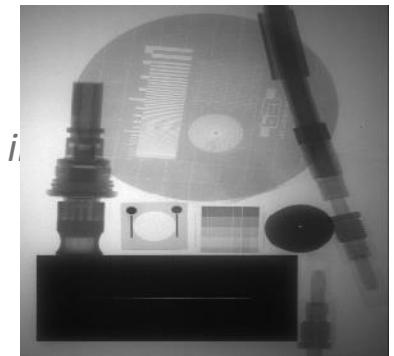
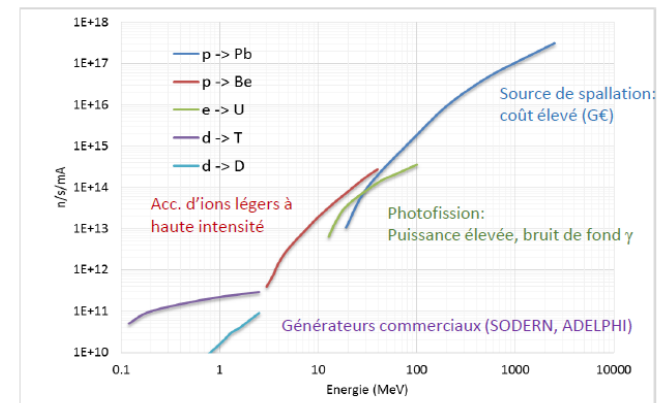
Modèle mécanique EF 3D câble



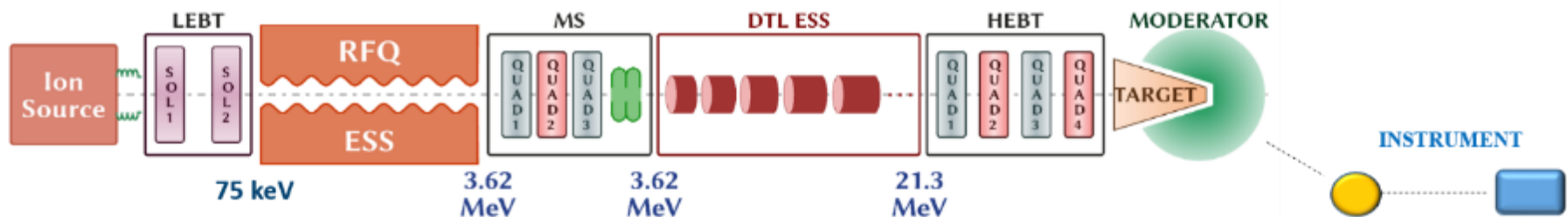
Dégradation bobine sous contrainte

► **Projet Iphi-neutrons (collaboration avec l'Iramis) :**

- faisabilité d'une source compacte de neutrons auprès de l'accélérateur IPHI avec une option de cible solide en AlBeMet
- Avancées majeures:
 - *Calage des simulations*
 - *Démonstration du fonctionnement de la cible jusqu'à 6 kW*
 - *Démonstration de la stabilité sur une période supérieure à 100 h*
 - *Réalisation d'un premier cliché de neutronographie avec une plaque i...*

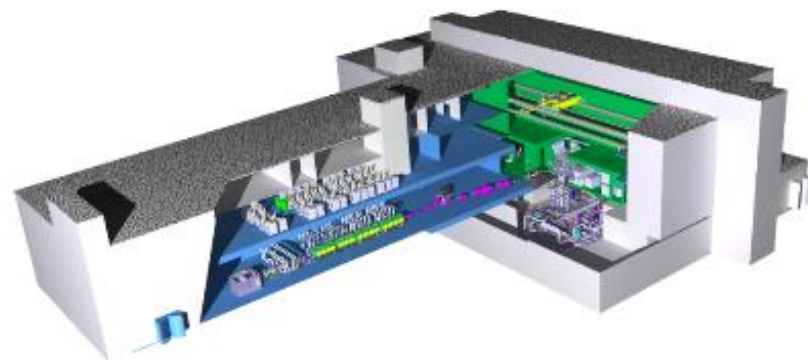
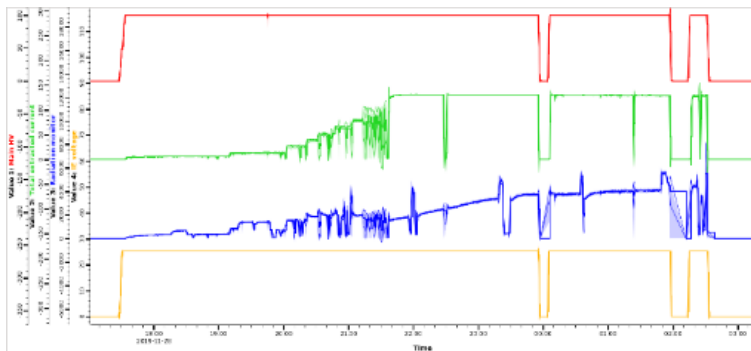


► **A plus long terme, réflexion pour une installation pour les besoins académiques, SONATE**



► Pour la fusion :

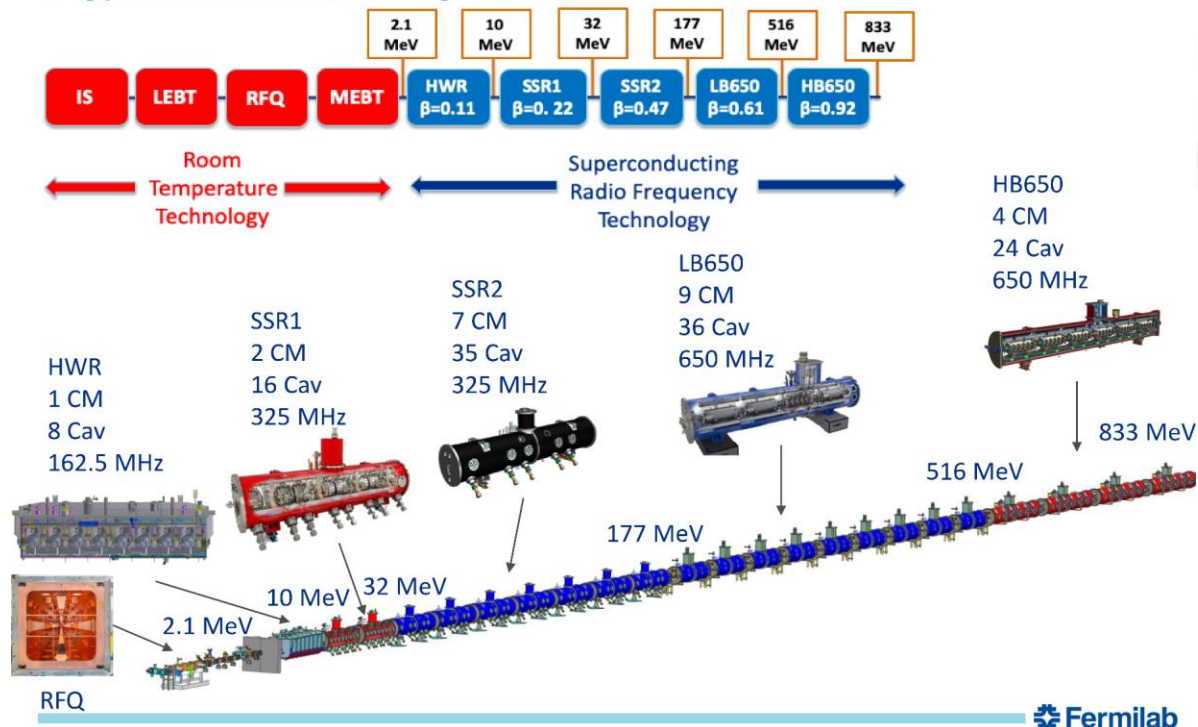
- Ifmif : le commissioning se poursuit, fabrication du cryomodule
- Dones : phase préparatoire de design



► Contribution in-kind MESRI à l'accélérateur PIP II

- Production des 9 + 2 cryomodules LB650, tests RF
- Une contribution majeure à cet accélérateur pour la physique des particules, dans la continuité du savoir-faire développé pour XFEL, ESS

5 Types of Cavities, 23 Cryomodules, 119 Cavities



HB650
4 CM
24 Cav
650 MHz

833 MeV

516 MeV

177 MeV

32 MeV

10 MeV

RFQ

▶ **FCC e-e**

- Participation à la nouvelle design study FCC - IS
- Design du booster

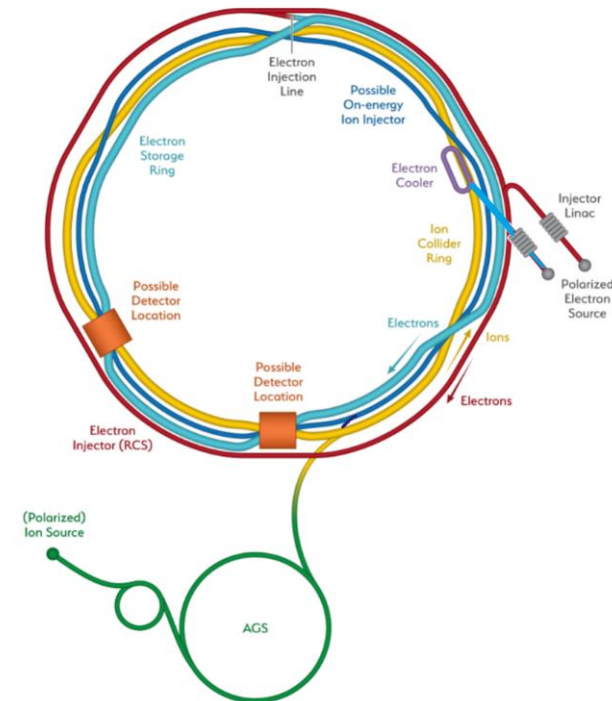
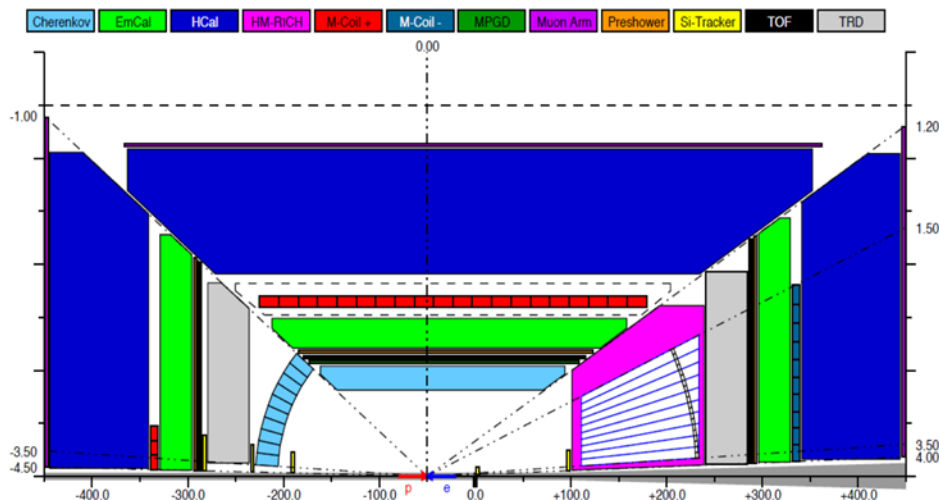
▶ **Soleil**

- Discussion pour la réalisation de cavités harmoniques avec le CERN et Soleil.
- Participation à l'APD de l'upgrade

▶ **Prospective Laser Plasma**

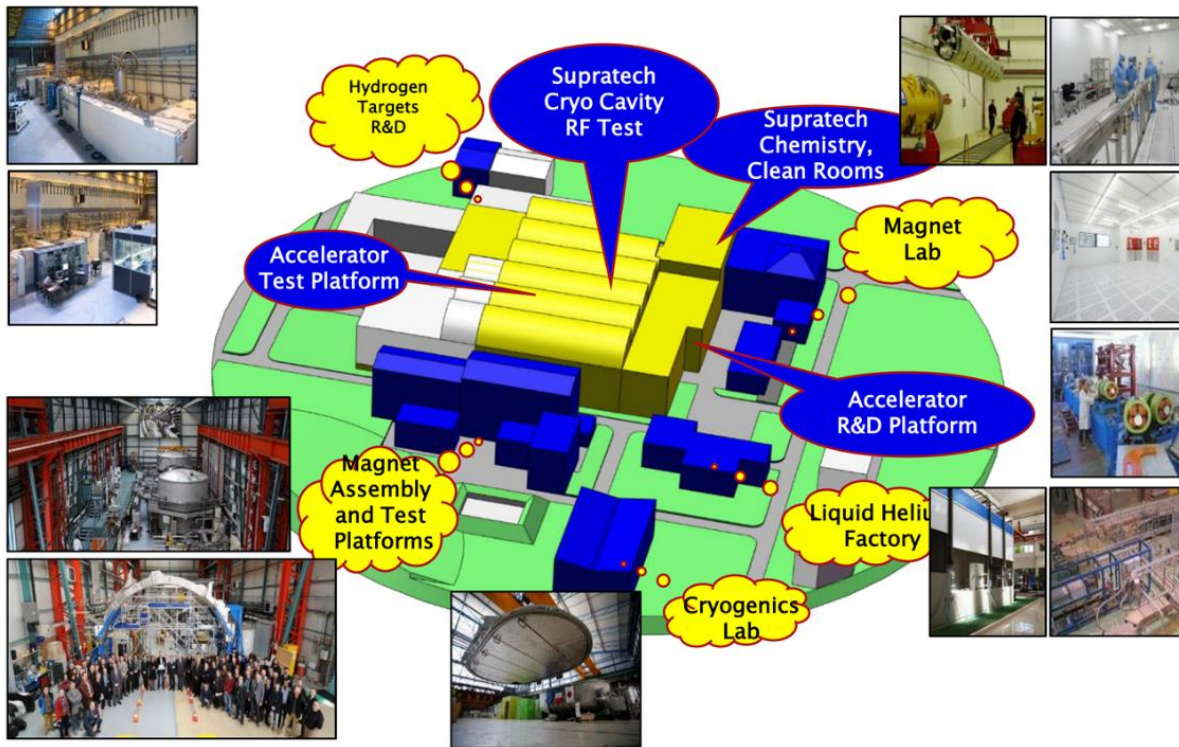
- Membre de la collaboration Eupraxia : études de dynamique faisceau
- Participation GDR Appel
- Collaboration sur Awake : participation aux études d'un injecteur laser-plasma

- Projet approuvé (CD0) par le DOE fin 2019 consacré à l'étude de l'interaction forte via des collisions électrons/ions
- Site : Brookhaven
- Participation à l'APS/APD du solénoïde Supraconducteur du détecteur:

S  RATE

Infrastructures

Equipment for development, integration and testing: manufacturing and assembly platforms, clean rooms, small-scale test stations for materials characterisation and large-scale test stations (coils, superconducting cavities and injectors)



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

The **Synergium Technology Infrastructure** is the **basement** of future large-scale accelerator and SC magnet projects, also covering activities for societal applications.

from *Design* to *Construction* and *Operation*

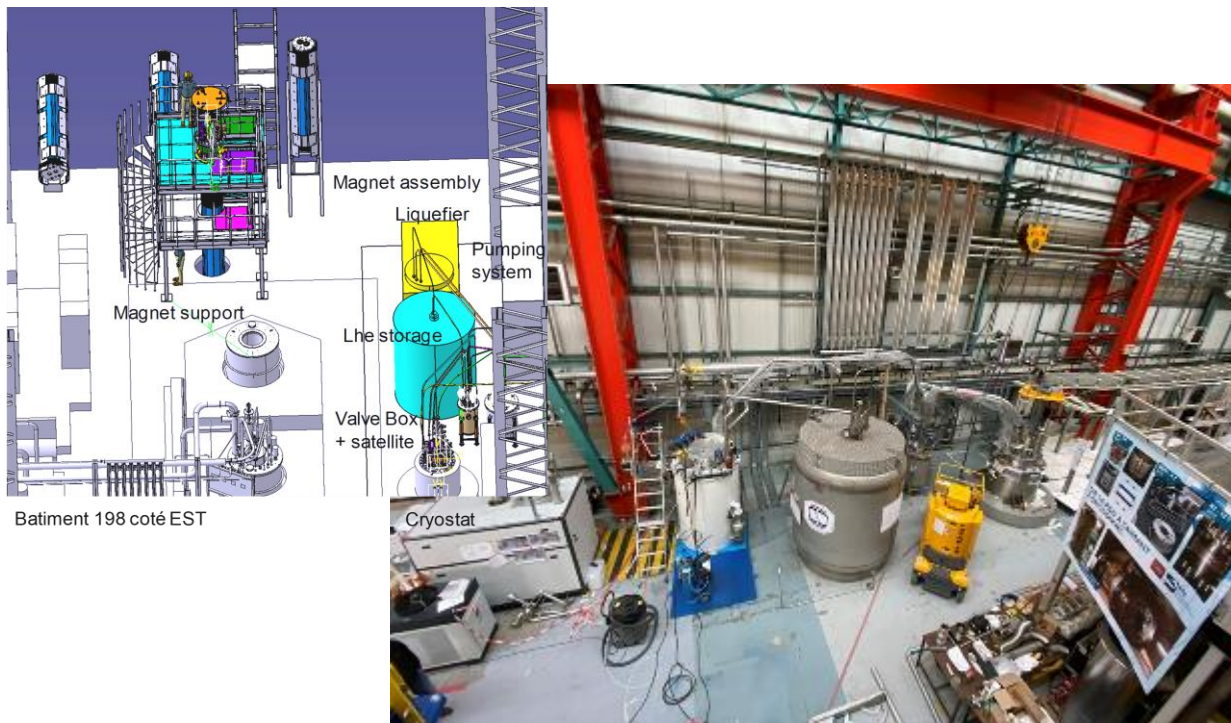
R&D → Prototyping → Assembly → Verification → Installation → Support



It spans the whole **TRL spectrum**, from R&D to fabrication, with an emphasis on the **Preparation** and **Construction** phases, corresponding to **Prototyping (3-5)** and **Industrial Production (>5)** of components.

- Développer nos laboratoires avec de nouveaux équipements pour les activités de R&D – **Pacifics**
- Augmenter nos capacités à fabriquer et à tester des aimants pour les projets d'accélérateurs et les futurs détecteurs **Pacifics, Staarg**
- Adapter notre infrastructure pour tester les cavités, les coupleurs et les cryomodules en mode continu (PIP2) **Supratech**
- Adaptez nos installations de réalisation, de traitement et de caractérisations pour les cavités SC – **Pacifics**
- Transfert de la station JT 60 du bat 216 au bat 198 **Madmax**
- **Ouverture à l'extérieur (Amici, Ifast, Eurolabs, ...)**

- **Objectif:** Training et caractérisations magnétiques des aimants d'accélérateurs à partir de 2022
- **Conditions fonctionnement:** Aimant @ T° 1,9 K, Pressurisé (1 bar) Mesures magnétiques @ 300 K (avec anti cryostat)



- Enlèvement de la station W7-X
- Transfert cryostat JT60 + Satellite

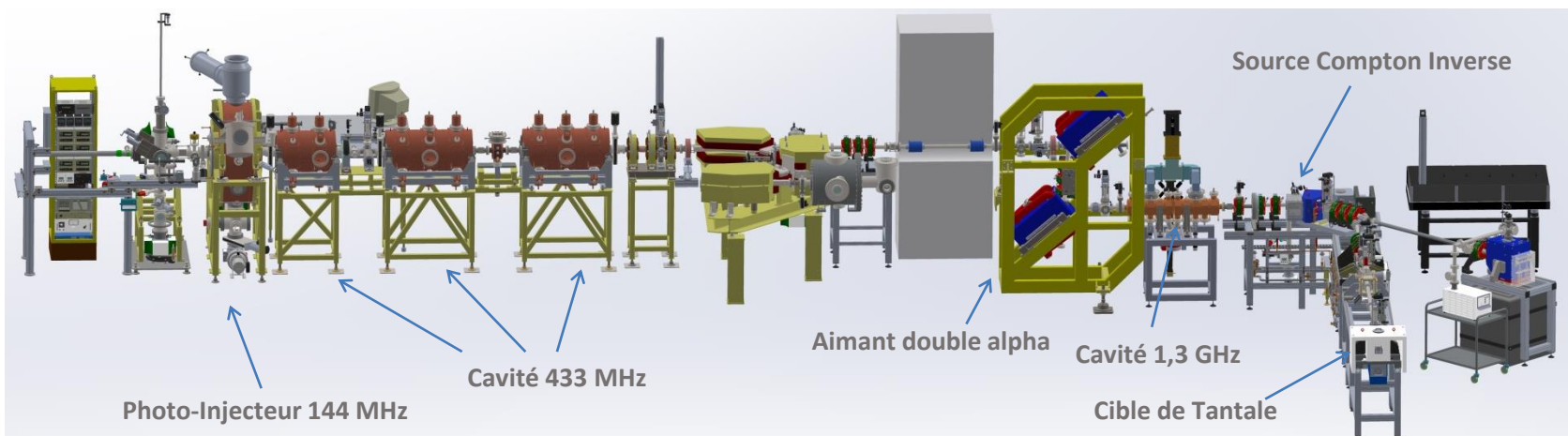


EPURE : Expérience de physique utilisant la radiographie éclair

► Radiographie Eclair 3 axes (3 machines)

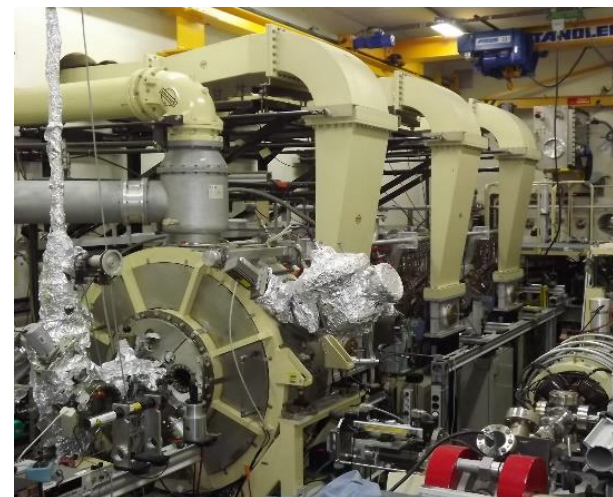
- **Application** : Radiographie d'objets denses en évolution rapide, de dimension centimétrique
- **Axes 1 et 3** : Accélérateurs à induction 64 cellules + focalisation cible Tantale
- 60 ns, 20 MeV, 2 kA (!!!)
Conception et réalisation CEA
- **Axe 1** mise en service en 2014
- **Axe 2** : Générateur X type IVA (Inductive Voltage Adder) : Conception et réalisation UK. Mise en service 2022
- **Axe 3** mise en service en 2022
- Intérêt 3 axes : Etudes 3D.





► Accélérateur d'électrons RF 30 MeV avec photo-injecteur situé au CEA DAM à Bruyères-Le-Châtel -

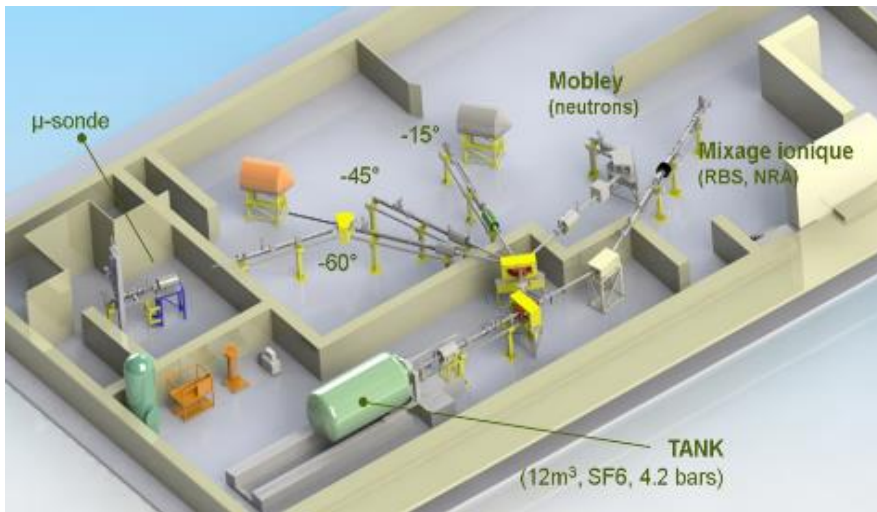
- Electrons
 - 17 MeV 30 mA 200 μ s 1 Hz (typ.) – durée paquets 10-100 ps
 - Mode fort courant : 30 MeV 400 mA 2 μ s 10 Hz
- Deux lignes de faisceau:
 - Rayonnement de freinage sur une cible de tantale @ 17 MeV
 - Rayonnement Compton inverse @ 30 MeV
- Applications principales : Tests de détecteurs X (programmes EPURE et LMJ), étude de comportement sous irradiation.



► Accélérateur 4MV – Van de Graaf

Faisceau d'ions protons, deutons et alphas

- $\sim 10 \mu\text{A}$
- Ligne mixage ionique : analyse de matériaux par faisceau d'ions
- Ligne Mobley : expériences de neutronique (neutrons monocinétiques 20 keV – 20 MeV) pour étude et étalonnage de détecteurs



► Accélérateur TANDEM 7 MV – NENUPHAR

(NEutrons Utiles pour la Physique des Armes) – Mise en service en 1964. Arrêté en 2007. Remise en service en 2021

- Faisceaux d'ions proton et deuton 14 MeV $\sim 10 \mu\text{A}$
- Production de neutrons monocinétiques
- Source d'ions lourds et Helium prévue pour 2023 + Nouvelle ligne 2024
- Objectif : Programmes de physique nucléaire – fourniture de données nucléaires



Conclusions

Solide portfolio de projets jusqu'à l'horizon 2026

Forte inscription et visibilité dans le paysage international

Renouvellement de la R&D

Dynamisme et rajeunissement des équipes

Pérennisation et jouvence des infrastructures et des plates-formes techniques

Notre horizon est celui du FCC ...2060-70 !!