

# **Rencontres Accélérateurs de la SFP 2024**

## **Développements Accélérateurs au CEA**

15 octobre 2024

J. Schwindling

IRFU/DACM

# Le CEA



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

# Feuille de route accélérateurs et cryotechnologies

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, ESS, DONES, ICONE, CANS

Systèmes RF supraconducteurs

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

Aimants supraconducteurs à haut champ

FCC, SuperFRS, iFast...

MadMax, Jmap, EIC, Wave, ...

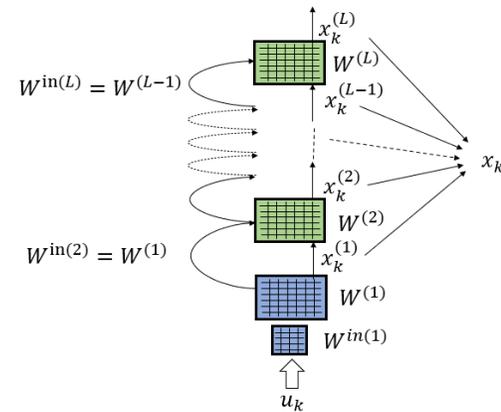
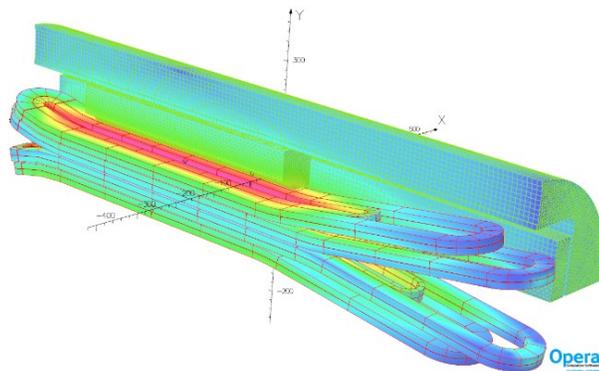
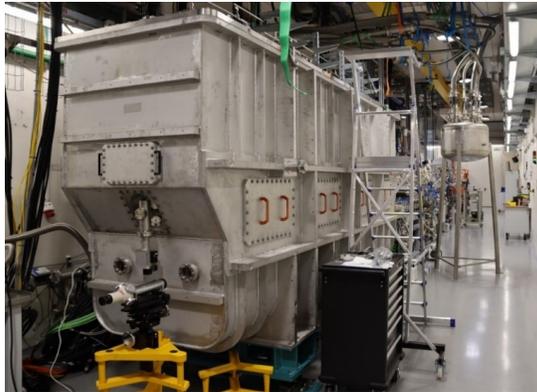
Fusion, IRM, Avion électrique, Eoliennes, HITTRI+, ...



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

# Sommaire

1. Réalisations et faits marquants 2023 – 2024
2. Perspectives
3. R&D
4. Infrastructures



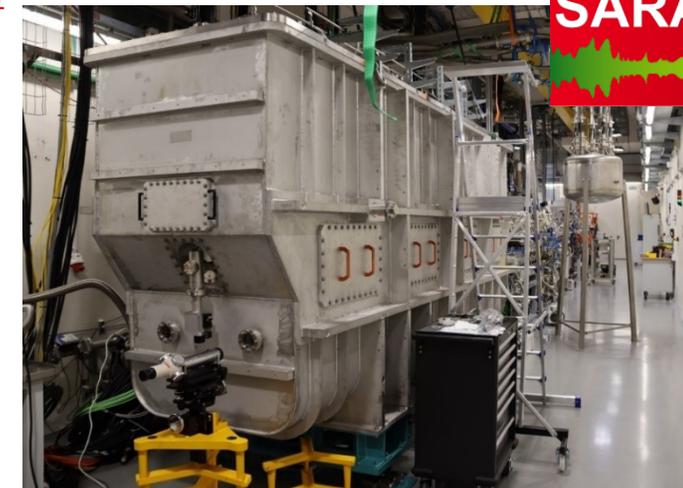


# **1 Réalisations et faits ■ marquants**

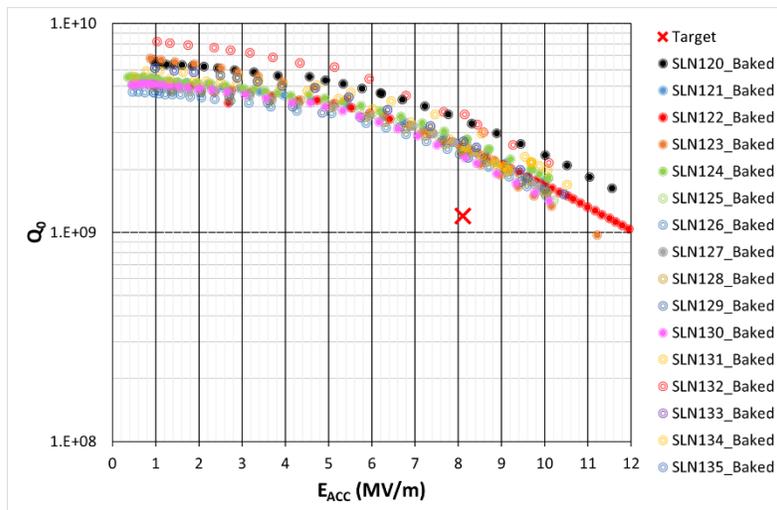
# SARAF: intégration et test des cryomodules

[https://indico.ijclab.in2p3.fr/event/9312/contributions/30953/attachments/21797/30982/Roscoff\\_SARAF\\_vf.pdf](https://indico.ijclab.in2p3.fr/event/9312/contributions/30953/attachments/21797/30982/Roscoff_SARAF_vf.pdf)

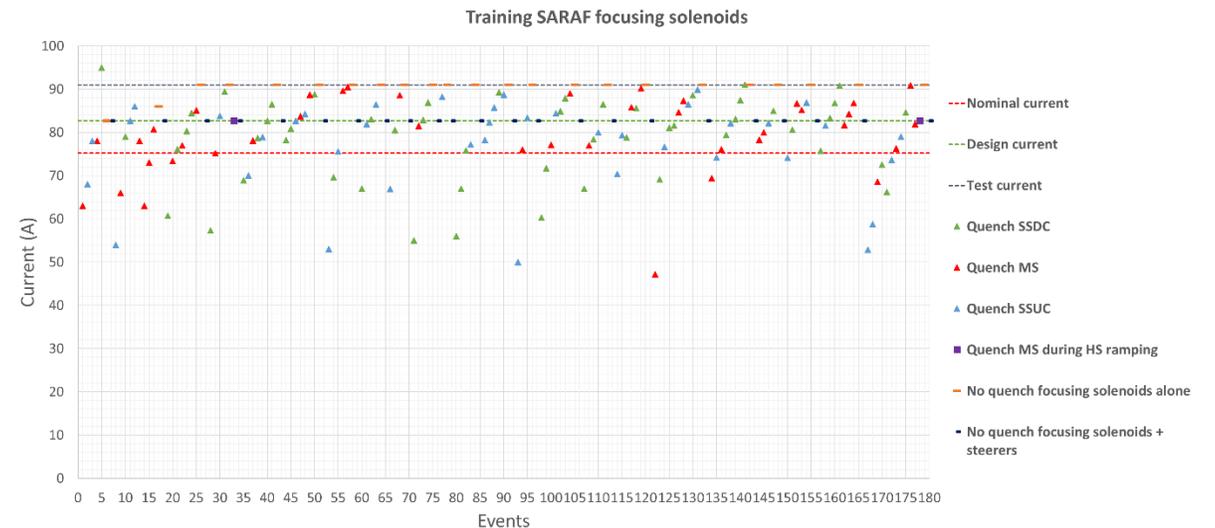
- Fin de l'intégration et des tests des 4 cryomodules à Saclay
- CM1 livré en juin 2023 à SOREQ et installé sur le linac
- CM2-4 seront expédiés dans les prochains mois
- Premiers faisceaux dans CM1 fin 2024



CM1 installé après la MEBT à SOREQ



Performances des 16 cavités Haut Beta



Les 23 solénoïdes supraconducteurs ont atteint le courant et champ nominal en 6 – 7 quenches

- Poursuite de l'assemblage et de la livraison des cryomodules:
  - Septembre 2024: 25 CM livrés, 15 testés, 14 acceptés et installés
  - ESS dispose des cryomodules pour la phase de démarrage à 2 MW

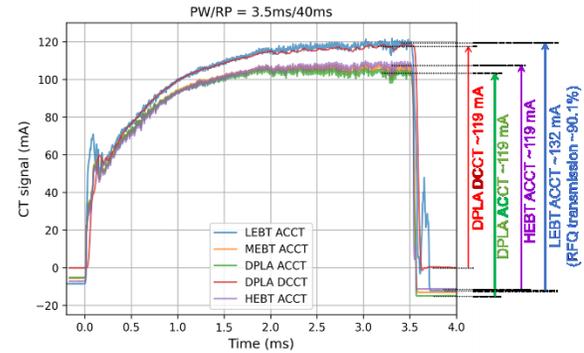
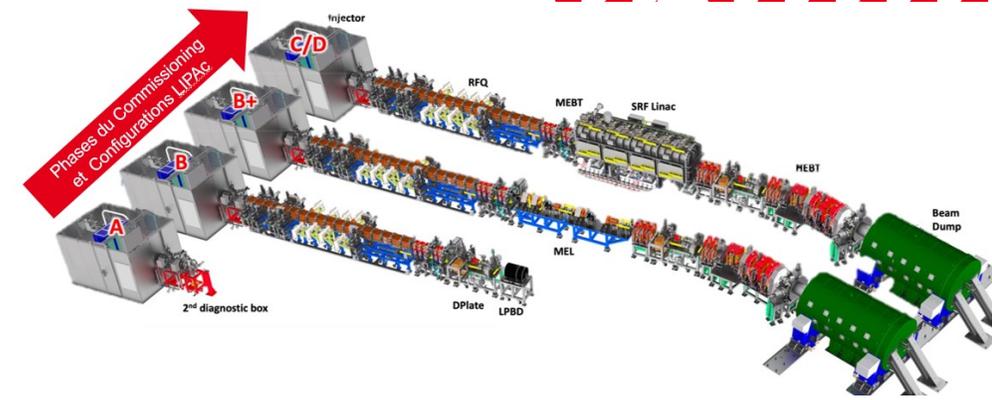


Cryomodule installé dans le linac

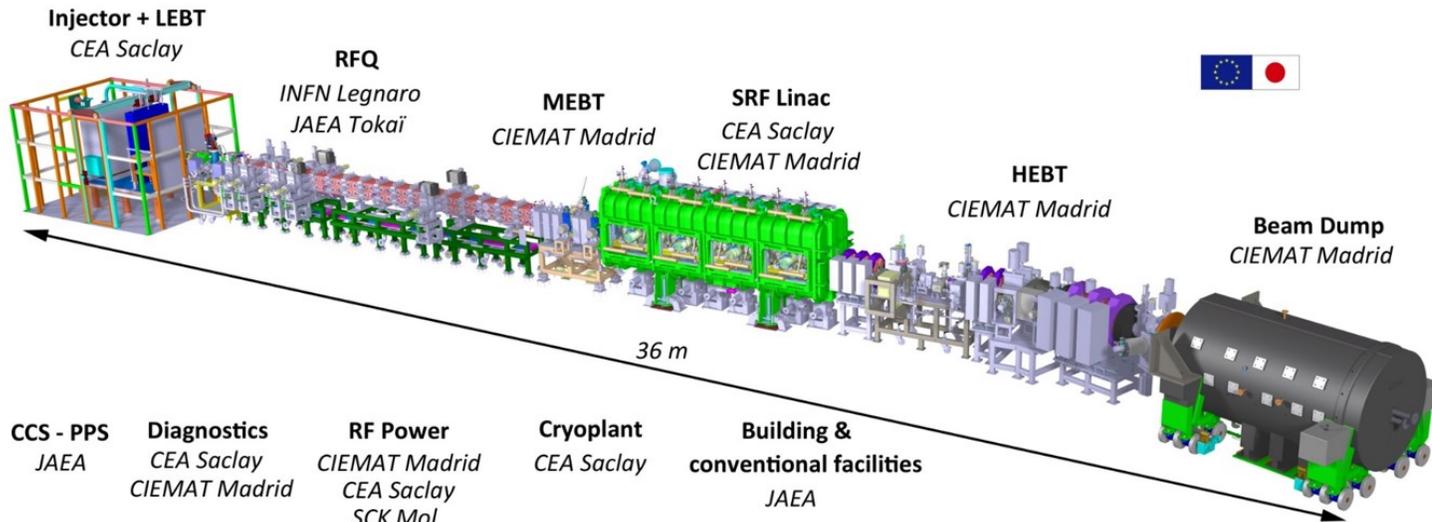
Cryomodule	Assembly	Delivery	Test at Lund	LINAC
CM01	Finished	22/09/20	Validated in Aug-21	
CM02	See CM2-1	dismounted		
CM03	Finished	29/06/21	Validated in Nov-21	
CM04	Finished	28/09/21	Validated in Jun-22	
CM05	Finished	19/10/21	Validated in Mar-22	
CM06	Finished	02/11/21	Validated in Aug-22	
CM07	Finished	08/03/22	Validated in Sep-22	
CM02-1	Finished	28/06/22	Validated in Apr-23	
CM31	Finished	31/05/22	Validated in Nov-22	
CM32	Quarantine	14/06/22	leak at cold	
CM33	Finished	25/10/22	Validated in Jul-23	
CM34	Finished	05/12/23		
CM35	Finished	dismounted		
CM36	Finished	08/11/22	Validated in Sept-23	
CM37	Finished	29/11/22	Validated in Dec-23	
CM38	Finished	10/01/23	Validated in Nov-23	
CM39	Finished	20/03/23		
CM41	Finished	18/04/23		
CM42	Finished	19/06/23		
CM43	Finished	29/08/23		
CM08	Finished	19/03/24	Validated in jun-24	
CM44	Finished	23/01/24		
CM46	Finished	20/02/24		
CM09	Finished	27/02/24	Validated in Mar-24	
CM47	Finished	23/04/24		
CM45-1	Finished	21/05/24		
CM48	Finished	03/09/24		
CM49	Finished	17/09/24		
CM40	repair in progr	09/07/24	leak on thermal shield to be fixed	
CM50	03/07/24	22/10/24		
CM51	05/06/25	08/10/25		
CM52 (35bis)	09/10/25	11/02/26		
CM10	12/02/26	17/06/26		

Planning d'assemblage et de livraison des cryomodules ESS

- ❑ LIPAc : accélérateur prototype installé à Rokkasho (Japon)
- ❑ Cadre : Projet IFMIF/EVEDA de l'Approche Elargie à Iter
- ❑ Objectif : Validation du concept IFMIF / DONES
- ❑ Performances : 125 mA de deutons ;  $P > 1$  MW ; CW



**Résultats Phase B+ (26/06/2024) :**  
 D+ : 119 mA dans Beam Dump  
 E(D+) = 5 MeV ; Cycle Utile : 8.75%



**Objectif 2026 Phase D**  
 D+ : 125 mA dans BD  
 E(D+) = 9 MeV - Cycle Utile : 100%  
 (assemblage SRF-Linac en cours)



# Election Ion Collider (EIC), Brookhaven

## ePIC Magnet MARCO

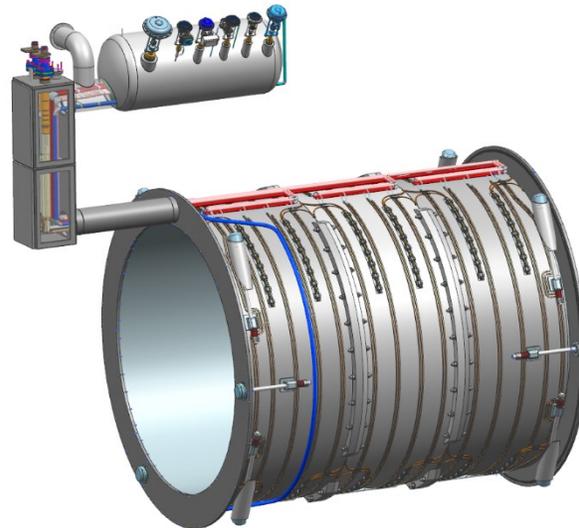
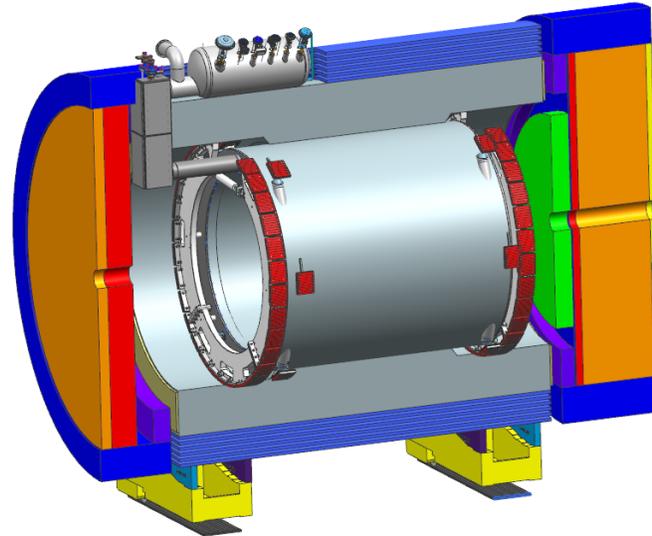
*IR6 : ePIC Detector*  
MARCO solenoid  
2 T, 2.84 m bore diameter, 3.84 m long

### Status:

- Detailed design completed
- CD3A passed – project approved
- Conductor samples in production and qualification tests

### Next year:

- Call for tender
- CEA intends to participate to the manufacturer follow-up

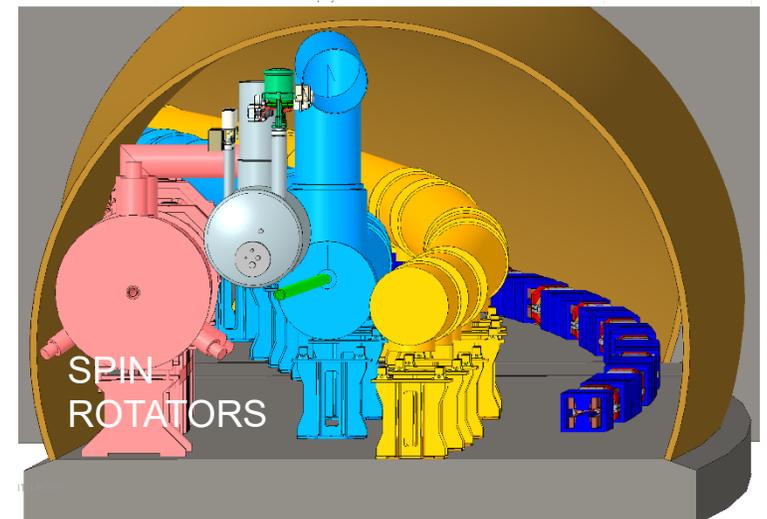


## Accelerator Magnets SPIN ROTATORS

- 4 solenoids 2.5 m long  
8.5 T, 100 mm bore diameter
- 4 solenoids 6.6 m long  
8.5 T, 100 mm bore diameter

### Status:

- Preliminary design ongoing in collaboration with BNL





# Développement aimants HTc REBCO 16 T+



Signature en mai 2023 d'un nouvel accord CERN – CEA pour 2 ans

- Modélisation racetrack et multi-racetrack « Metal Insulated »



- Projet prototype multi-racetracks (sans ouverture)

- Racetrack MI (longueur 600 mm)
- Assemblage de 2 à 4 racetracks
- Induction > 6 T
- Conception outillage et structure en cours

- Aimant EuCARD2  $\cos\theta$  (câble Roebel REBCO)

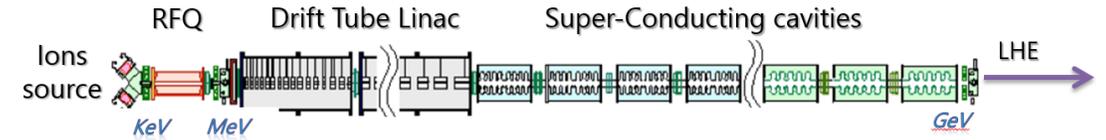
- SCB03 dégradée lors des tests en 2022
- Nouvel assemblage SMB02 (SCB01 et SCB02) en cours
- Tests au CERN 2025



Bobineuse HTS - Bâtiment 392

# Codes de simulation: plus de 1000 licences vendues

[https://irfu.cea.fr/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast.php?t=fait\\_marquant&id\\_ast=5281](https://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=5281)



## Transport codes:

Toutatis  
TraceWin  
Beta

## Generator codes:

RFQ Designer  
GenDTL  
GenLinWin

## Visualization:

PlotWin



*Domaine d'application des logiciels en fonction des différentes parties d'un accélérateur linéaire typique*

*Cartes de répartition des codes de simulation du DACM : en bleu, les codes actuellement utilisés, et en rouge, ceux ayant été utilisés. La représentation inclut 92 laboratoires scientifiques et 30 entreprises privées répartis dans 30 pays*



# 2 ■ Perspectives

# NEWGAIN: début de réalisation

## ■ Lancement de la réalisation du RFQ



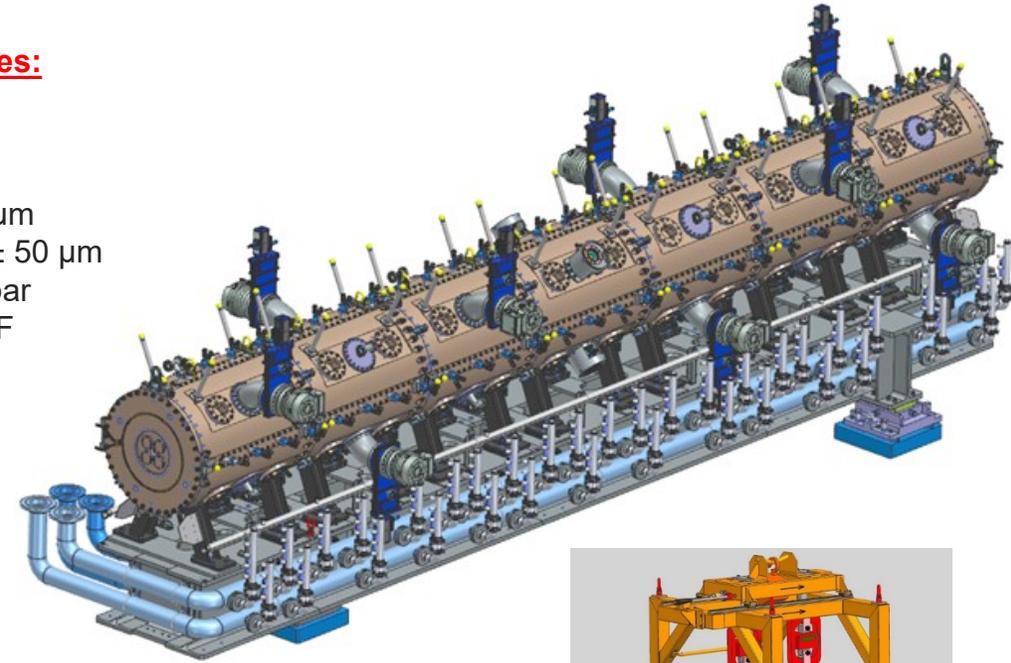
Première lame du RFQ



Coupleur de puissance

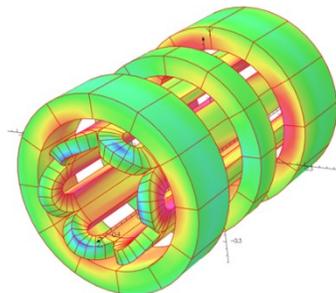
### Principales caractéristiques:

- 7m de long
- 0.8m de diamètre
- 14 tonnes de cuivre
- Précision usinage  $\pm 20\mu\text{m}$
- Précision assemblage  $\pm 50\mu\text{m}$
- Niveau de vide  $\sim 10^{-9}\text{mbar}$
- 150kW de puissance RF
- 100m<sup>3</sup>/h d'eau pour le refroidissement



## ■ Conception et début de réalisation de l'aimant de la source ASTERICS

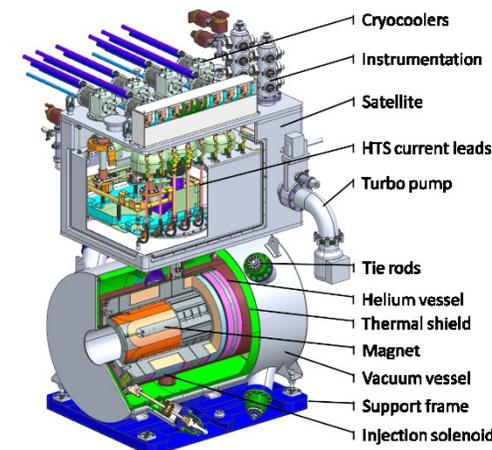
$B_r=2.4\text{ T}$  on plasma chamber at  $r=91\text{ mm}$ ,  
 $B_z=3.7/0.1/2.5\text{ T}$  at  $r=0$



Sextupole-in-solenoids



Essai de bobinage



Système cryogénique autonome

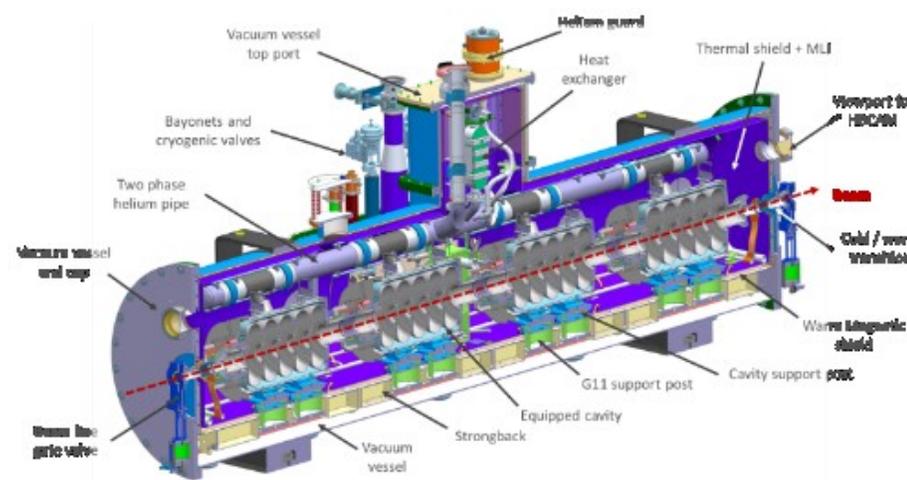
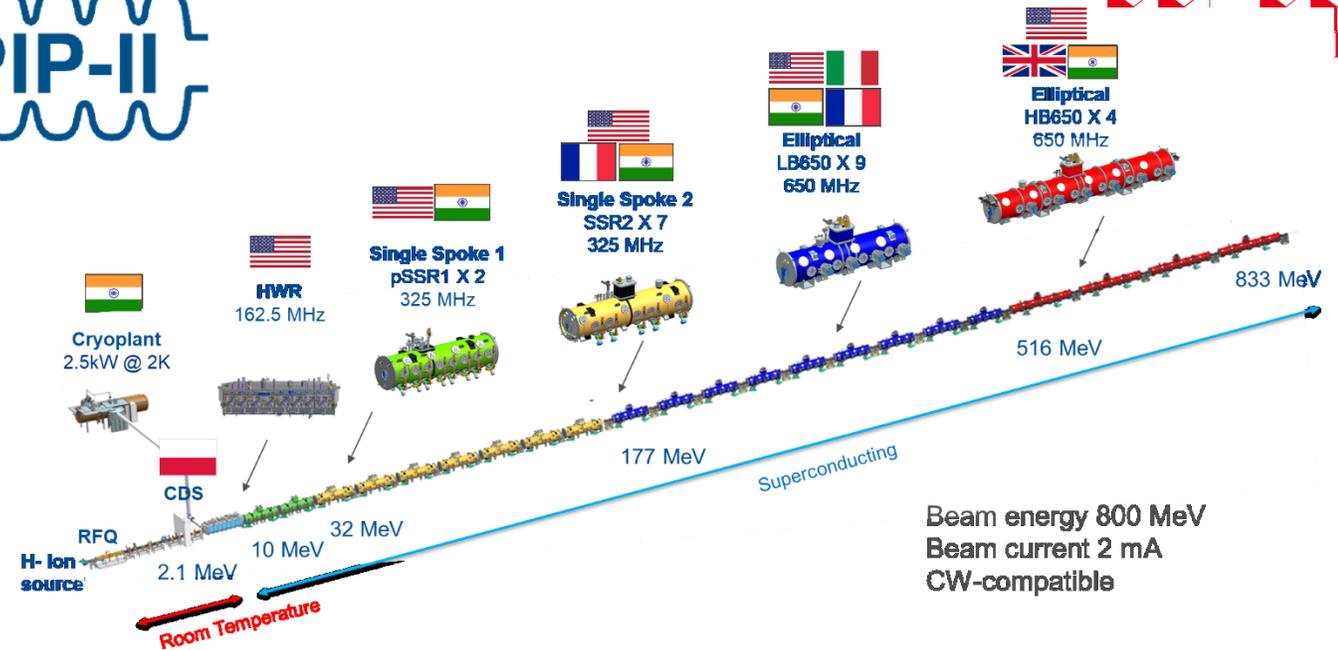


Outillage pour assemblage tronçons avec précision de  $\pm 20\mu\text{m}$

# PIP II



- Contribution du CEA: conception, fabrication et qualification de 10 cryomodules LB650
- Avril 2023, l'Irfu franchit la revue finale de conception
- 2024: lancement de la plupart des marchés de réalisation des composants des cryomodules
- Aout 2024: début de l'installation de la nouvelle boîte froide pour la mise à niveau des installations de tests de cryomodules
- 2025-2026: assemblage et test du CM de préproduction



Nouvelle boîte froide<sup>15</sup>

Contributions françaises présentées à Roscoff 2023:

[https://indico.ijclab.in2p3.fr/event/9312/contributions/31110/attachments/21875/31137/PIP-II-Roscoff\\_2023.pdf](https://indico.ijclab.in2p3.fr/event/9312/contributions/31110/attachments/21875/31137/PIP-II-Roscoff_2023.pdf)

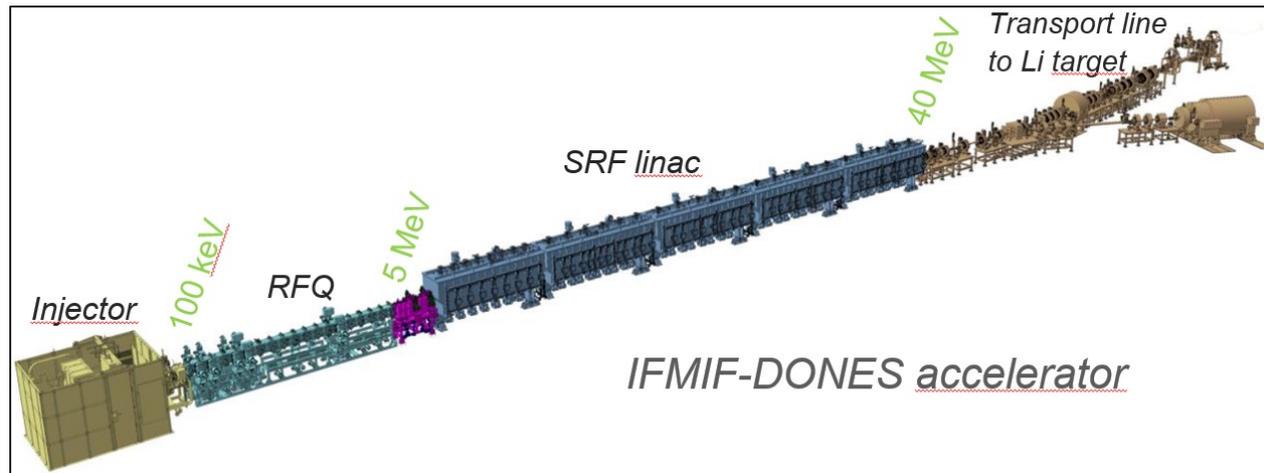
# IFMIF-DONES

International  
Fusion  
Material  
Irradiation  
Facility

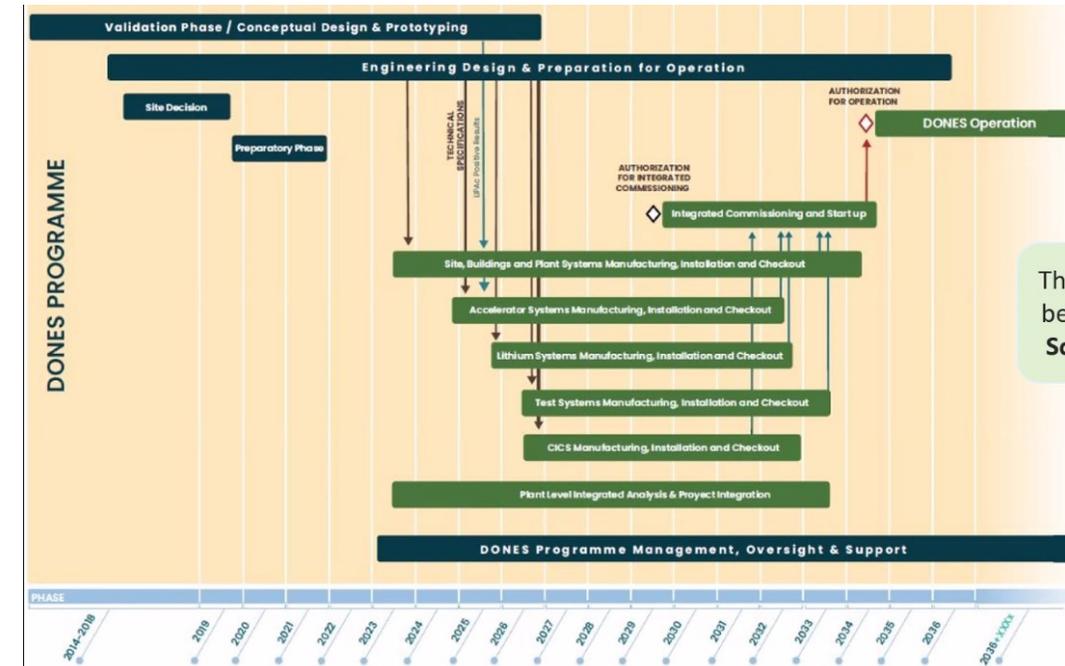
- Construction des premiers bâtiments (administration, accueil, stockage)
- Mise en place du Steering Committee
  - accords signés : Espagne (50%) et Croatie (5%)
  - accords en cours de signature : EU/F4E, Italie, Japon
  - observateurs (discussions en cours) : Allemagne et France
- Contributions potentielles FR (in-kind et/ou Contrats F4E)
  - Accélérateur : Injecteur, SRF-Linac, cavités sc., coupleurs, ...
  - Ingénierie : Mises à disposition vers la Project Team



Construction de l'infrastructure DONES  
Site d' Escúzar, Grenade, Espagne



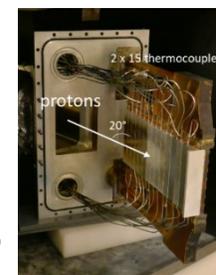
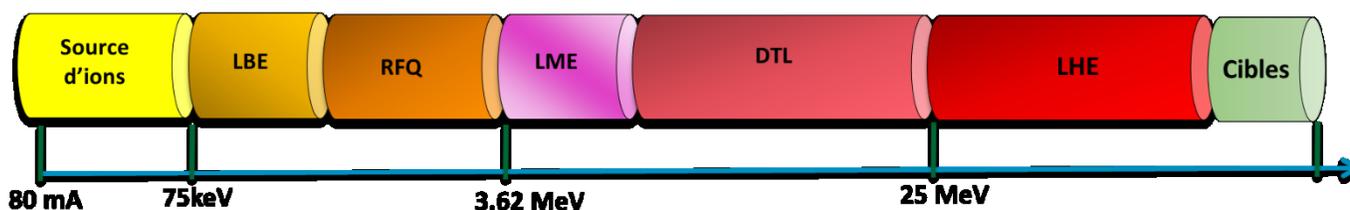
Calendrier Construction / Mise en service



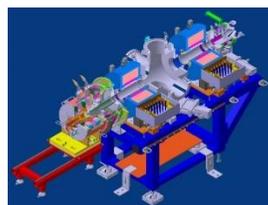
# ICONE: lancement avant-projet détaillé

- Projet CEA – CNRS de réalisation d’une source de neutrons nationale pour la diffusion neutronique
- Début 2024: lancement d’un APD pour une durée de 2 ans

## ■ Accélérateur (responsabilité CEA/IRFU):



Cible LLB - IRFU



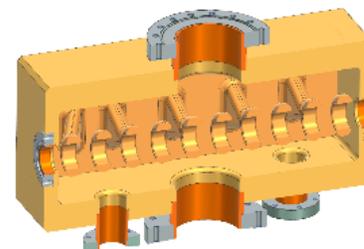
Source SILHI



RFQ ESS



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



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

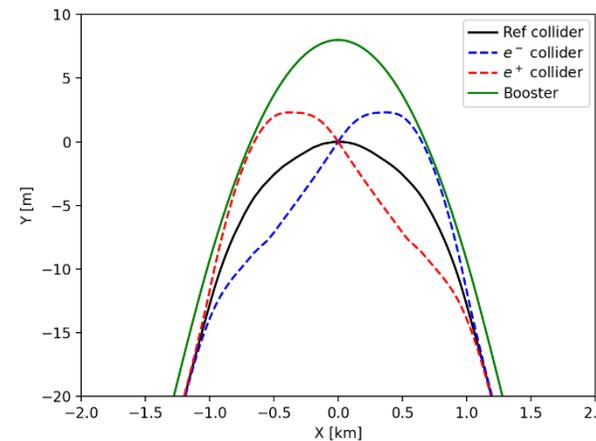
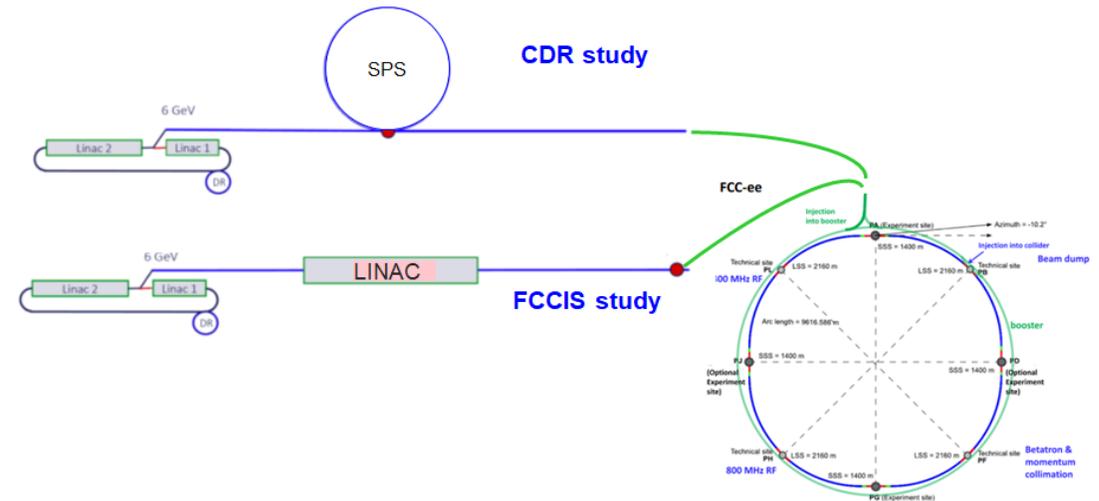
Caractéristiques: faisceaux courts et longs simultanément

	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	

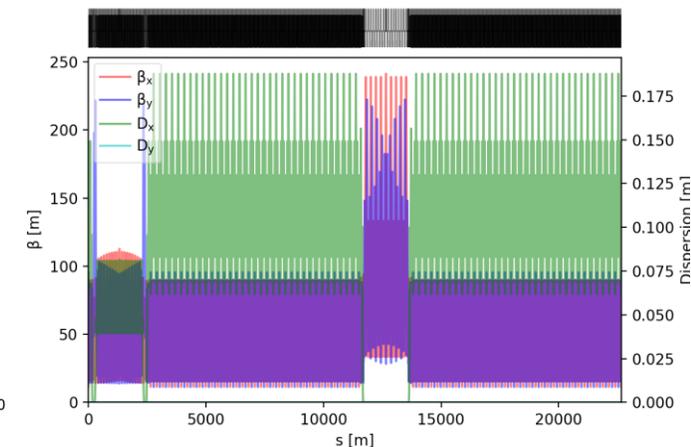
Planning estimé (à consolider)

# FCC-ee High Energy Booster

- Projet européen H2020 **Future Circular Collider Innovation Study (FCC-IS)**.
- **Responsable de la tâche Booster.**
- **But:** faire le design complet du booster permettant d'accélérer les e-/e+ de 20 GeV à l'énergie du collisionneur dans le même tunnel de 91 km.
- Livrable final (mars 2025): rapport conceptuel de FCC-ee + participation à la future stratégie européenne de physique des particules.



Exemple de synoptique

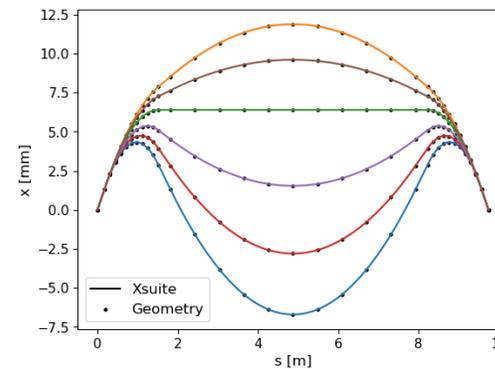
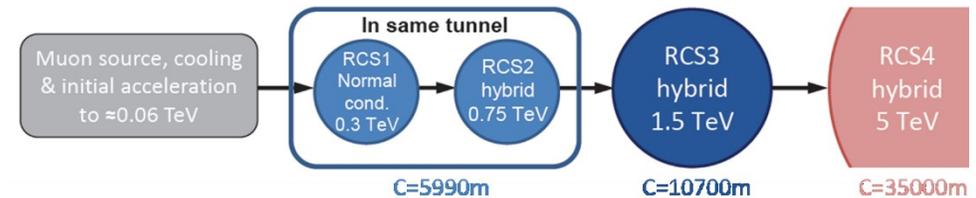
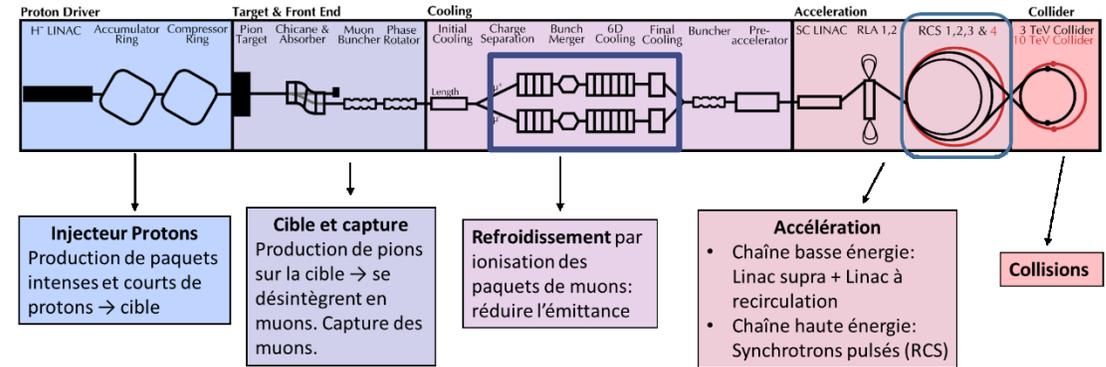


Optique d'1/4 du booster

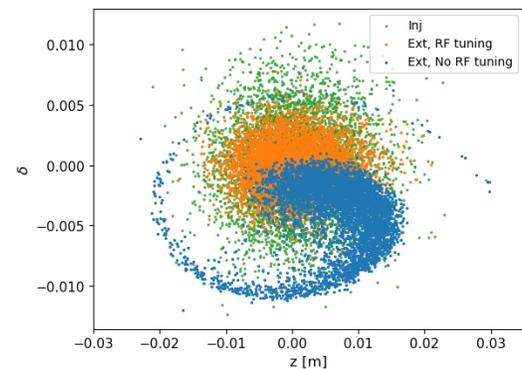
# Collisionneurs à muons



- 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.
  - Étude du phénomène de breakdown dans une cavité en présence de fort champ magnétique.
- **Responsable WP5: High-energy complex**
  - Conception de l'optique de l'ensemble des synchrotrons pulsés.
  - Premières optiques déjà réalisées.
- **Coresponsable du WP7: Magnet systems**
  - Etudes sur les solénoïdes de capture et de refroidissement



Trajectoires de l'injection à l'extraction



Transport longitudinal dans un RCS

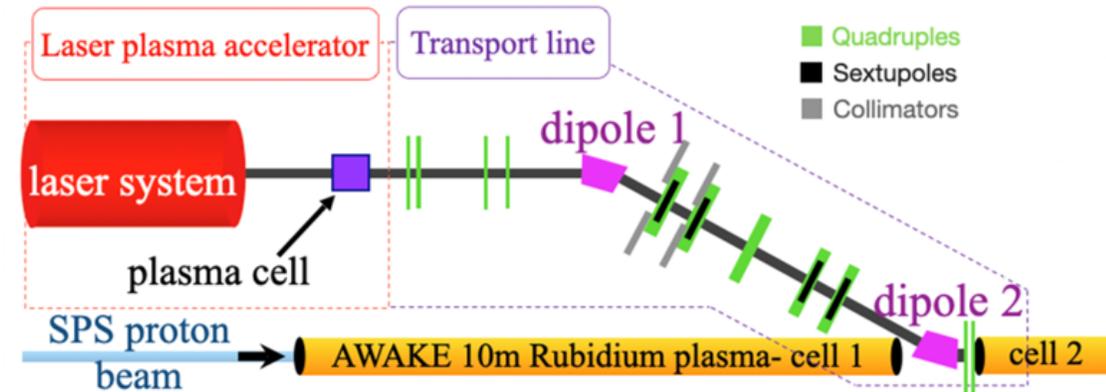
# Accélération laser - plasma



THALES

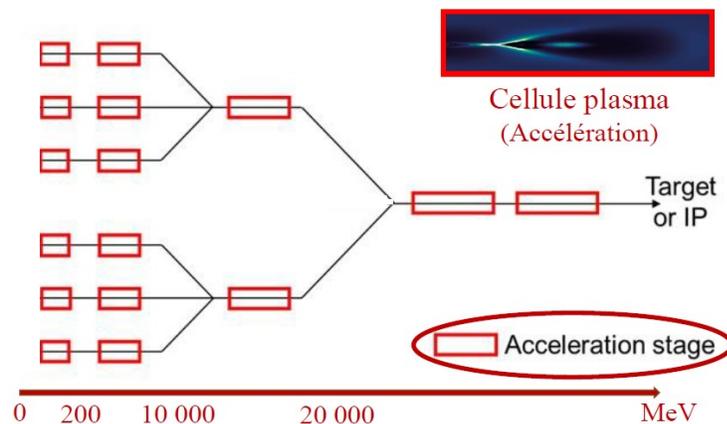
## Conception et modélisation d'un injecteur d'électrons

- Simulation de la cellule plasma et de la ligne de transport, étude d'erreurs, chiffrage
- Satisfait aux exigences d'un injecteur pour AWAKE
- [https://irfu.cea.fr/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast.php?t=fait\\_marquant&id\\_ast=5282](https://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=5282)



## Mesure et transport d'un faisceau produit par LWPA pour des expériences d'irradiation d'échantillons biologiques

- Conception d'une ligne de transport
- Mesures du faisceau sur UHI100 (collaboration avec CEA/IRAMIS)



## Etude d'une structure avancée d'accélérateurs laser-plasma à faisceau de haute énergie, haute intensité et haute qualité

- Système d'accélération laser plasma multi-étages
- Augmentation de la charge et de l'énergie du faisceau
- Optimisation des lignes de transport pour tenter de conserver une bonne qualité de faisceau (émittance,  $\delta p/p$ )



# 3 ■ R&D

# Objectifs de la R&D

## ► Amélioration des performances:

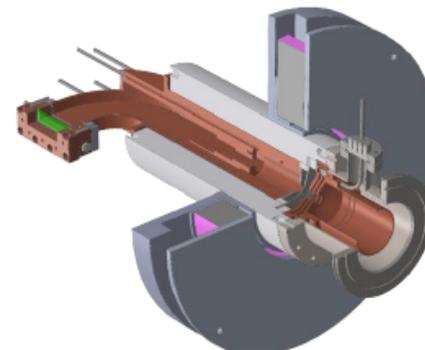
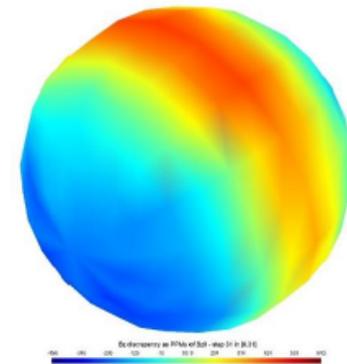
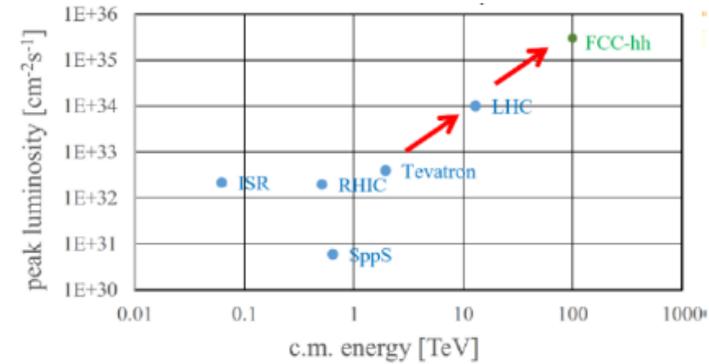
- Gradient accélérateur
- Champ magnétique
- Courant de particules
- Résolution des diagnostics
- ...

## ► Amélioration de la qualité:

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

## ► Réduction des coûts:

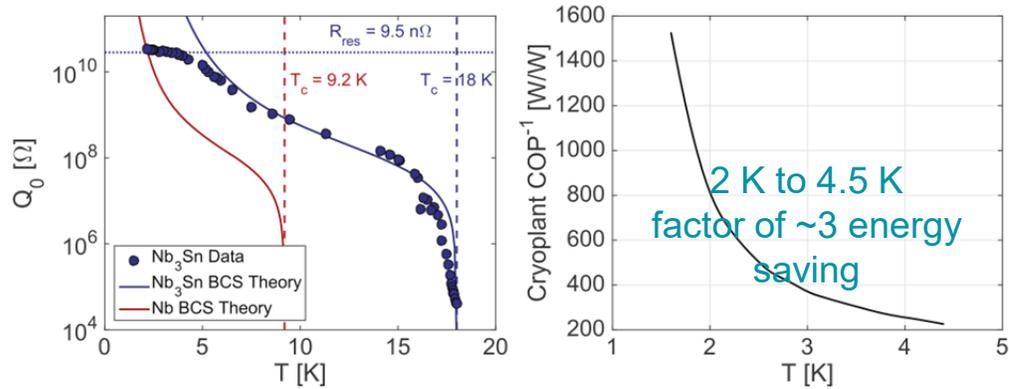
- Coûts de réalisation
- Coût d'opération
- Temps de calcul
- Compacité
- Accessibilité (autonomie...)
- Empreinte écologique
- ...



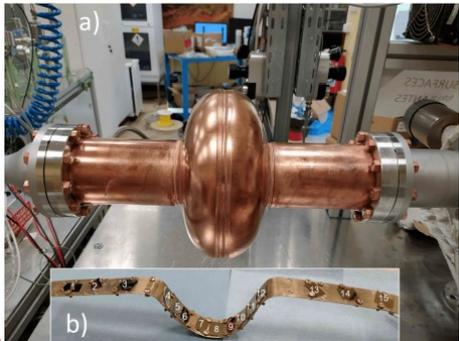
# Participation à iSAS innovate for Sustainable Accelerator Systems



## WP3: Nb<sub>3</sub>Sn on Cu for 4.2K operation



Objectif = passer de Nb massif à Nb<sub>3</sub>Sn sur Cu  
 Partenaires: INFN, HZB, CEA, UKRI  
 Expertise CEA sur la technologie des couches minces et les caractérisations mécaniques

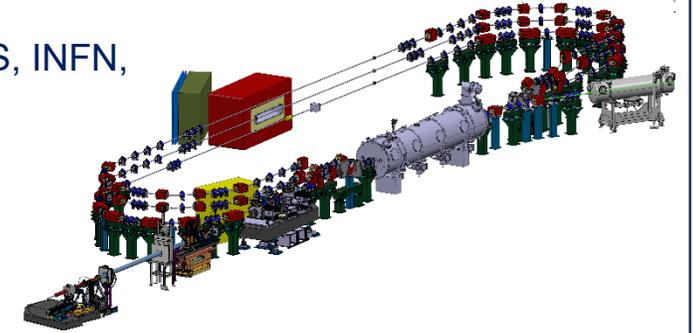


Bancs de dépôts ALD sur cavités et échantillons

## WP6: Integration into Accelerator and Collider RIs

Adaptation of an existing cryomodule (ESS), ready to demonstrate energy recovery of high-power recirculating beams in PERLE

Partners: CNRS/IJCLAB, CEA, ESS, INFN, Lancaster University



Expertise CEA sur l'intégration de cryomodules SC

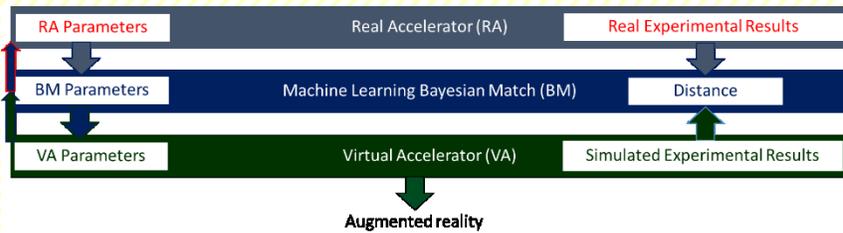


Hall d'assemblage des cryomodules

# Intelligence Artificielle

## Operation

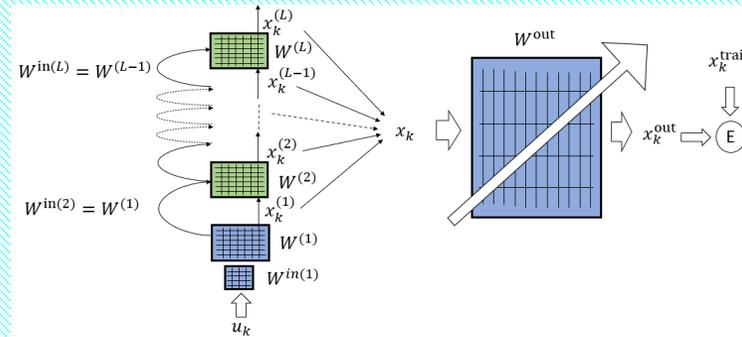
Improvement of an accelerator « digital twin » using Machine learning Bayesian inference methods



Machine operated by a Digital Twin

## Modeling

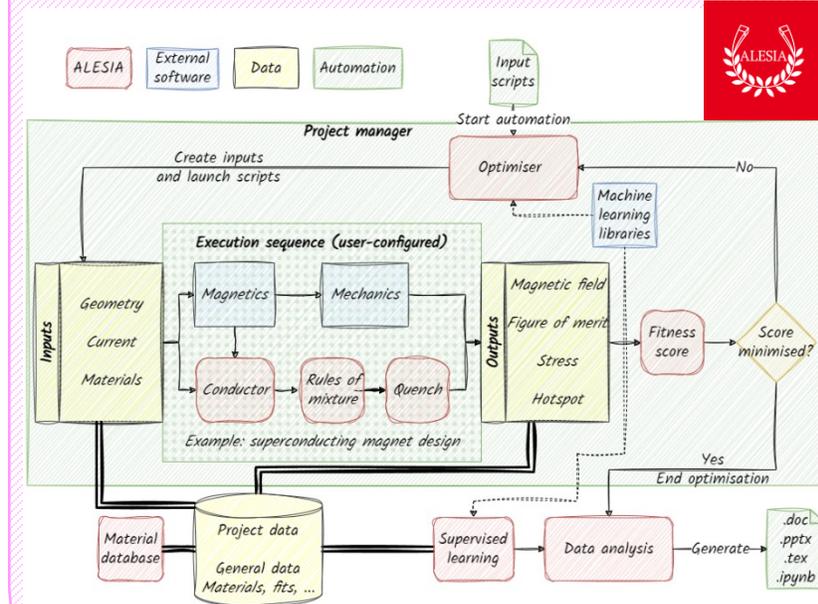
Optimization of optics design and beam measurements of present and future accelerators



- ESN for DA prediction, M. Casanova, B. Dalena et al., Eur. Phys. J. Plus (2023) **138**: 559

## Technology

Superconducting magnet design through multi-physics optimization

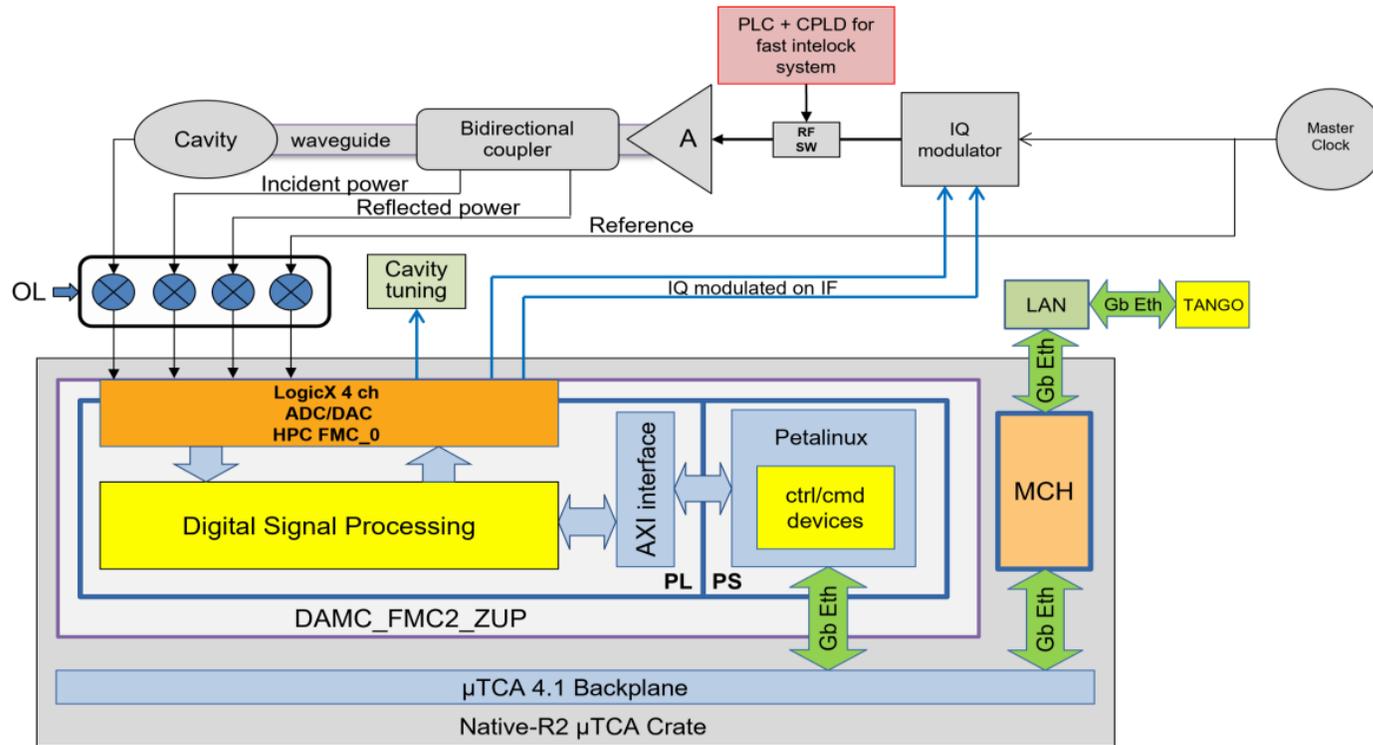


- Participation in **M4CAST** (French network of AI for Accelerators)
- Contribution to **InTheArt** seminars (DRF/CNRS network on transverse applications of AI)

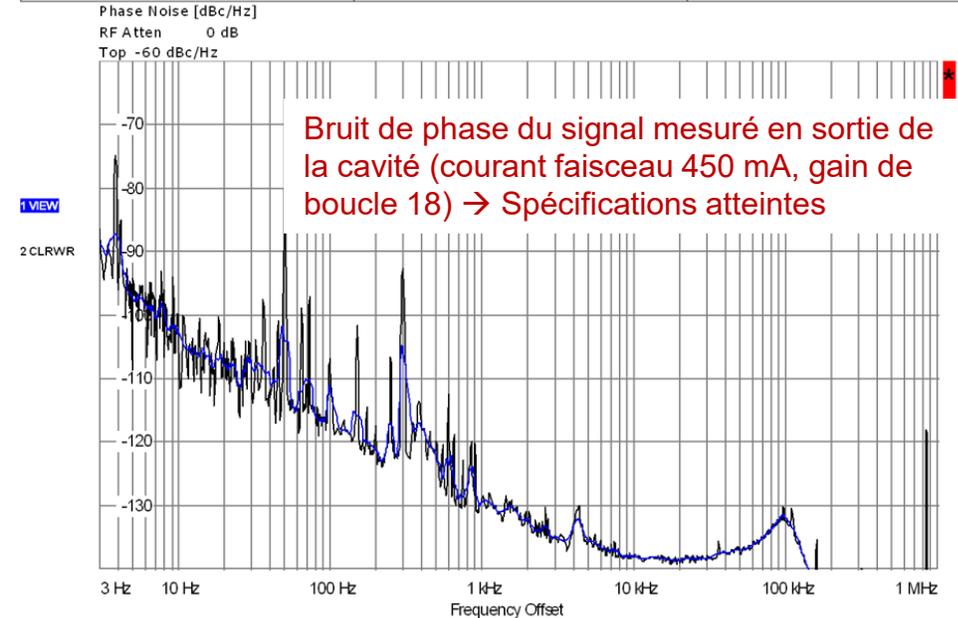
# LLRF numérique pour Soleil-2 (upgrade)

Spécifications (Soleil-2 et Lucrèce/Lunex5) :  $\delta A/A = 10^{-4}$  et  $\delta\varphi = 0.01^\circ$  (rms)

Résultats (une cavité RF contrôlée sur le synchrotron)



R&S FSUP 8 Signal Source Analyzer					
Settings	Residual Noise [T1]	Spot Noise [T1]			
Signal Frequency:	352.197832 MHz	Int PHN (3.0 .. 1.0 M)	-80.1 dBc	1.000 kHz	-129.54 dBc/Hz
Signal Level:	-12.97 dBm	Residual PM	8.028 m°	10.000 kHz	-138.06 dBc/Hz
Analyzer Mode		Residual FM	18.49 Hz	100.000 kHz	-132.15 dBc/Hz
		RMS Jitter	0.0633 ps	1.000 MHz	-161.48 dBc/Hz



## Composantes numériques

- Native-R2 µTCA platform (Nat Europe)
- DAMC-FMC2ZUP (CAENels) => ZU+ + HPC FMC + HPC FMC
- FMC LXD31K4-DC 4 canaux 16-bit ADC/DAC (Logic-X)

## Composantes radiofréquence

- Mélangeur ADL5801
- Amplificateur faible bruit de phase GVA-93+
- Modulateur I/Q LTC5598
- Sources MXG5181B+SRS Rubidium FS725

## Perspectives :

- Intégrations dans le système contrôle-commande de Soleil
- Améliorations des performances au-delà des spécifications
- Possible utilisation à d'autres projets (Spiral2, Icone, etc.)

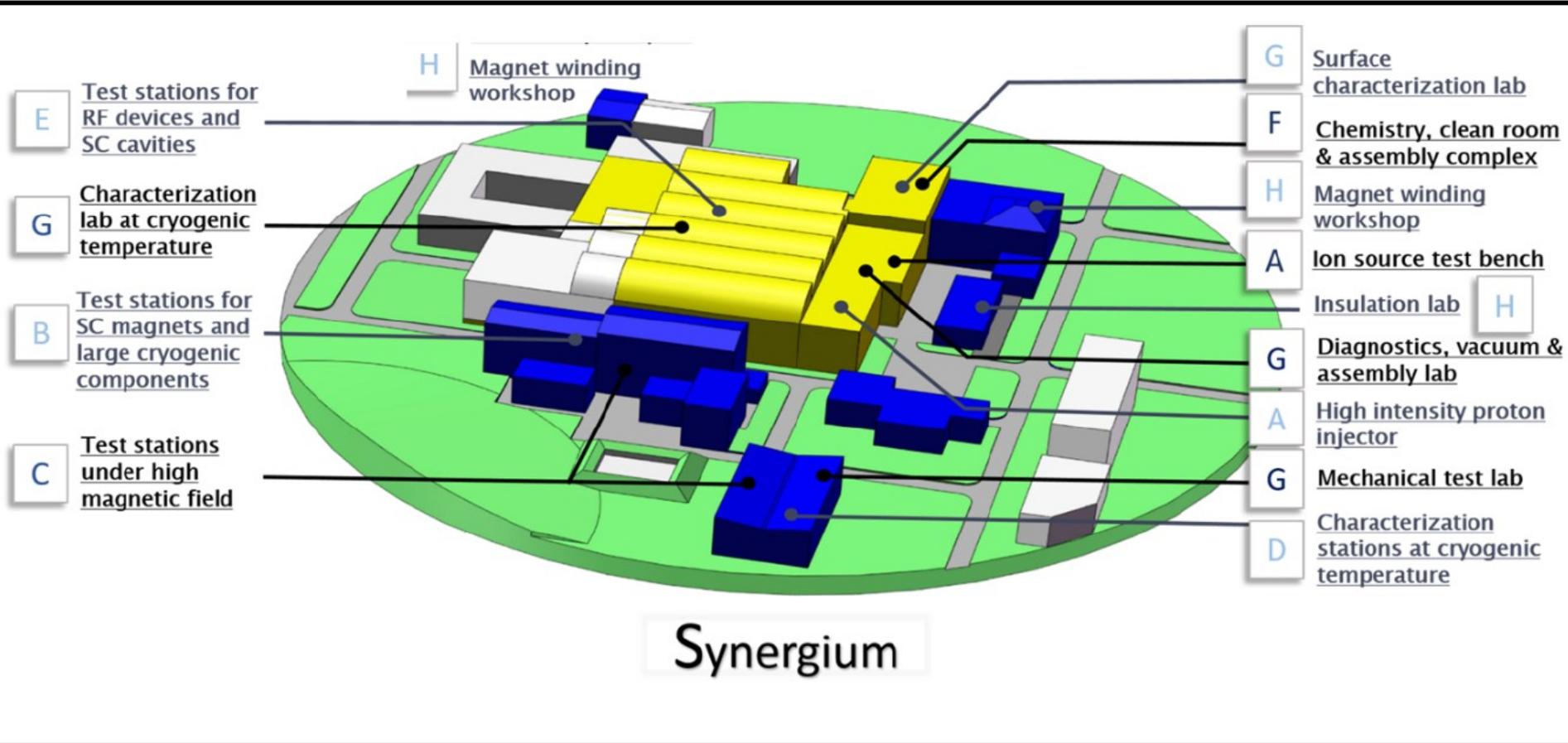
# Les thèses en cours au Département des Accélérateurs, Cryogénie et Magnétisme

Doctorant	Sujet de thèse	Resp. CEA	Dir. de thèse	Date de fin
<b>Guillaume CAMPAGNA</b>	Impact de la contrainte mécanique sur le training des aimants supraconducteurs Nb3Sn à haut champ.	E. Rochepault	K. Lavernhe	2025
<b>Mathieu LAFARIE</b>	Optimisation du coefficient d'émission secondaire par dépôt de couches minces contrôlé par ALD	T. Proslie	M. Belhaj	2025
<b>Ivana CURCI</b>	Étude des mécanismes de perte de cohérence dans les résonateurs supraconducteurs par spectroscopie tunnel et rayon-X.	T. Proslie	T. Proslie	2025
<b>Audren BLONDELLE</b>	Développement d'aimants dipolaires d'accélérateur très haut champ utilisant des matériaux supraconducteurs à haute température critique de type REBCO.	T. Lecrevisse	P. Tixador	2026
<b>Quentin BRUANT</b>	Techniques avancées et intelligence artificielle en vue de correction d'imperfections dans le cadre de design de collisionneurs du futur.	B. Dalena	B. Dalena	2026
<b>Lisa SOUBIROU</b>	Design de synchrotrons pulsés pour la chaîne d'accélération de haute énergie d'un collisionneur à muons	A. Chancé	B. Dalena	2026
<b>Laury BATISTA</b>	Etude d'une structure avancée d'accélérateurs laser-plasma à faisceau de haute qualité, haute énergie et haute intensité.	N. Chauvin	B. Dalena	2026
<b>Marcin OPALSKI</b>	Étude expérimentale et numérique d'un caloduc oscillant cryogénique de petite dimension	B. Baudouy	B. Baudouy	2026
<b>Mathias BARRANT</b>	Simulation et caractérisation des sources d'ions à haute intensité	G. Ferrand	J. Plouin	2027



# 4 ■ Infrastructures

# Le synergium: une infrastructure technologique au CEA



## Synergium complex

- ✓ 25 000 m<sup>2</sup>
- ✓ 100 M€ technical platform
- ✓ 200 FTE
- ✓ 40 M€ / year turnover

Member of the

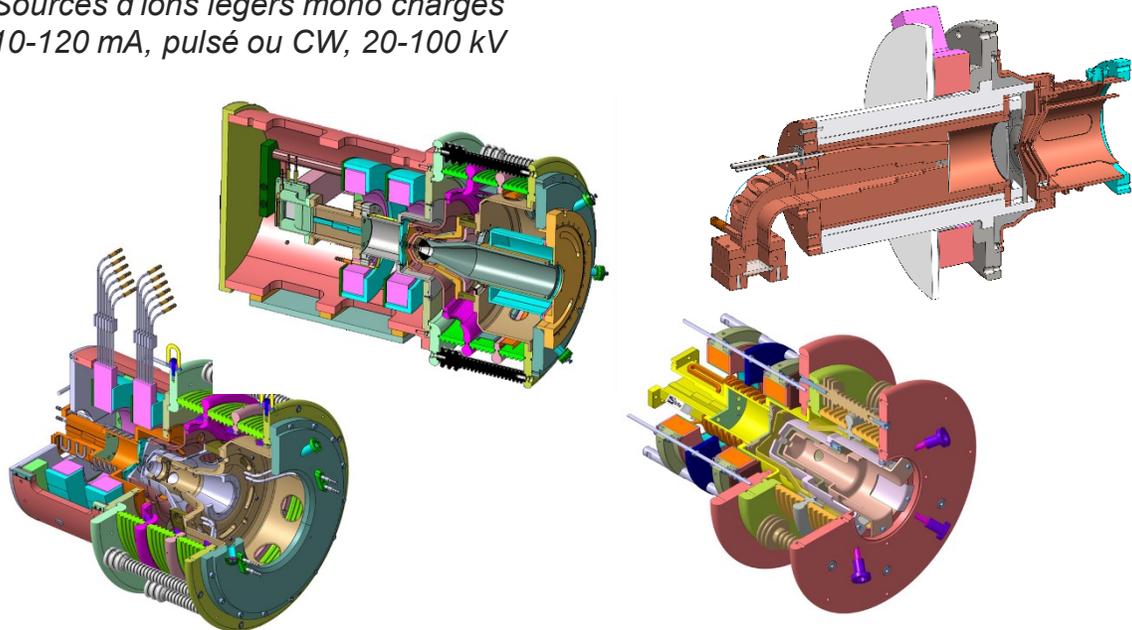


European project

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



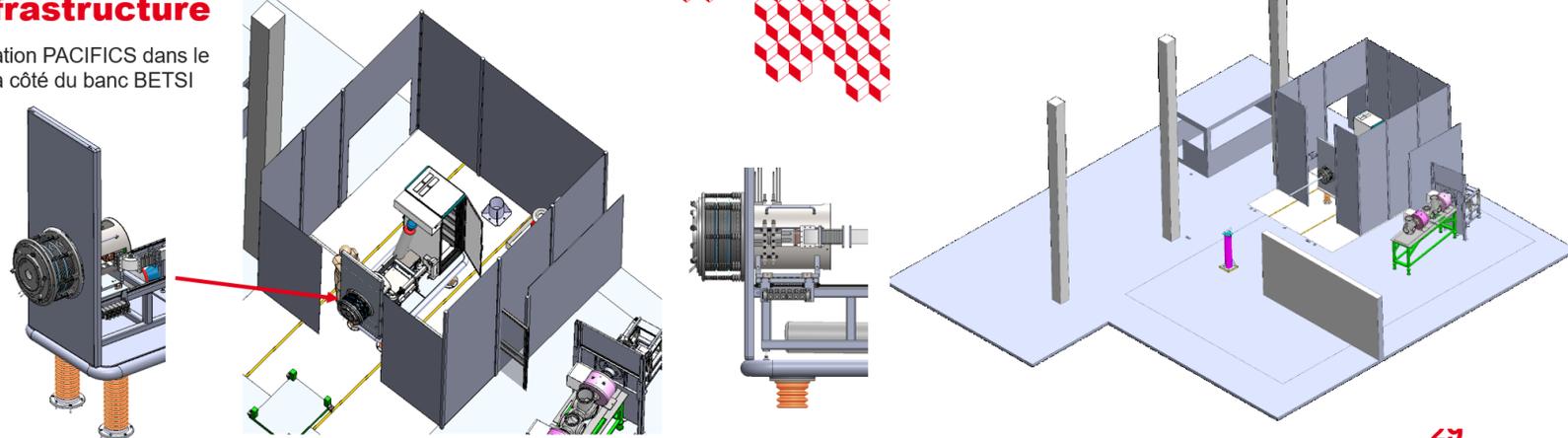
Source exit      Solénoïd 1      Diagnostic location (WF or EMU)      Solénoïd 2      Cooled beam dump with current measurement

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 m<sup>2</sup>

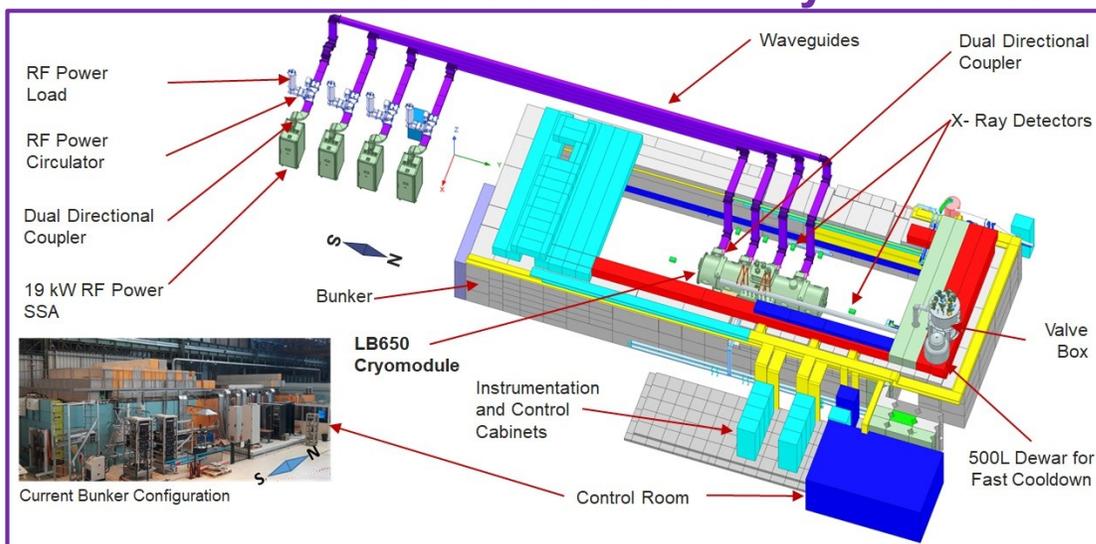


Salle blanches  
~300 m<sup>2</sup>



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)

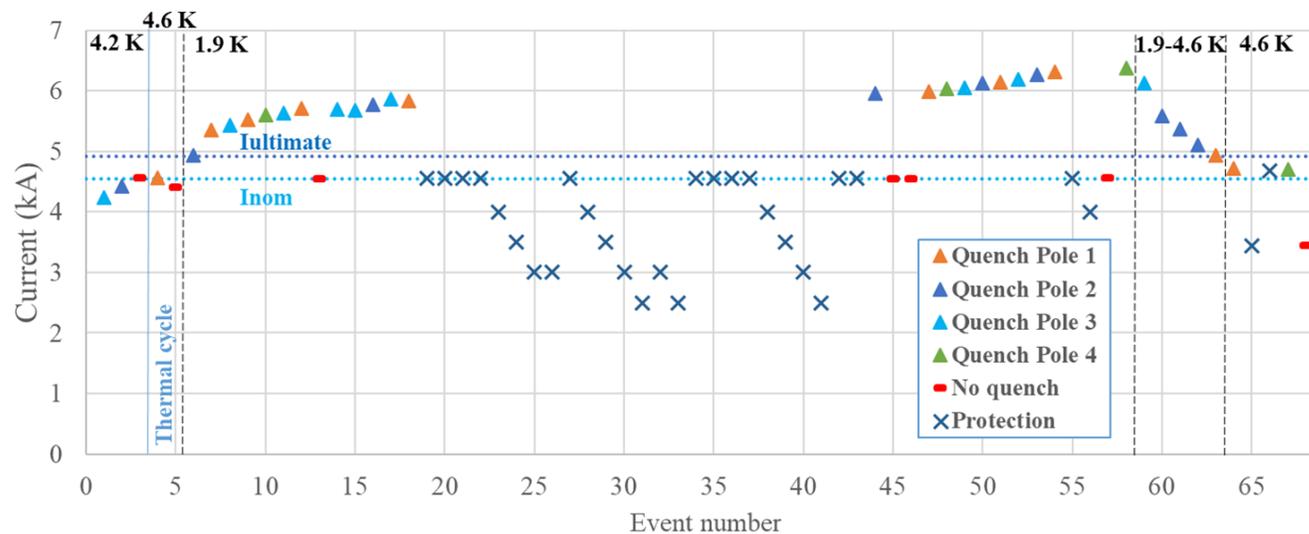
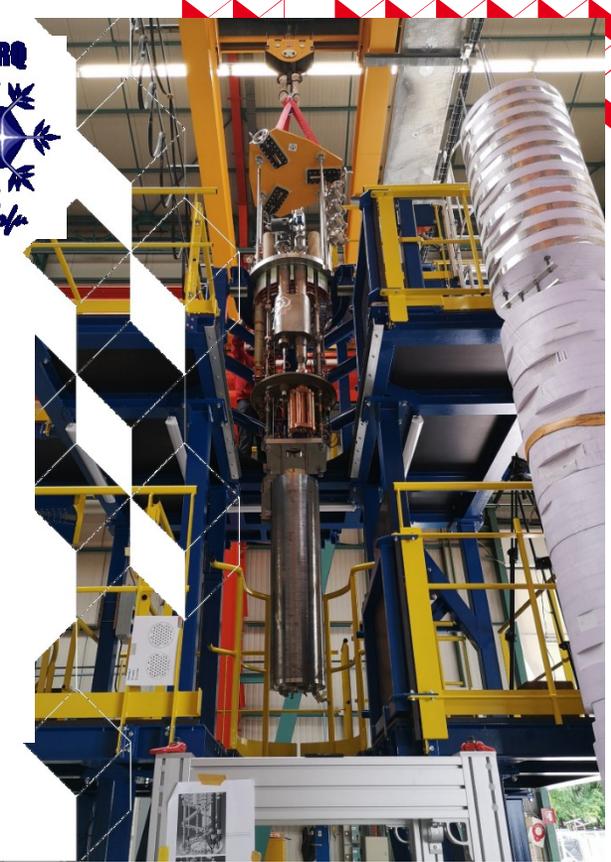


Station conçue pour tester des aimants quadrupôles pour le LHC.

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

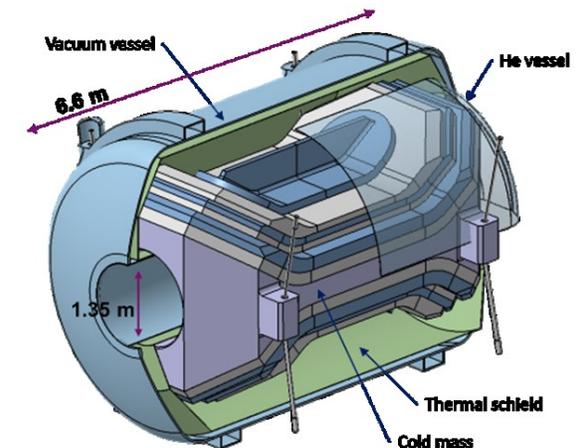


Test de l'aimant MQYYM réalisé de mi juin à mi-juillet 2024

# 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**

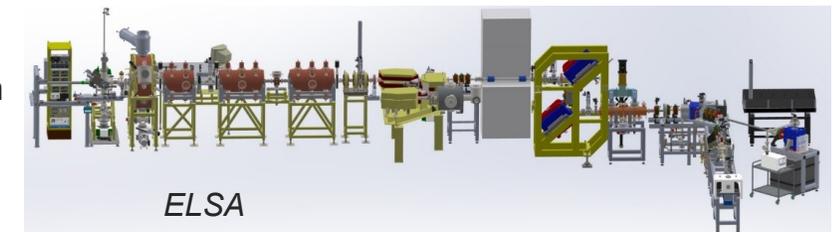
# Accélérateurs de la DAM

- **EPURE : Radiographie Eclair 3 axes (3 machines) : pour 3D**
  - Axe 1 et 3 : Conception et réalisation CEA. Axe 2 : UK
  - Radiographie d'objets très denses en évolution rapide, dimension centimétrique
  - Axes 1 et 3 : Accélérateurs à induction 64 cellules + focalisation cible Tantale
  - 60 ns, 20 MeV, 2 kA (!!!). Axe 2 : UK (Inductive Voltage Adder)  
Axe 1 mise en service 2014. Axe 3 Premier faisceau 2kA + production X [16/11/2022](#)
  - [Première expérience bi-axe \(1 et 3\): 12/12/2023](#). Axe 2 soon (équipe anglaise) !
- **ELSA – Accélérateur RF 144 MHz d'électrons 17-30 MeV**
  - 30 mA 200  $\mu$ s 1 Hz (typ.) – durée paquets  $\sim$ 50 ps
  - X Bremsstrahlung + Source Compton inverse
  - Applications : Tests détecteurs X, comportement composants électroniques sous irradiation
  - [Jouvence 1 : Modulateur du klystron 433 MHz \(2023\)](#)
  - [Jouvence 2 : Ampli 144 MHz Solid State 2 MW \(2024\)](#)
  - [Jouvence 3 : ligne 1,3 GHz : en cours de réflexion \(202x\)](#)
- **Accélérateur 4MV – Van de Graaf**
  - Faisceau d'ions protons, deutons et alphas 10  $\mu$ A
  - Analyse de matériaux par faisceau d'ions
  - Expériences de neutronique
  - Nouvelle ligne neutrons haut flux en [2025](#)
- **Accélérateur TANDEM 7 MV – NENUPHAR**
  - (NEutrons Utiles pour la Physique des Armes)
  - Faisceaux d'ions proton et deuton 14 MeV  $\sim$ 10  $\mu$ A + neutrons, ions Helium puis Li, C, O, (etc... jusqu'au Pb) en [2026](#)
  - Programmes de physique nucléaire.

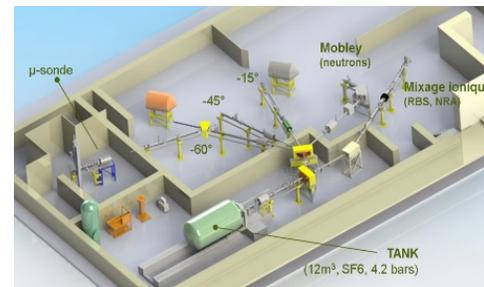


Site Valdug

EPURE AXE 1



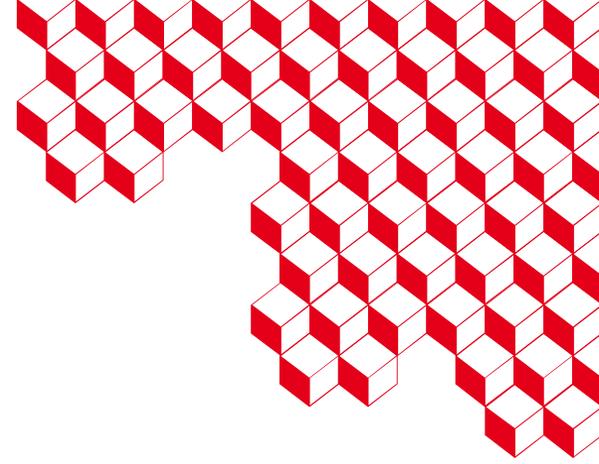
ELSA



4 MV VdG



TANDEM



# Merci



**CEA SACLAY**

91191 Gif-sur-Yvette Cedex

France

[jerome.schwindling@cea.fr](mailto:jerome.schwindling@cea.fr)

Phone: +33 1 69 08 29 53