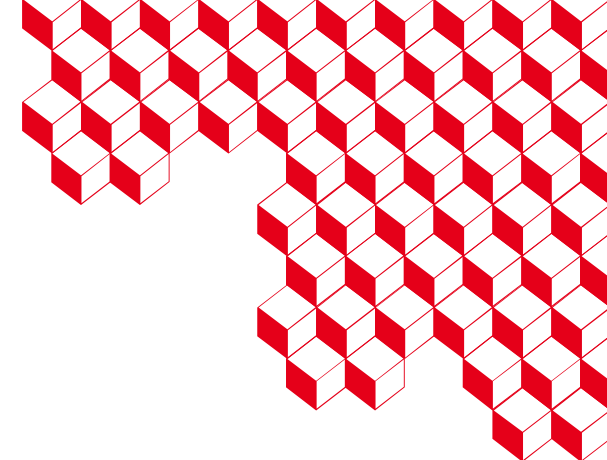




Institut national de  
physique nucléaire et  
de physique des particules



# La contribution française à l'accélérateur linéaire supraconducteur PIP-II

Nicolas Bazin (CEA) – David Longuevergne (CNRS)

Journées Accélérateurs de la SFP

Roscoff, 5 octobre 2023





# 1 ■ Introduction

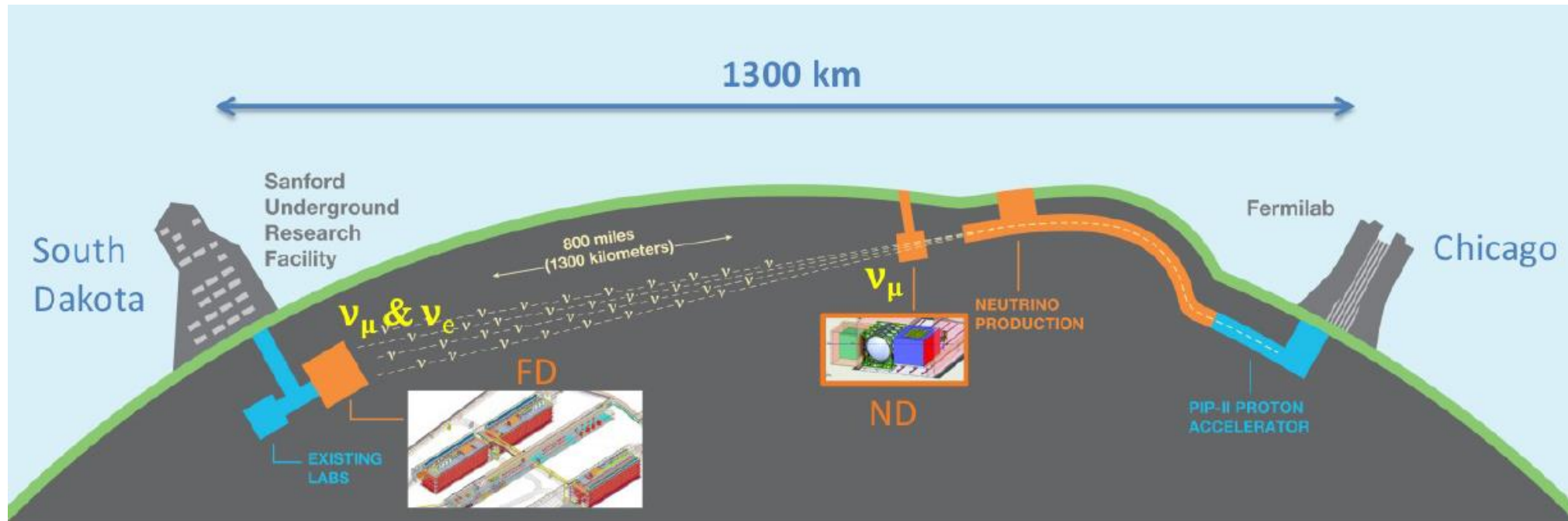
# L'expérience DUNE

- L'expérience DUNE – *Deep Underground Neutrino Experiment* est une expérience phare internationale pour percer les mystères des neutrinos.
- DUNE permettra aux scientifiques de broser un tableau plus clair de l'univers et de son fonctionnement.
- DUNE poursuivra trois objectifs scientifiques majeurs:
  - Découvrir si les neutrinos pourraient être la raison pour laquelle l'univers est fait de matière.
  - Chercher des phénomènes subatomiques qui pourraient aider à réaliser le rêve d'Einstein d'unification des forces.
  - Surveillez les neutrinos émergeant d'une étoile qui explose, témoin peut-être de la naissance d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir.

<https://lbnf-dune.fnal.gov/>

# LBNF / DUNE / PIP-II

- LBNF – *Long Baseline Neutrino Facility*: the facility that produces the neutrino beam and houses the experiment
- DUNE – *Deep Underground Neutrino Experiment*: the experiment itself
- PIP-II – *Proton Improvement Plan II*: the upgrade to the Fermilab accelerator complex





# PIP-II Mission

- PIP-II is an essential upgrade to Fermilab accelerator complex to enable the world's most intense beam of neutrinos to LBNF/DUNE, and a broad physics research program for decades to come.



## PIP-II Capabilities

### Beam Power

- 1.2 MW proton beam
- Upgradeable to multi-MW

## PIP-II Scope

### 800 MeV proton SRF Linac

- CW RF operations

### Linac-to-Booster transfer line

### Accelerator Complex Upgrades

- Booster
- Main Injector

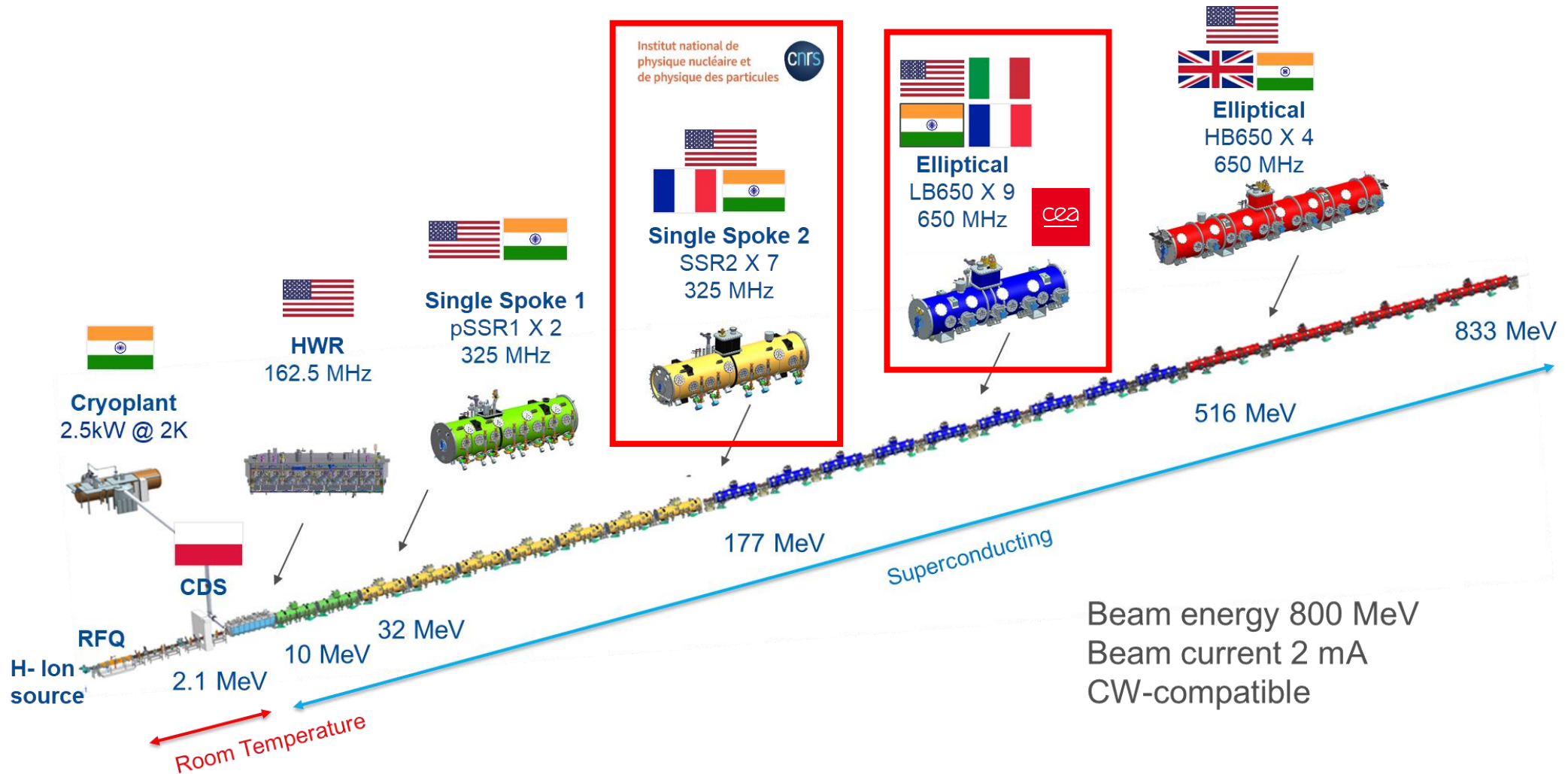
### Conventional Facilities

- Space reserved for additional cryomodules for 1 GeV upgrade

## PIP-III



















Remplacement du booster de 8 GeV pour une montée en puissance du faisceau jusqu'à 2.4 MW

# L'accélérateur linéaire PIP-II



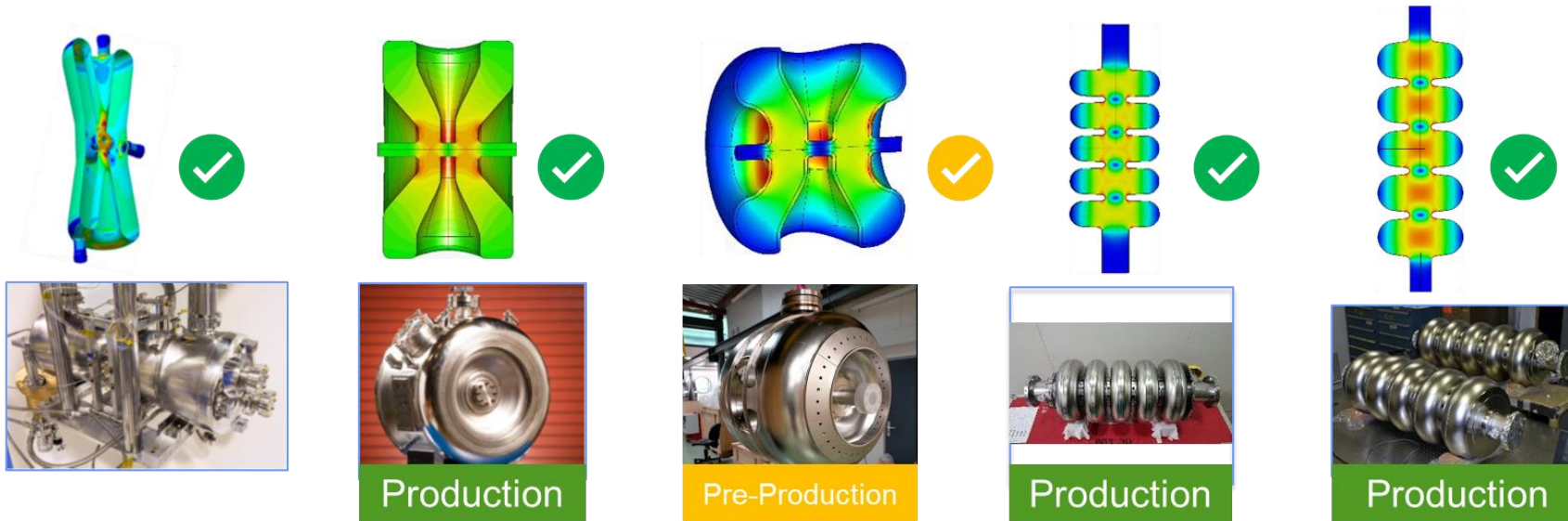
**PIP-II is the first U.S. accelerator project to be built with major international contributions**

# Détail des contributions In-Kind sur l'accélérateur linéaire supraconducteur (phase de production)

	SSR1	SSR2	LB	HB
 	9  + Coupler and Tuners	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">33 SSR solenoids</div> 1  CM set, assembly @FNAL	4  + Coupler and Tuners	1  CM set, assembly @FNAL
 			10 	
 		 Cavity Tests		
 			40 	
 				3 



# Paramètres des cavités supraconductrices



Name (Qty.)	HWR (8)	SSR1 (16)	SSR2 (35)	LB650 (36)	HB650 (24)	Units
Type	Half-Wave	Single Spoke	Single Spoke	Elliptical	Elliptical	-
$\beta$	0.11	0.22	0.47	0.61	0.92	-
Frequency	162.5	325	325	650	650	MHz
$Q_0$	$8.5 \cdot 10^9$	$8.2 \cdot 10^9$	$8.2 \cdot 10^9$	$2.4 \cdot 10^{10}$	$3.3 \cdot 10^{10}$	-
Gradient	9.7	10	11.5	16.8	18.7	MV/m
Doped	No	No	No	Mid-T bake	Yes	-

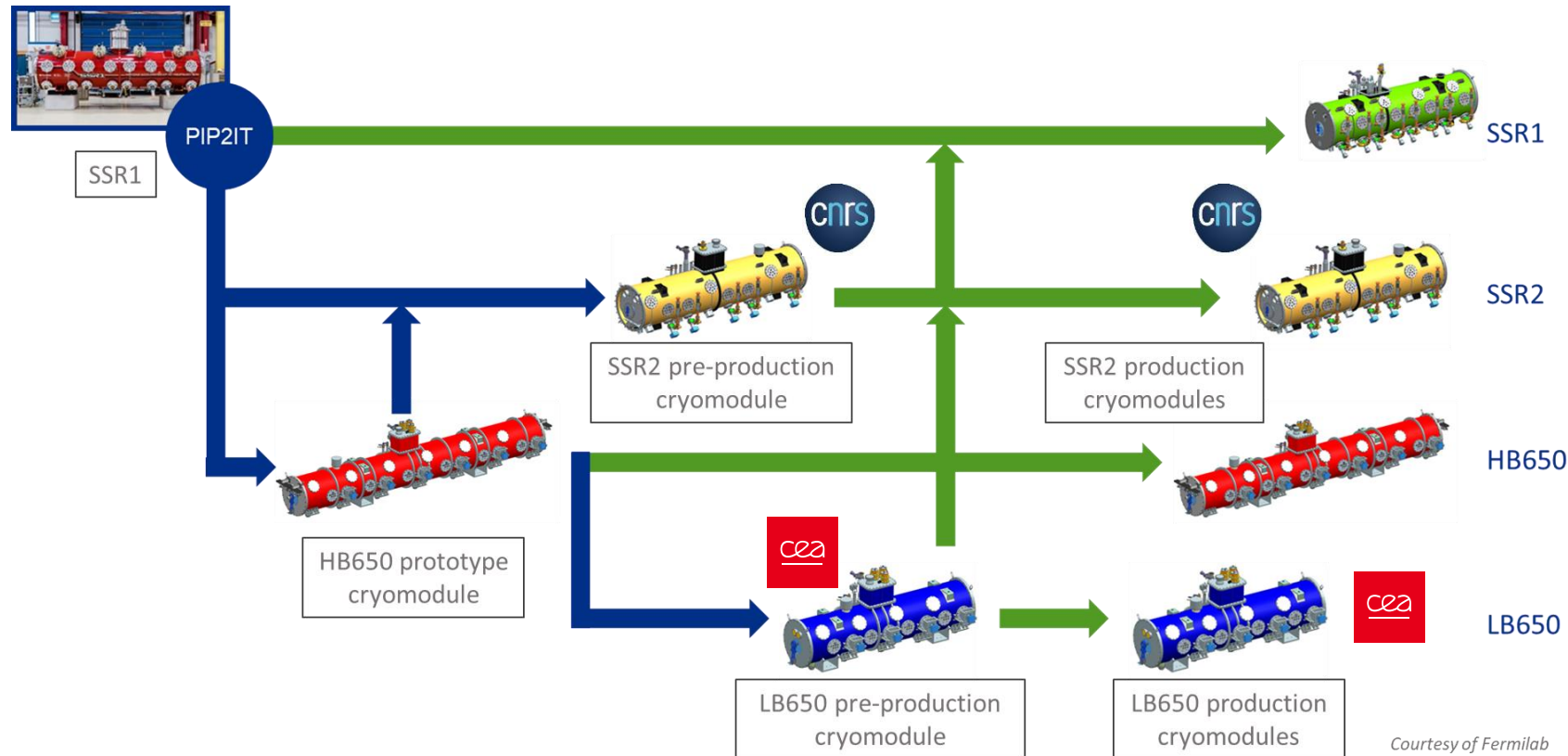
✓ Prototypes validated

✓ Ongoing activities



# Plan de développement des cryomodules au sein de la collaboration PIP-II

Most of the PIP-II cryomodes have the same design concept: the cavity string is supported by the strongback that stays at room temperature. There one configuration for the single spoke cryomodes and an other one for the elliptical cryomodes.



# Phase de prototypage: statuts



5.9 m

HWR



5.3 m

SSR1



6.5 m

SSR2



5.5 m

LB650



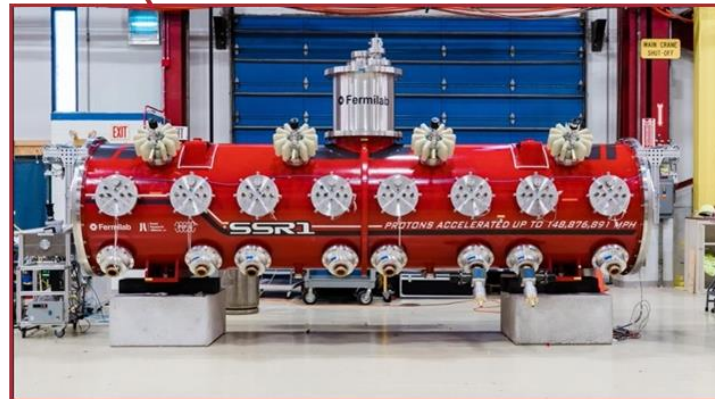
9.9 m

HB650



(Cold testing in ongoing)

Pre-Production Cryomodules



✓ Prototype designed

✓ Prototype built

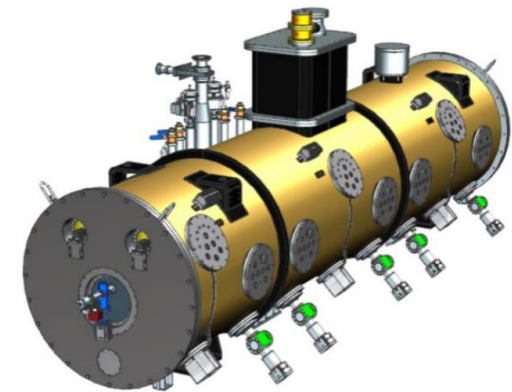
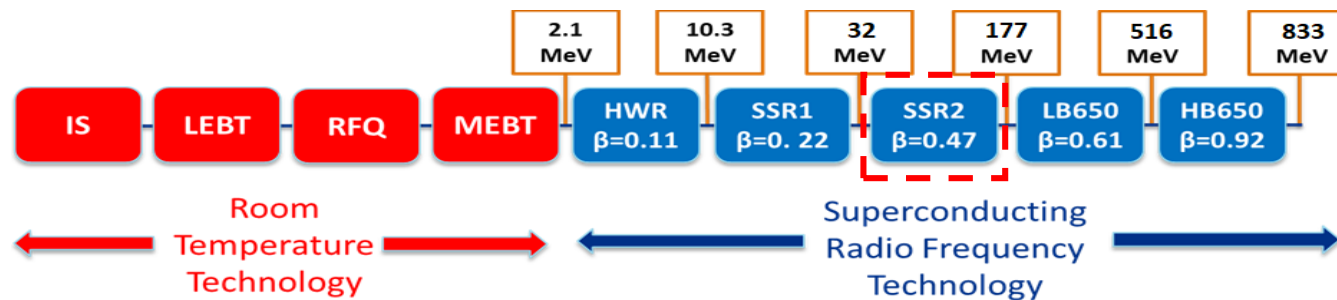
✓ Prototypes validated



# 2 ■ Contribution IN2P3

# Contribution IN2P3 au projet PIP-II

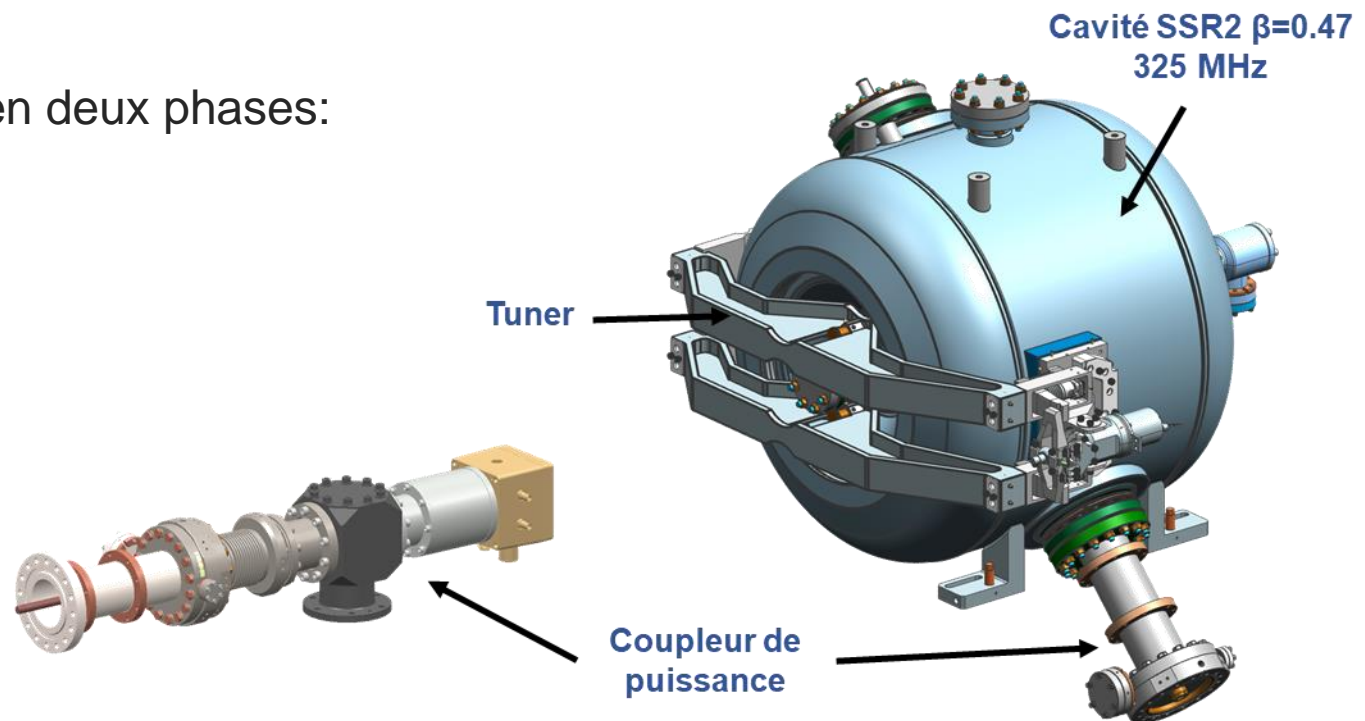
- Le CNRS/IN2P3 est entré dans la collaboration PIP-II en 2018.
- Contribution pleinement financées par l'IN2P3.
- Elle se concentre sur la section accélératrice supraconductrice 'single spoke 2' SSR2 incluant 7 cryomodules à 5 cavités spoke  $\beta=0.47$  et 3 solénoïdes supraconducteurs.





# Contribution IN2P3: détails

- Dans le détail, la contribution IN2P3 porte sur les composants suivants des cryomodules SSR2:
  - Cavité de type simple Spoke:  $\beta=0.47$ , 325MHz ( $E_{acc} = 11.5$  MV/m)
  - Système d'accord en fréquence de la cavité (Fundamental Frequency Tuner ou FFT)
  - Coupleur de puissance
- La contribution se décompose en deux phases:
  - Prototypage: 2018-2023
  - Série: 2023-2026



# Détails des activités à IJCLab

## PIP-II Prototypage (pre-production) – 2018-2023 :

- Conception des composants
- Fabrication de composants prototypes
- Test de composants, traitement de surface,
- Design final des composants de série SSR2

### ☐ Cavités : Total 6

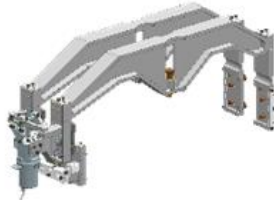
- Soutien au suivi de fabrication et de préparation
- Préparation quasi-complète d'1 cavité @IJCLab
- Validation des 6 cavités proto en CV800 @IJCLab
- Re-conditionnement @IJCLab (BCP, HPR) si besoin

### ☐ Tuners: Total 5

- Fourniture de 5 tuners
- Validation de 4 tuners en CV

### ☐ Coupleurs de puissance : Total 4

- Fourniture de 4 coupleurs

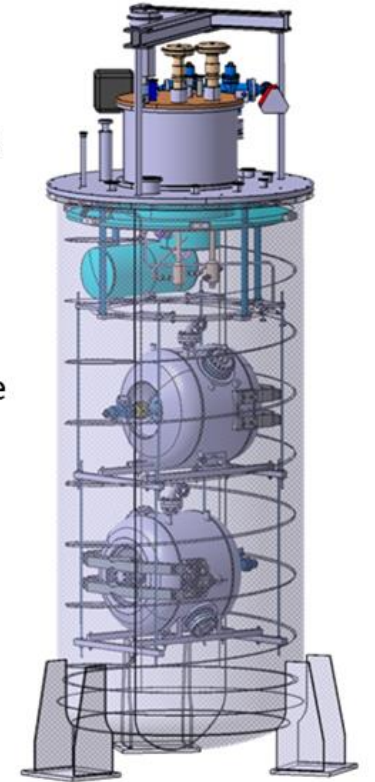


## PIP-II série (production) – 2023-2026 :

- Qualification de 33 cavités SSR2 (5 x 6 CM + 3 spares)

### ☐ Cavités : Total 33

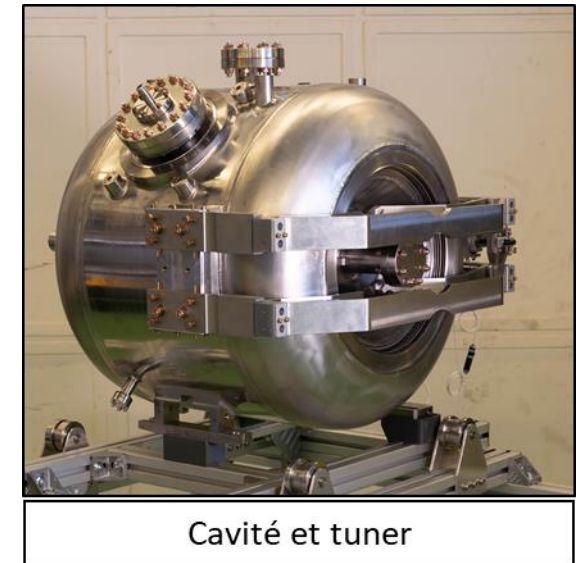
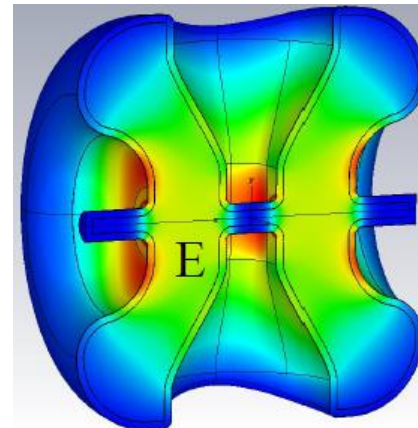
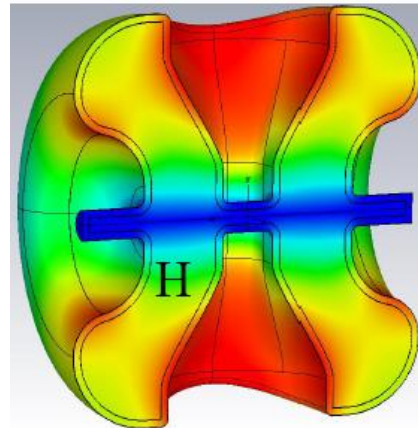
- Soutien au suivi de fabrication et de préparation
- Validation des 33 cavités en CV @IJCLab
- Re-conditionnement @IJCLab (BCP, HPR) si besoin dans la limite de 25%
- Envoi par lot à Fermilab



# Cavités prototypes

- Cavité spoke SSR2:
  - Design RF: Fermilab
  - Design mécanique conjoint Fermilab / IJCLab / BARC
- 3/6 cavités prototypes fabriquées chez Zanon (Italie) ont été livrées à IJCLab

Paramètre	Valeur
Fréquence	325 MHz
Beta	0.472
Température	2 K
$E_{acc}$ nominal	11.5 MV/M
$Q_0 @ E_{acc\_nom}$	$> 8 \times 10^9$
$B_{peak} / E_{acc}$	6.75 mT/MV/M
$E_{peak} / E_{acc}$	3.5
R / Q	305 $\Omega$
G	115

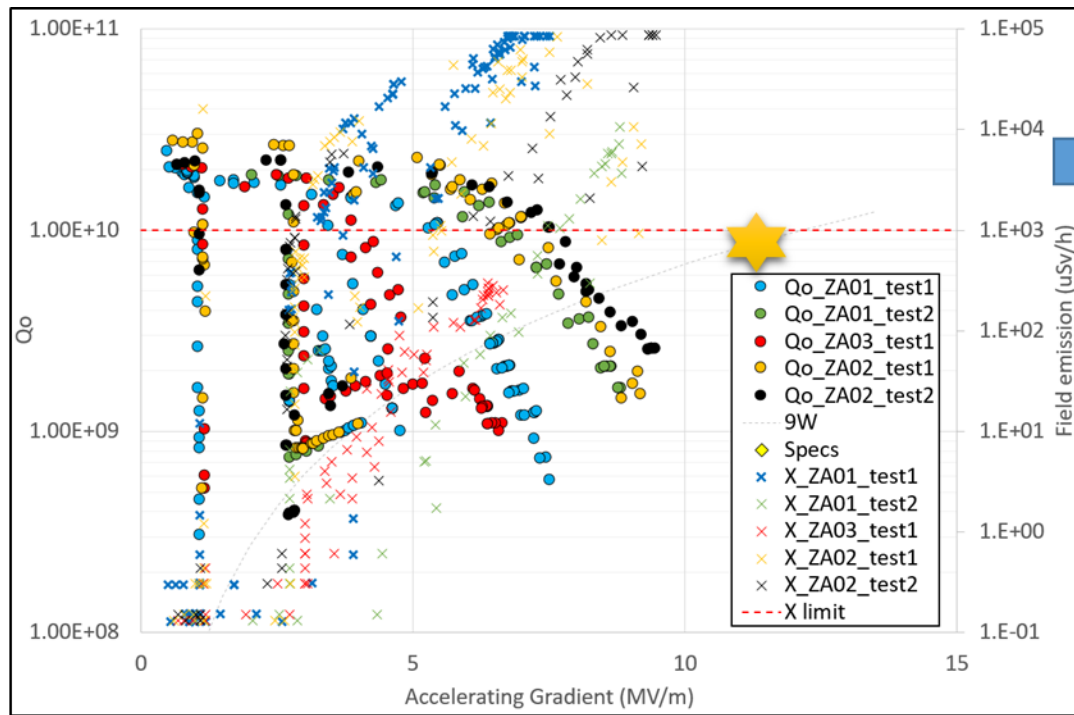


Cavité et tuner

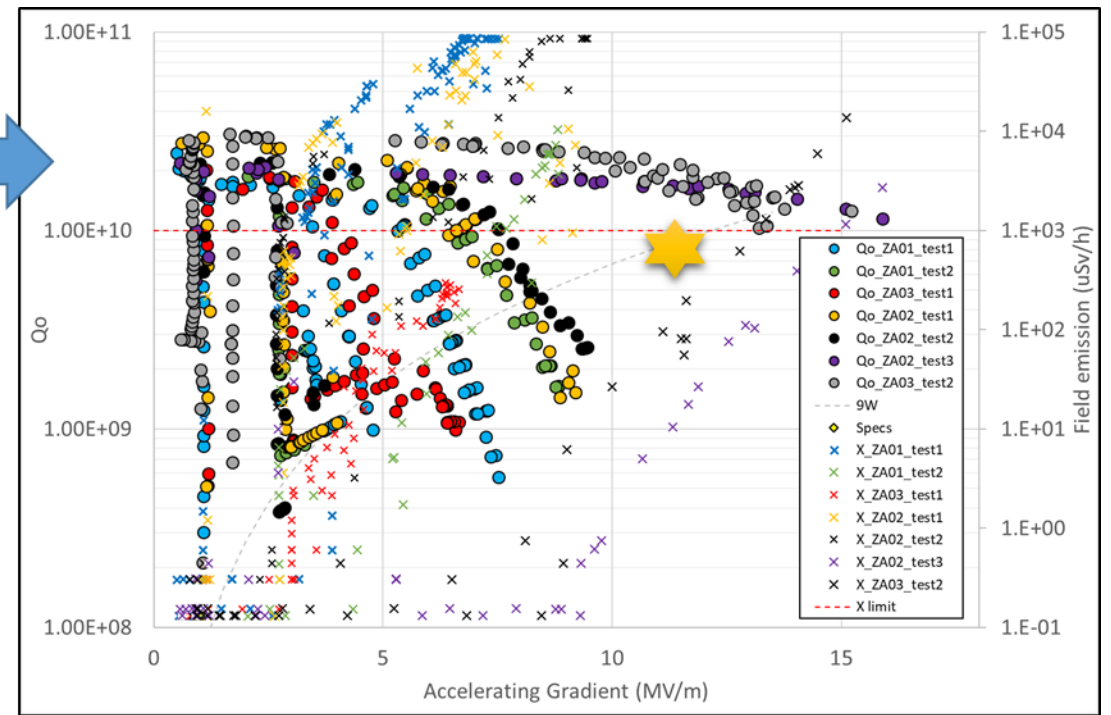


# Cavités prototypes: résultats

- Beaucoup de difficultés à valider la première cavité à cause de problèmes de procédure de nettoyage en salle blanche.
- Après amélioration des procédures et outillages, validation de 2 cavités en août.



Résultats entre Octobre 2022-Juin 2023

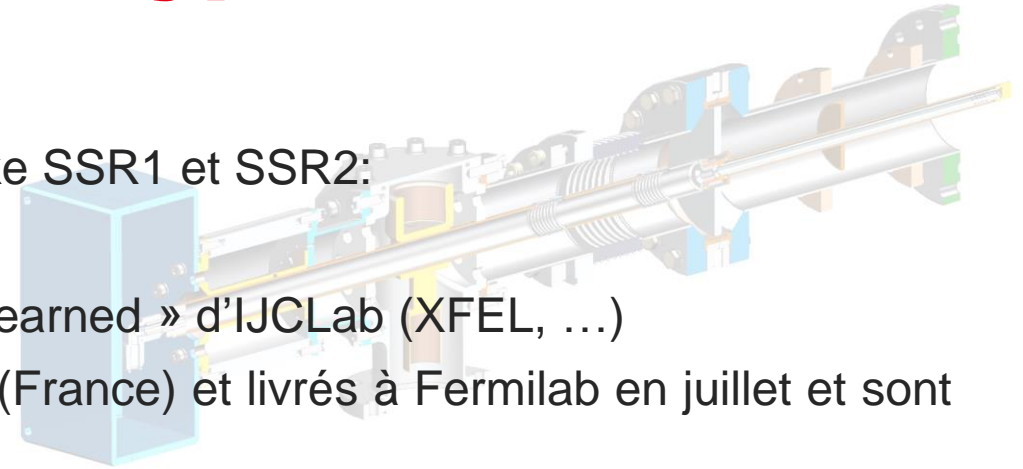


Résultats en septembre 2023

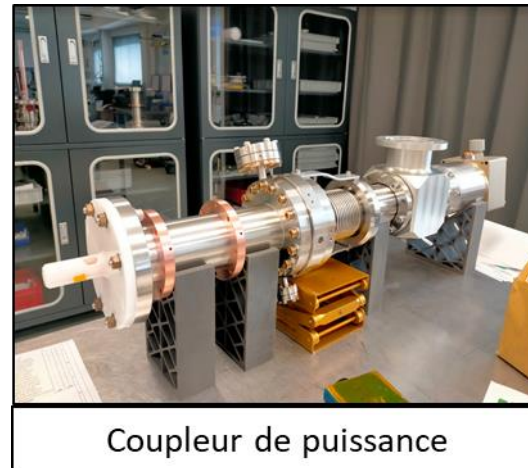


# Coupleurs de puissance prototypes

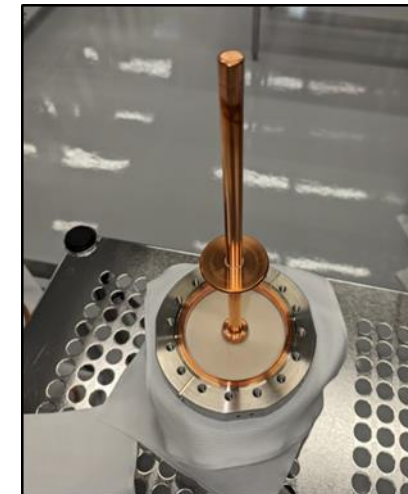
- Coupleurs de puissance identiques pour les cavités spoke SSR1 et SSR2:
  - Design RF: Fermilab
  - Conception mécanique par Fermilab avec « lessons learned » d'IJCLab (XFEL, ...)
- Les 4 coupleurs prototypes ont été fabriqués chez PMB (France) et livrés à Fermilab en juillet et sont en cours de réception.



Electromagnetic parameter	Value
Frequency, MHz	325
Bandwidth( $S_{11}<0.1$ ), MHz	> 1
Average nominal operating power, kW (CW, @20% reflection)	11
Design and Acceptance Testing power, kW (CW, full reflection, any phase)	12
Loaded Q	5.05E+6 ± 25%
Maximum HV bias, kV	± 5
Ceramic window dielectric loss constant	< 1E-4



Coupleur de puissance



Antenne coupleur

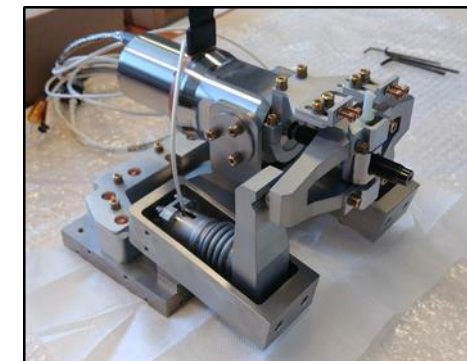
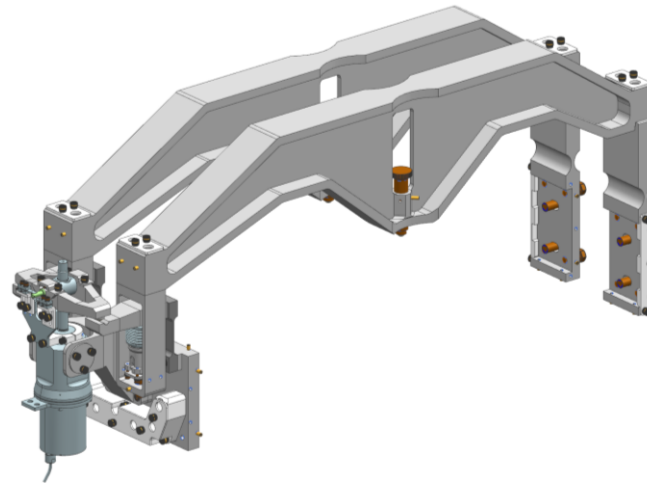


Conducteur externe

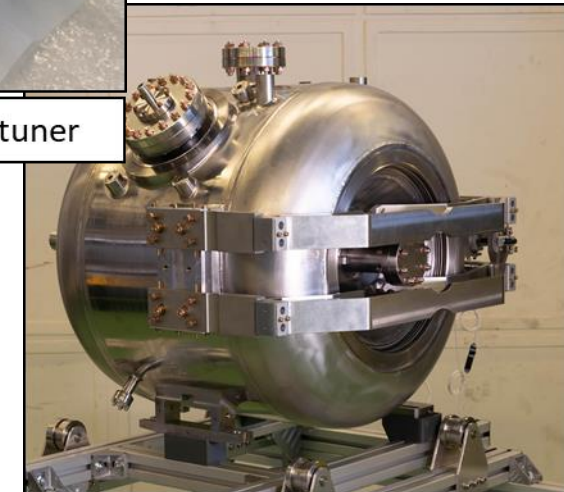
# Systemes d'accord en fréquence prototypes

- Systemes d'accord identiques pour les cavités spoke SSR1 et SSR2:
  - Conception mécanique par Fermilab
- Les 5 tuners prototypes ont été fabriqués chez PSI (France) et 3/5 ont été testés et validés à froid

TRS parameter	Value	FDR results
Tuner passive stiffness, kN/mm	$\geq 30$	<b>36.2</b>
Slow tuner frequency range, kHz	$\geq 130$	<b>157</b>
Stepper motor resolution, Hz/step	$\leq 9.5$	<b>3.7 (4.8 max)</b>
Maximum force on the spindle system, N	1300	<b>1293 (for 157 kHz)</b>
Piezo tuner frequency range, Hz	$\geq 700$	<b>1136</b>
Piezo tuner frequency resolution, Hz	$\leq 0.5$	<b>✓</b>
Maximum operating force (each piezo capsule), N	2000	<b>1863</b>



Cartouche moteur tuner



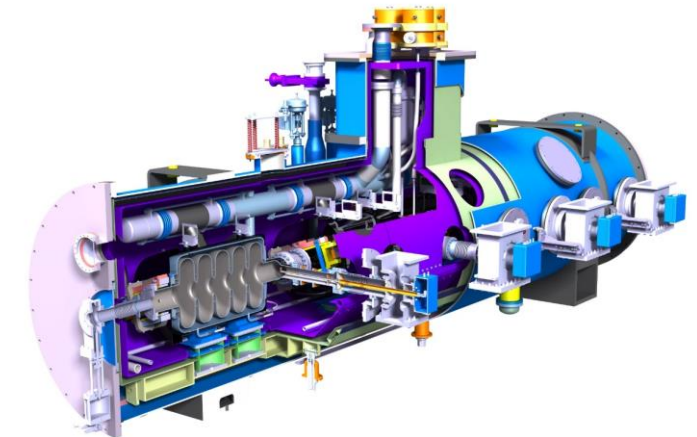
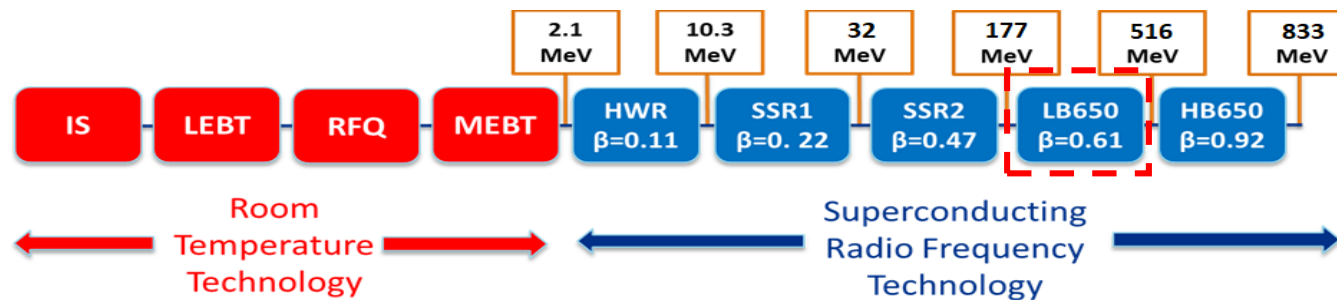
Cavité et tuner



# 3 ■ Contribution du CEA

# Contribution du CEA au projet PIP-II

- Le CEA est entré dans la collaboration PIP-II en 2018.
- La contribution du CEA au projet PIP-II est bien définie depuis fin 2020, avec une subvention alloué par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.
- Elle se concentre sur la section accélératrice supraconductrice 'low-beta' LB650 incluant 9 cryomodules à 4 cavités elliptiques  $\beta=0.61$ . Elle comprend la conception, fabrication et qualification de 10 cryomodules LB650, soit 1 cryomodule de pré-production et les 9 cryomodules de l'accélérateur. Les 40 cavités, 40 coupleurs et 40 systèmes d'accord équipant ces cryomodules seront mises à disposition du CEA par Fermilab, après leur test de qualification.





# Contribution du CEA: détails

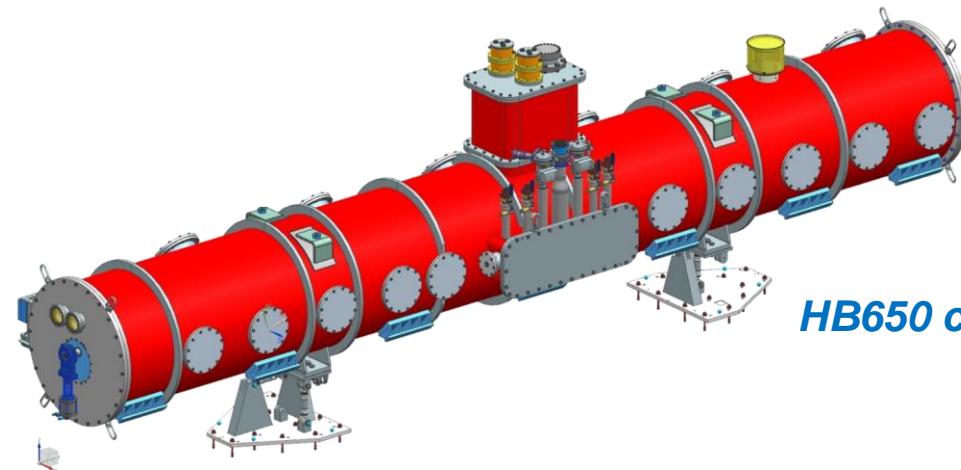
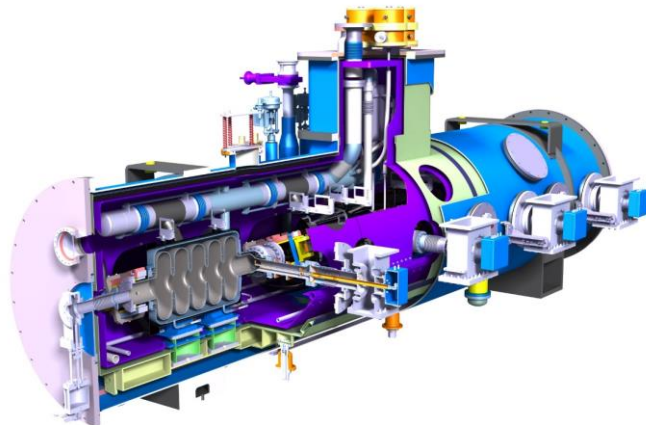
- Dans le détail, elle se décompose de la manière suivante :
  - La participation à la conception des cryomodules HB650, sous la responsabilité de Fermilab
  - La conception des cryomodules LB650
  - La fourniture de la plupart des composants des 10 cryostats (i.e cryomodule sans les cavités et coupleurs de puissance): enceintes à vide, écrans thermiques, blindages magnétiques, système de supportage des cavités, circuiterie cryogénique ...
  - L'adaptation des plates-formes d'assemblage et de test des cryomodules aux besoins de PIP-II
  - L'intégration et la qualification RF à froid des 10 cryomodules
  - La conception, la fabrication et la qualification de trois cadres de transport
  - La mise à disposition des 10 cryomodules avant transport

# LB650 cryomodule: design strategy

## ■ LB650 & HB650 Cryomodules:

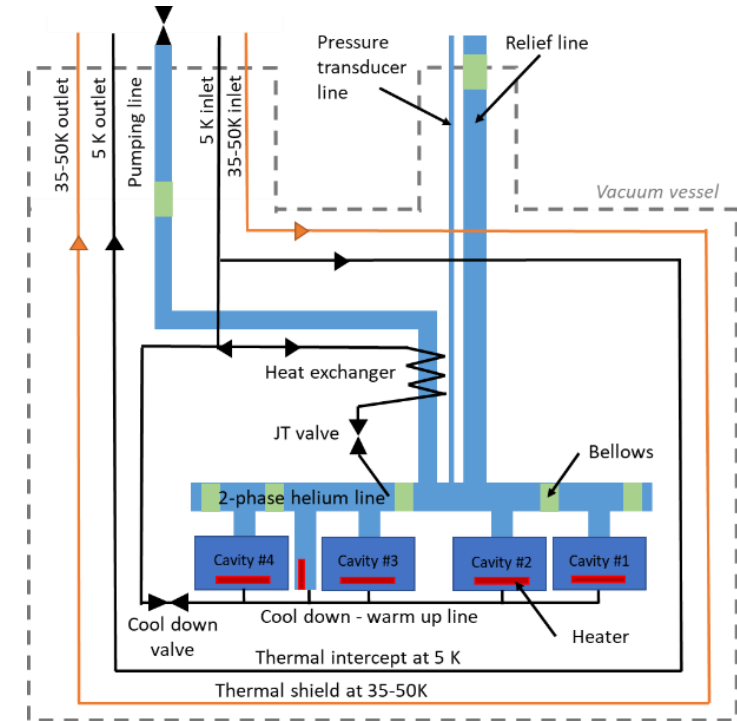
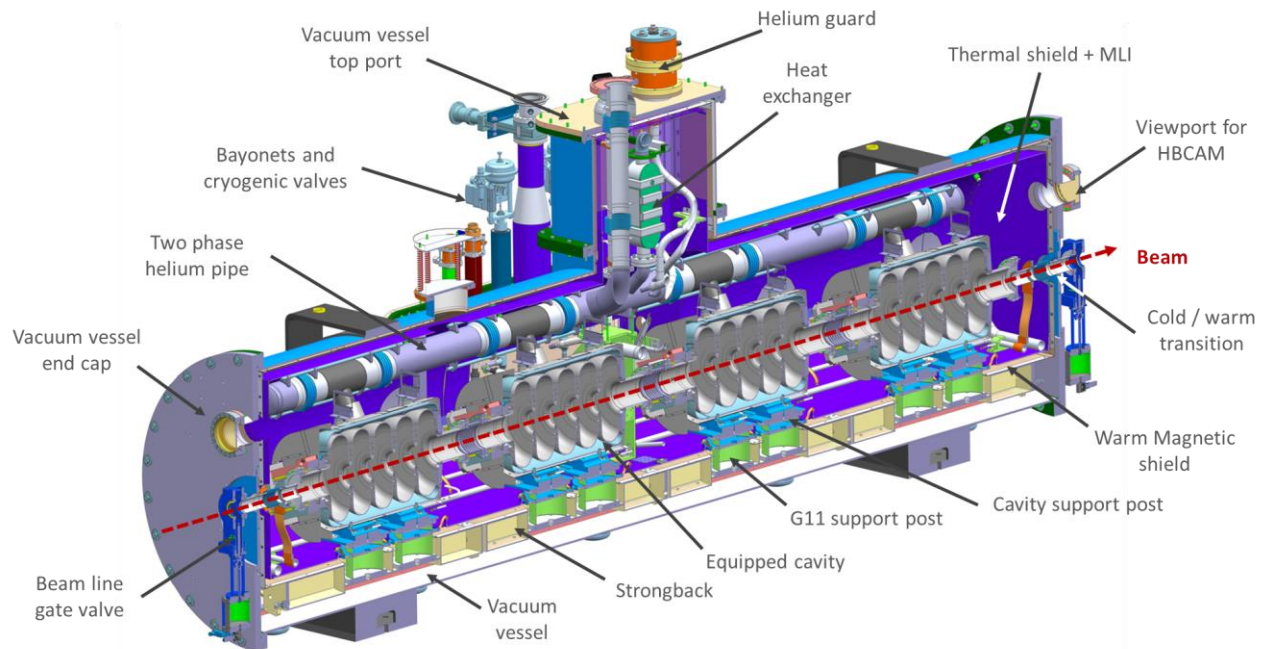
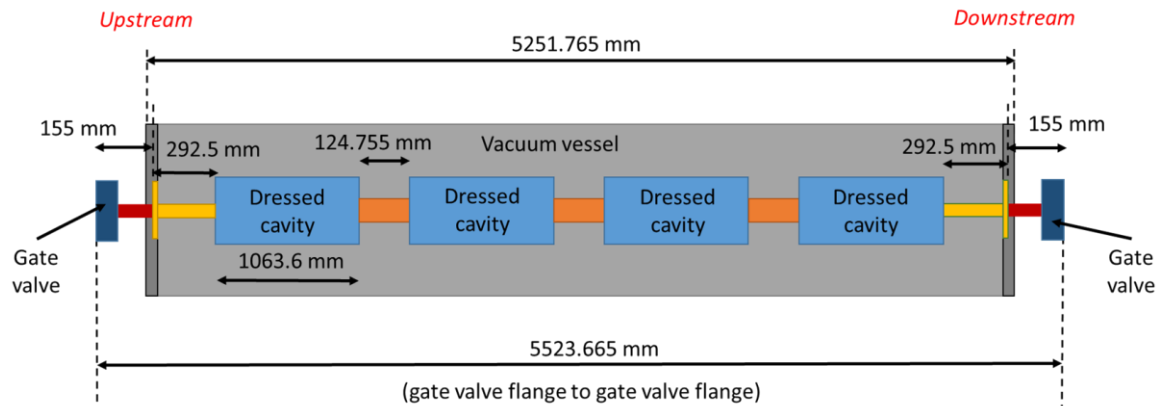
- Same cavity design:  $\beta = 0.61$  for LB650 cryomodule and  $\beta = 0.92$  for LB650 cryomodule
  - Same power coupler
  - Similar frequency tuning system
  - Similar configuration: 4 cavities for LB650 cryomodule, 6 cavities for HB650 cryomodule
  - Similar layout for the cryogenic circuits
- CEA part of the HB650 integrated design team with the responsibility of thermo-mechanical design of the strongback

*LB650 cryomodule*



*HB650 cryomodule*

# LB650 cryomodule



- Working temperature of the cavities: 2 K
- Working pressure in the cavities ~ 30 mbar
- 5 K line to cool down the cold mass but also used as thermal intercept
- Thermal shield at 35 – 50 K and cooled with pressurized helium gas
- Maximum Allowable Working Pressure (MAWP):
  - Cold mass: 4.1 bar (at cold)
  - Thermal shield: 24 bars

# LB650 cryomodule: statuts

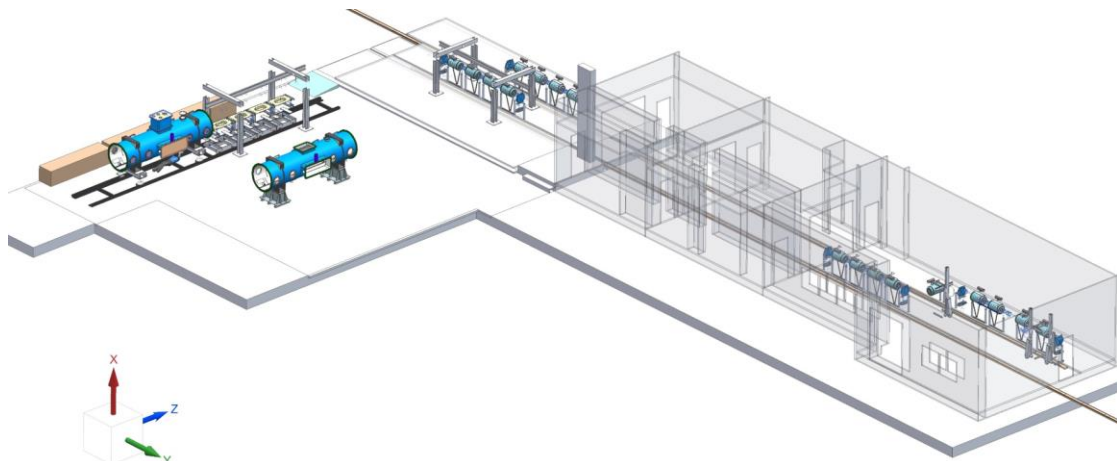
- Du fait des fortes similarités entre les cryomodules HB650 et LB650, du personnel CEA est allé à de multiples reprises à Fermilab sur 2022 et sur le premier semestre 2023 pour suivre l'assemblage et les tests du cryomodule prototype HB650 et ainsi que les tests de transport avec charge (en prévision du transfert du cryomodule prototype vers UKRI-STFC)
  - Enormément de discussions intéressantes entre les équipes CEA et Fermilab
    - sur les procédures d'assemblage, le design du cryomodule et les outillages
    - sur les procédures de tests et le matériel afin d'uniformiser les équipements et les protocoles de tests entre le CEA et Fermilab
  - Retours d'expérience implémenté sur le cryomodule LB650 et son cadre de transport
- Retours d'expérience du cryomodule prototype HB650 implémentés sur le cryomodule LB650
- Revue finale de conception du cryomodule LB650 passée avec succès en avril, marquant la fin de la phase de conception et le début de la phase de construction du cryomodule de pré-production



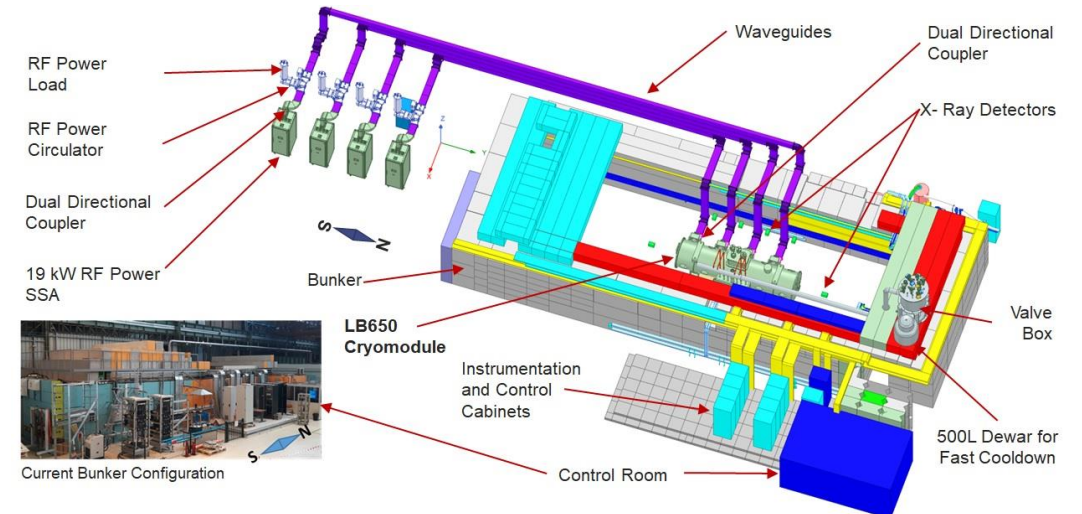
# Infrastructures

- Mise à niveau aux besoins du projet PIP-II des plates-formes d'assemblage et de test de cryomodules utilisées actuellement pour le projet ESS

- Prise en compte du retour d'expérience de l'assemblage du cryomodule prototype HB650 à Fermilab
- Organisation des différents postes de travail afin de pouvoir assembler trois cryomodules en parallèle
- Adaptation des outillages utilisés pour l'assemblage des cryomodules XFEL et ESS, R&D sur la cobotisation

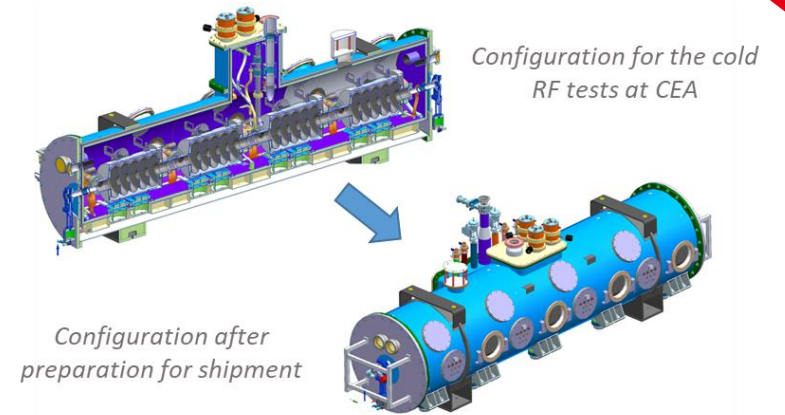


- Nouvelle boîte froide pour l'installation Supratech (marché Air Liquide en cours) et distribution cryogénique (appel d'offre lancé prochainement)
- Approvisionnement de quatre amplificateurs à état solide auprès de la société Jema France
- Amélioration de la protection radiobiologique

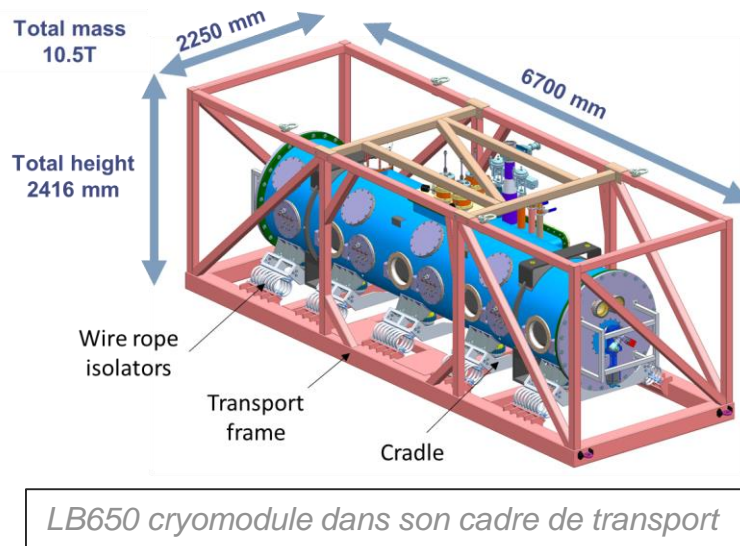


# Cryomodule: transport

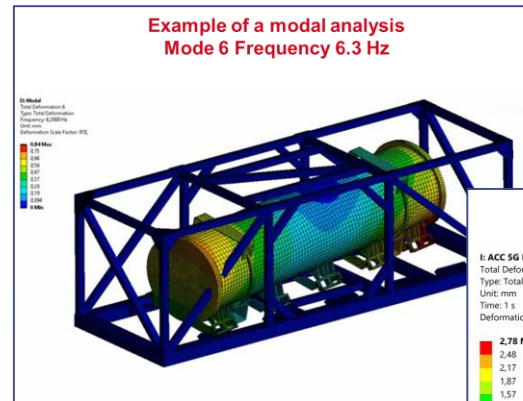
- Reconfiguration du cryomodule avant le transfert entre la France et les USA: démontage de la partie supérieure



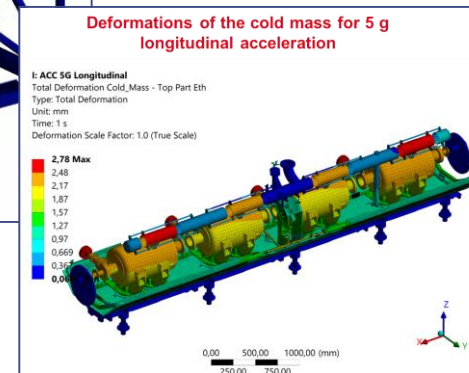
- Conception et fourniture de trois cadres de transport sur la base de celui du cryomodule HB650, avec prise en compte du retour d'expérience des tests effectués avec dummy load



LB650 cryomodule dans son cadre de transport



Simulations dans le cadre des études de transport



Tests avec la dummy load: transfert par avion entre les USA et le Royaume-Uni (courtesy of Fermilab)



# 4. Conclusion

# Conclusion

- Du fait de la forte expérience du CNRS et du CEA dans la conception, la fabrication et la qualification de composants de cryomodules, ainsi que dans l'assemblage et les tests de ceux-ci, ces deux instituts français sont des partenaires majeurs de Fermilab pour la réalisation de l'accélérateur linéaire supraconducteur PIP-II.
- La contribution de la France au projet PIP-II est bien définie depuis fin 2020, avec une subvention allouée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et l'inscription en 2021 des projets DUNE et PIP-II sur la Feuille de route nationale des infrastructures de recherche.
- La collaboration scientifique et technique est très bonne et très enrichissante (beaucoup d'échanges de savoir faire entre les laboratoires et dans les 2 sens!), permettant ainsi de respecter les engagements des instituts malgré les difficultés rencontrées.
- Les contributions françaises à l'accélérateur PIP-II et au détecteur DUNE font ou feront appel à des nombreux sous-traitants industriels en France.
  - Les entreprises françaises ayant contribué à la phase prototypage des coupleurs de puissance et des systèmes d'accord pour les cryomodules SSR2 seront sollicitées par Fermilab pour répondre à l'appel d'offre série.



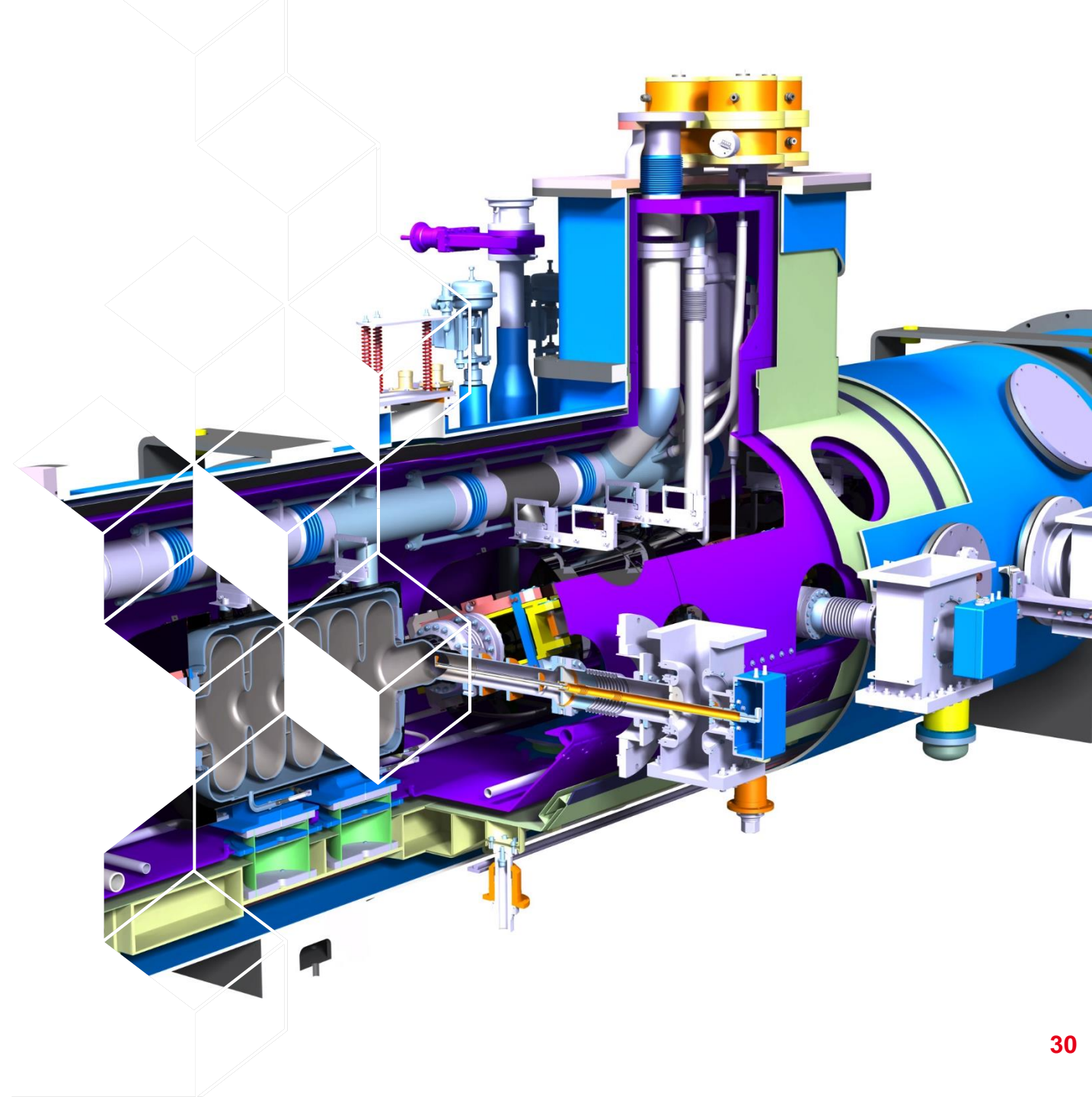
# Planning

- Contribution IN2P3
  - Entrée en phase série en 2024, les premières cavités sont attendues début 2025.
  - Livraison des dernières cavités de série à Fermilab après qualification à IJCLab: premier trimestre 2027.
- Contribution CEA
  - Appels d'offres en cours pour la réalisation des composants des cryomodules
  - Assemblage et qualification du cryomodule de pré-production entre le dernier trimestre 2024 et dernier trimestre 2025
  - Livraison du dernier cryomodule de production à Fermilab: début 2028
- 2029: premier faisceau de neutrinos produit par l'accélérateur PIP-II



# Thanks for your attention

Nicolas Bazin  
CEA SACLAY  
91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
France  
[nicolas.bazin@cea.fr](mailto:nicolas.bazin@cea.fr)





Institut national de  
physique nucléaire et  
de physique des particules

# Thanks for your attention

David LONGUEVERGNE

CNRS / IN2P3 / IJCLab

91400 Orsay

France

[david.longuevergne@ijclab.in2p3.fr](mailto:david.longuevergne@ijclab.in2p3.fr)

