

Cryogénie à l'IJCLab

Séminaire réflexions prospectives sur les besoins en cryogénie à l'IN2P3

P. DUTHIL (pour les collègues d'IJCLab)
duthil@ijclab.in2p3.fr

20 Septembre 2023



Plan

❖ I- Activités et perspectives

- I-1 Accélérateurs supraconducteurs de particules
- I-2 La plateforme Supratech et son opération
- I-3 R&D
- I-4 Détecteurs cryogéniques

❖ II- Organisations des activités et des métiers

- II-1 Le Service Cryogénique
- II-2 Le Service Détecteurs Cryogéniques de particules et Instrumentation associée (SDCI)

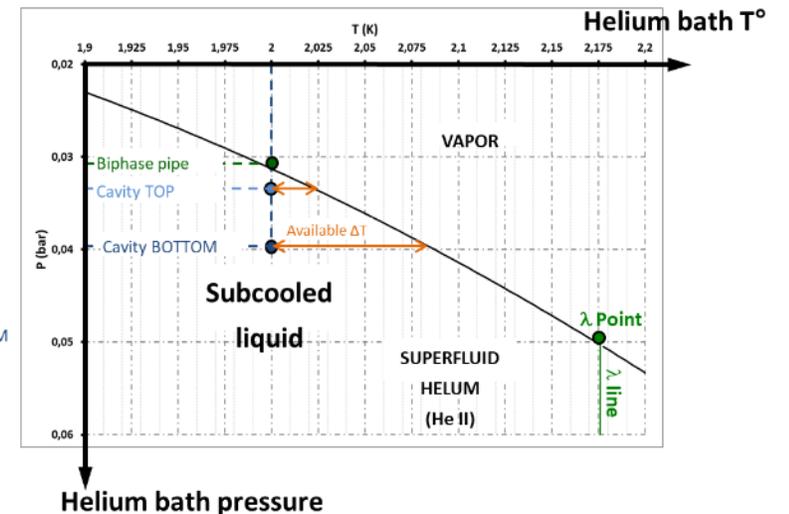
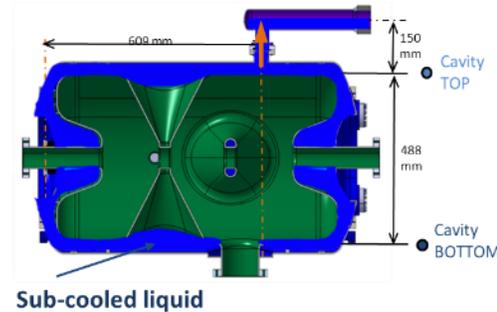
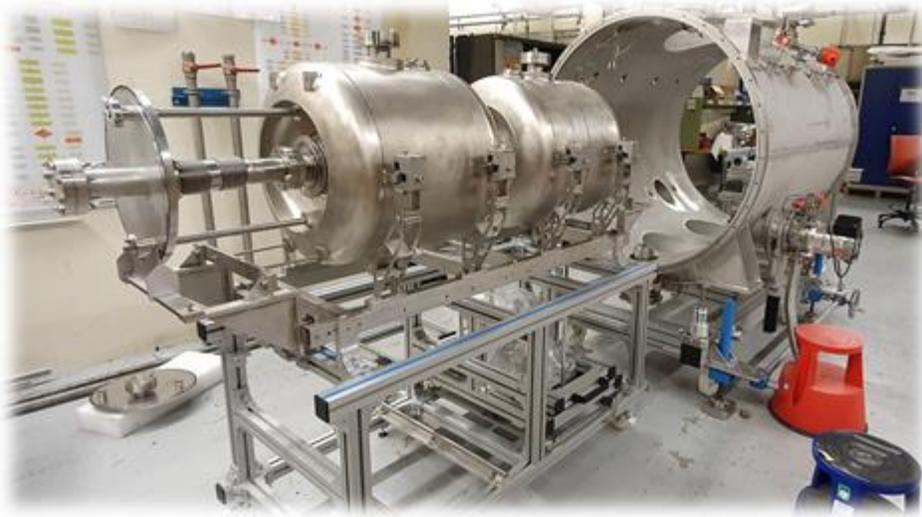


I-1 ACTIVITES – Cryogénie pour les accélérateurs supraconducteurs de particules

❖ Technologie de refroidissement de cavités SRF

➤ Objectifs :

- opérer les cavités SRF en bain d'hélium saturé (normal ou superfluide) = définir les conditions opératoires ; dimensionner l'échange thermique pour chaque nouvelle cavité ou cryomodule conçu(e)



→ Connaissance des transferts thermiques : transfert thermique aux interfaces hélium superfluide /solide (Pôle Accélérateurs : collaboration LIMSI-CNRS ; en pause actuellement);

- proposer des nouvelles solutions technologiques au refroidissement des cavités

→ exemple du Projet Fabacc : nouvelles technos de refroidissement de cavités SRF par impression 3D

➤ Technos : bains saturés ^4He (1,6 K à 4,2 K) et N_2 , vide et ultra-vide



I-1 ACTIVITES – Cryogénie pour les accélérateurs supraconducteurs de particules

❖ Participation à la construction d'accélérateurs supraconducteurs :

Spiral 2 (2004-2013), **ESS (2014...)**, Myrrha (Max 2011-14, Myrrha 100 MeV 2016, **Minerva 2016...**), PIP2 (2018...)

- Responsabilité de projets au sein de collaborations internationales (resp. d'accords, sous-systèmes)
- Conception, fabrication et tests de cryomodules = briques élémentaires des accélérateurs supras basées sur les technologies de cavités accélératrices supraconductrices radiofréquences (SRF)
- Définition et suivi AQ



Cryomodules ESS Spoke dans le tunnel de l'accélérateur (Septembre 2023)



I-1 ACTIVITES – Cryogénie pour les accélérateurs supraconducteurs de particules

❖ Servitudes cryogéniques dédiées aux opérations des cryomodules en tests ou sur accélérateurs :

- Conception et réalisation (surtout suivi de) : boîtes à vannes, lignes de transferts, instrumentation et C&C
- Définition, déploiement et exploitation des sites de tests pour des cryomodules prototypes : à IJCLab, à l'université d'Uppsala (Suède)
- Installation et tests sur site



Cryomodule ESS Spoke proto et sa boîte à vanne de test



Cryomodule Myrrha Spoke proto, sa boîte à vanne de test et son armoire de C&C



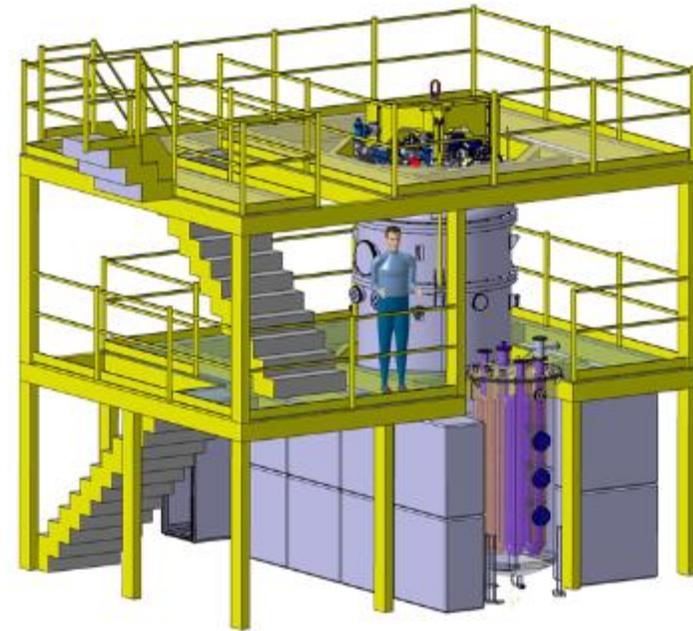
Distribution cryogénique de la section Spoke du linac d'ESS



I-1 ACTIVITES – Cryogénie pour les accélérateurs supraconducteurs de particules

❖ Tests de composants accélérateurs :

- Contexte : mission opérationnelle de la plateforme Supratech dédiée aux développements de composants supraconducteurs radiofréquence
- Conduite des essais de cavités SRF à une T° de 1,6 à 4 K en cryostat vertical = injecter de la puissance RF et mesurer les propriétés électromagnétiques ; = exploitation des équipements
- Développement et déploiement des infras cryos dédiées (cryostats, stockage liquide, lignes de transfert cryos, sites de test, C&C, systèmes de pompage vide et UHV)
- Moyens disponibles :



CV800: cryostat vertical de test de cavités ; \varnothing 800 mm ; T° : 1,6 à 4K

CV1250: cryostat vertical de test de cavités ; \varnothing 1250 mm ; h=4,90 m ;
 T° : 1,6 à 4K ; pas encore opérationnel



I-1 ACTIVITES – Cryogénie pour les accélérateurs supraconducteurs de particules

❖ Tests de composants accélérateurs :

➤ Conduite des essais des Systèmes d'Accord à Froid des cavités (SAF)

- courbes de réponse stat et dyn (signal vs dpcmt et réponse de la cavité)
- tests en fatigue des Systèmes d'Accord à Froid des cavités (SAF)

➤ Moyen disponible :



Boite à SAF :

cryostat de tests et de qualification, à la T° du LN₂, de système d'accord en fréquence pour cavité SRF



I-1 ACTIVITES – Cryogénie pour les accélérateurs supraconducteurs de particules

❖ Perspectives :

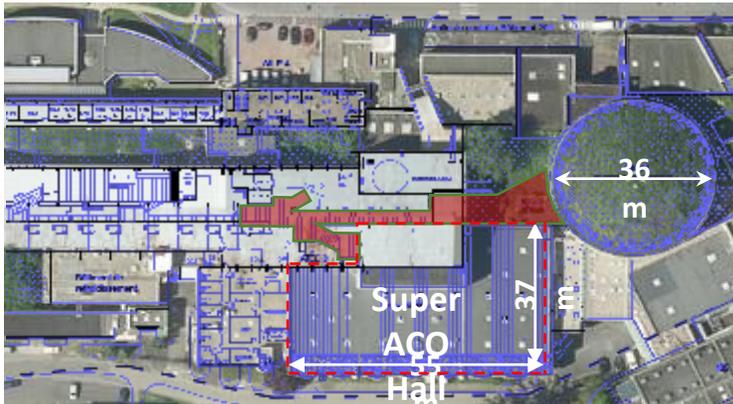
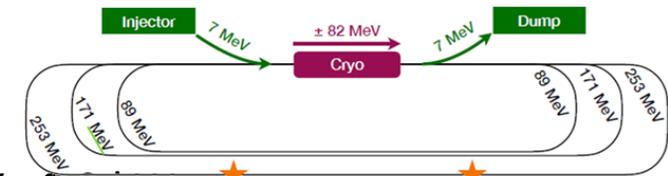
- **Projet PI2 - SSR2 (Mi 2024 – Mi 2026)** : 33 cavités SRF à qualifier en cryostat vertical pour la construction de l'accélérateur
- **Myrrha (2024-2036)** : test de 47 (+ 16) systèmes d'accord à froid



Cavité Spoke PIP2SSR2

➤ **PERLE@Orsay (250 MeV) (2022-28)** :

- Energy Recovery Linac : 3 tours, 250 MeV, 20 mA
- Construction de cet accélérateur envisagée à l'IJCLab
 - Usine et distribution cryogénique : charges thermiques @2 K ~0,3 kW ;^{IP}
 - Cryogénie du cryomodule et du booster



2 sites possibles à l'IJCLab

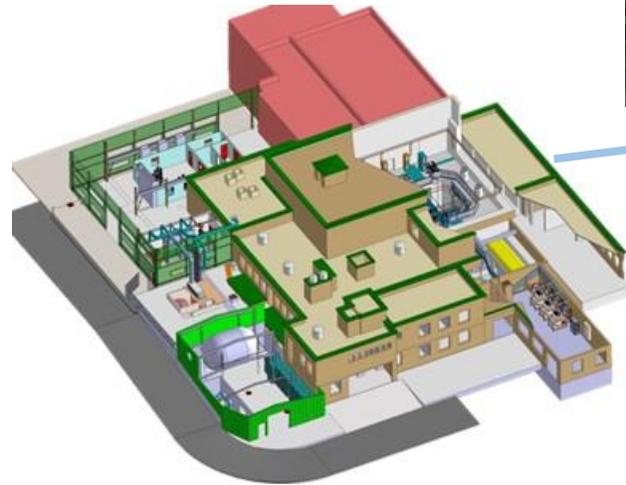


Boite Froide 0.3 kW @ 2 K BESSY
VSR Helmholtz-Zentrum Berlin



I-2 PLATEFORME SUPRATECH – Infrastructures cryogéniques

- ❖ Infrastructures cryogéniques de la plateforme Supratech
 - Zones expérimentales (= zones de tests)
 - Zones de l'usine cryogénique (cycle de production LHe/récupération He +LN2)



Bâtiment 106



Bâtiment 103

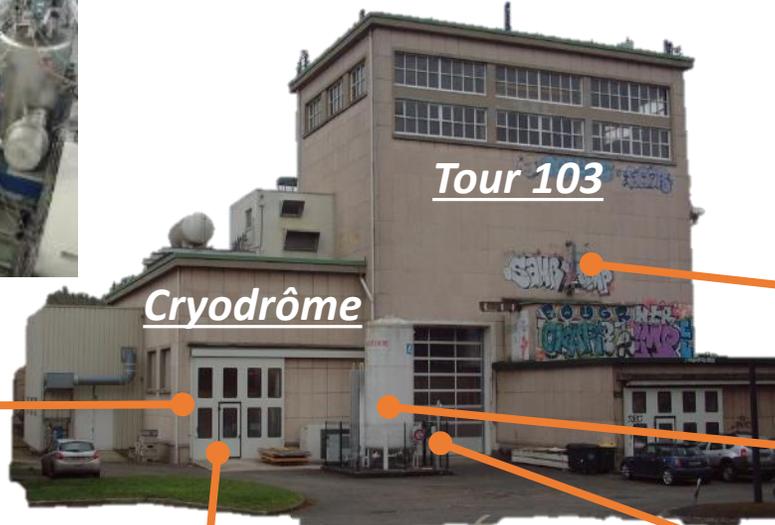


I-2 PLATEFORME SUPRATECH – Infrastructures cryogéniques

❖ Implantation bât 103



Spiral 2



Tour 103

Cryodrome



Dewar 2800 LHe

Balances

Liquéfacteur LINDE L70

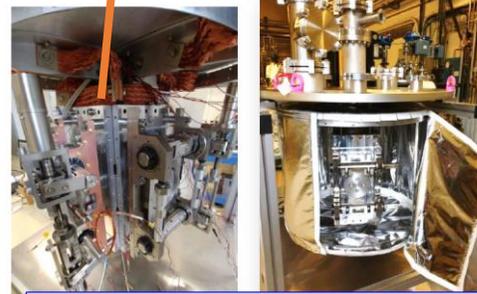
1^{er} étage tour 103 : production de LHe

Réservoir 7500 LN₂



Zone expérimentale «le Cryodrome»

Hall de test cryogénique
10W@2K, 20W@2K, 40W@2K
Cryostats : Ø800, Ø350, Ø100

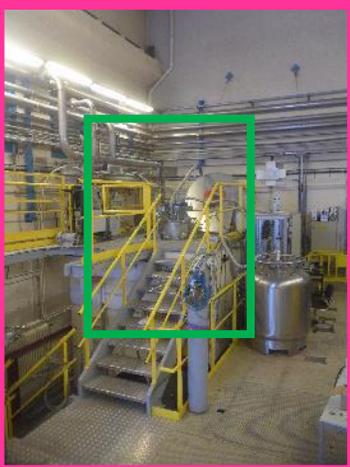


LN2 cryostat & Insert (T=77 K)
Testing of four FACTS

Zone expérimentale « le Cryodrome » (Boite à SAF)



Station d'étalonnage



CV800

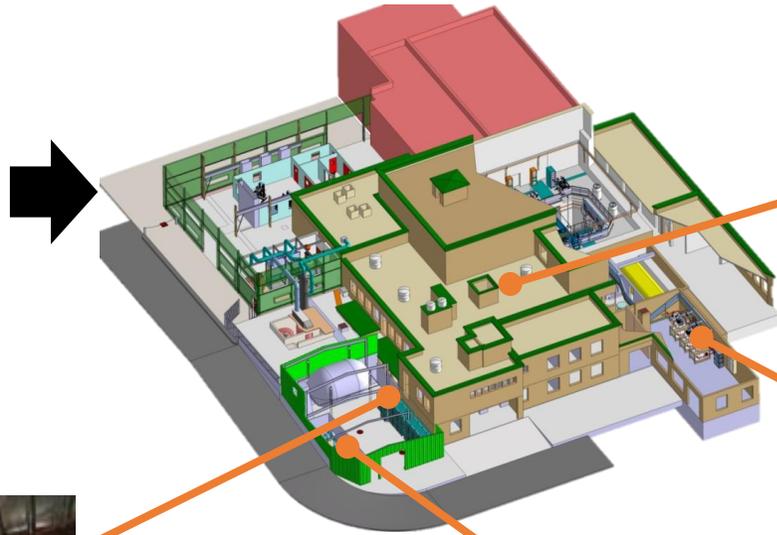


CVs 350
et 100



I-2 PLATEFORME SUPRATECH – Infrastructures cryogéniques

❖ Implantation bât 106



Hall de test cryogénique (et Puissance RF)



Groupes de pompage hélium 106
40 W@2K, 80 W@2K (~100 kW élec)



Compresseur GHe
200 bars 90 Nm³.h⁻¹x2



Récupération et stockage haute pression
(180 bars) (5 400 m³ ~ éq. 7 300 L LHe)

Cycle de l'hélium (usine cryogénique): récupération de l'hélium et stockage gaz



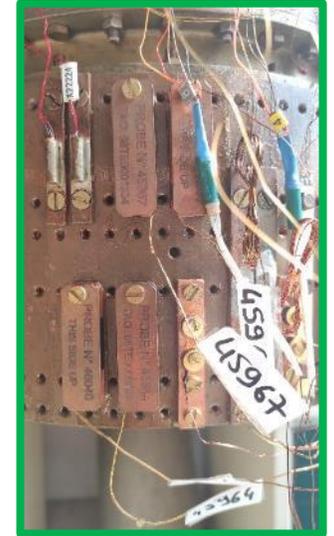
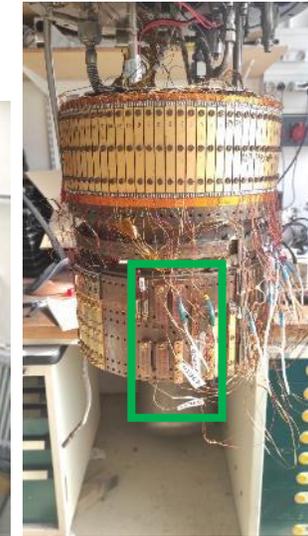
I-2 PLATEFORME SUPRATECH – Bancs de caractérisation

❖ Station d'étalonnage de thermomètres cryogéniques

➤ Gamme d'étalonnage : 1,6 à 300 K

➤ Exactitude :

- ± 10 mK à 4,2 K (LHe)
- ± 15 mK à 20 K (LH₂)



Insert d'étalonnage sous vide:

75 thermomètres

4 sondes-étalons de travail (RhFe)

❖ Contexte :

➤ 2 stations de ce type dans le monde (Lakeshore, USA)

➤ Besoins :

- thermomètres hélium : marché fluctuant (dépend des machines en construction)
- Transition énergétique : accroissement du marché de l'hydrogène
→ augmentation des besoins en thermomètres 20 K (valo) ?

➤ **Problématiques d'exploitation**

- Station vieillissante → Jouvence nécessaire (C&C + méca)
- RH : difficulté à recruter (et à maintenir) des RHs pour l'exploitation des bancs
- Proposition de transférer cette station au GANIL



Insert et station

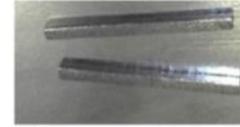


I-2 PLATEFORME SUPRATECH – Bancs de caractérisation

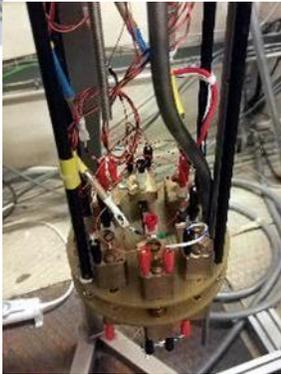
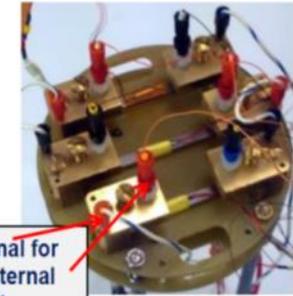
❖ Mesure de RRR (en exploitation)

- RRR = residual electrical resistivity ratio = $\rho_{T=273\text{ K}} / \rho_{T=4\text{ K}}$: on mesure la résistivité électrique d'un échantillon en fonction de la température
→ indicateur de la pureté du matériau (chimique et cristalline)
- Update = (AP Héloïse - MAVERICS) : mesure par courants de Foucault

Niobium samples
Dimensions (4x5x80)

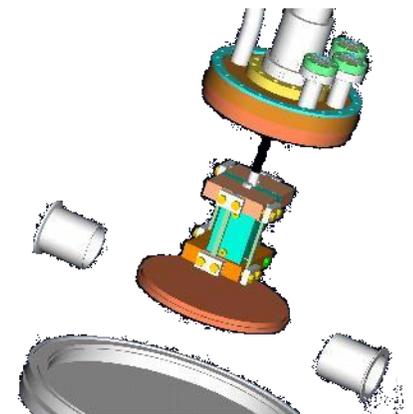
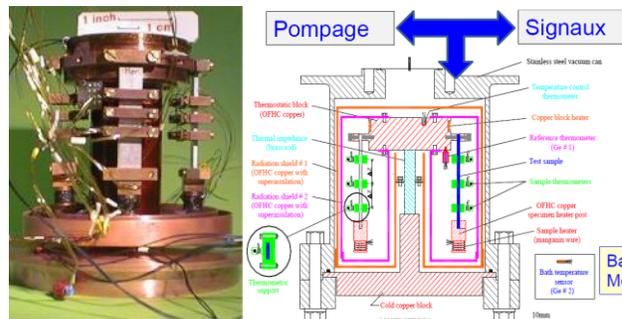


Four electrodes: 2 external for sensing current and 2 internal for voltage measurement.



❖ Mesure de conductivité thermique (update en cours et à remettre en exploitation)

- Plage : 4 K – 300 K



❖ Banc de mesure de $T_{critique}$ (supras) et C_p (AP Héloïse – équipe MAVERICS + PACIFICS)



I-2 PLATEFORME SUPRATECH – L’approvisionnement et la distribution des cryofluides

❖ Azote liquide :

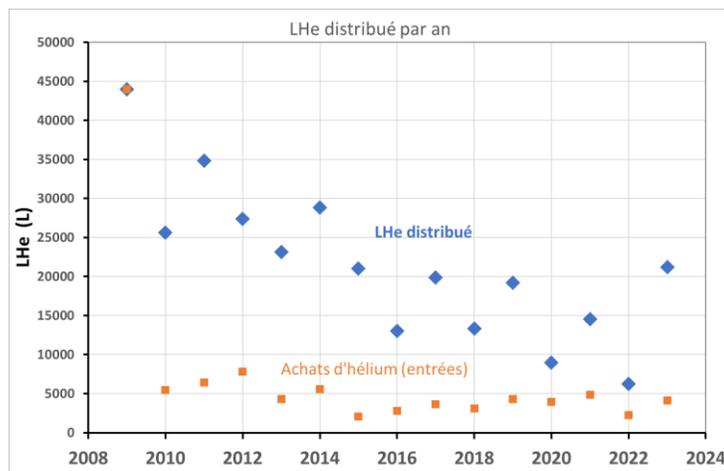
- Stockage fixe de 7 m³ à Supratech rempli périodiquement par le fournisseur : en moyenne 50 000 L/an
- Stockage fixe de 5 m³ à Alto rempli périodiquement par le fournisseur
- Dewars mobiles de LN2 (Supratech) :

2x 600 L + 2x 200 L+ récipients de tests, etc. AUCUN RECIPIENT TRANSPORTABLE SUR ROUTE

❖ Hélium liquide :

- Stockage fixe de 3 000 L à Supratech rempli avec le liquéfacteur
- Dewars LHe (Supratech) :

2x 1000 + 3x 500 + 1x 450 + 2x250 + 2x 100, etc. AUCUN RECIPIENT TRANSPORTABLE SUR ROUTE



Prix de l’hélium en forte augmentation :

- pour l’hélium liquide :
 - entre 2021 et 2022 : facteur 2 ;
 - entre 2021 et 2023 ; facteur 3 pour le moment ; to be continued...
- pour l’hélium gaz :
 - Entre 2021 et 2022 : facteur 1 (pas d’augmentation car hausse limitée par le marché en souscrit) ;
 - entre 2021 et 2023 : facteur 3 en théorie car pas de livraison effective pour le moment



I-2 PLATEFORME SUPRATECH – L’approvisionnement et la distribution des cryofluides

❖ Acheminement helium bât 103 <-> 106

➤ Transport des bouteilles pleines de LHe au Fenwick sur 200 m



➤ Retour du gaz par galerie technique



I-2 PLATEFORME SUPRATECH – Evolution des infrastructures cryogéniques

❖ Fiabilisation :

➤ de la production et de la distribution d'hélium (disponibilité du produit vs coûts financiers et humains)

- Extension des stockages gaz et liquides (flexibilité de fonctionnement et sécurisation des appros He)
- Gestion de la Maintenance + AQ
- Stratégies d'approvisionnement et de partage de l'hélium : développement de la mise en réseau pour :
 - Approvisionner en gaz ou en liquide
 - Récupérer l'hélium gaz dans le laboratoire et au-delà (Groupe de travail de l'université de Paris-Saclay)

➤ des bancs cryos de Supratech

- Upgrade des équipements (exemple du CV800 cette année)
- Gestion de la maintenance + maj PAQp

❖ Développement des zones d'expérience :

- Besoin d'aménager des espaces existants pour accueillir les activités de R&D de cryogénie (voir plus loin) dont la cryogénie sèche (bancs de caractérisation, Equipex PACIFICS, cibles)
- un nouveau cryostat vertical (de test de cavités SRF) est à rendre opérationnel



I-2 PLATEFORME SUPRATECH – Evolution des infrastructures cryogéniques

❖ Amélioration des caractérisations réalisées :

- Par modification de la méthode de caractérisation (exemple du RRR)
- Et/ou évolution des chaînes de mesure ou du C&C

❖ Renforcement de la cryogénie sèche

- Toutes ces cellules de caractérisation fonctionnent en bain d'hélium liquide saturé (pompé ou non)
 - utilisation facilitée à IJCLab (liquéfacteur)
 - mais nombreuses contraintes : (logistique complexe, coût croissant de l'hélium)

→ limiter l'utilisation de cryofluides

→ préférer des réfrigérateurs cryogéniques autonomes (qui ne nécessitent pas de fluides cryogéniques ou de les re-remplir périodiquement)

❖ Extension la plage de température de caractérisation vers les plus basses températures

→ Application de la cryogénie sèche : à l'évolution de POLAREX: mesure de l'orientation nucléaire à basse température (~10 mK) pour l'étude des propriétés magnétiques des noyaux radioactifs riches en neutrons produits par le faisceau d'ALTO ;



I-3 ACTIVITES - Projets de R&D - NGCryo (2020-24) (Voir prés. J.-P. Thermeau)

Projet financé IN2P3 - Collaboration avec l'APC – A l'IJCLab : Service Cryo + Mavericks

❖ Convergence de thématiques de R&D en un seul banc expérimental :
un banc d'étalonnage de thermomètres pour (dizaine mK) $0,3 \text{ K} < T^\circ < 5 \text{ K}$

➤ **Electronique froide (APC)**

➤ **Caractérisation des matériaux :**

- Conductivité thermique (IJCLab + APC)
- Mesure et modélisation de résistances de contact (IJCLab)

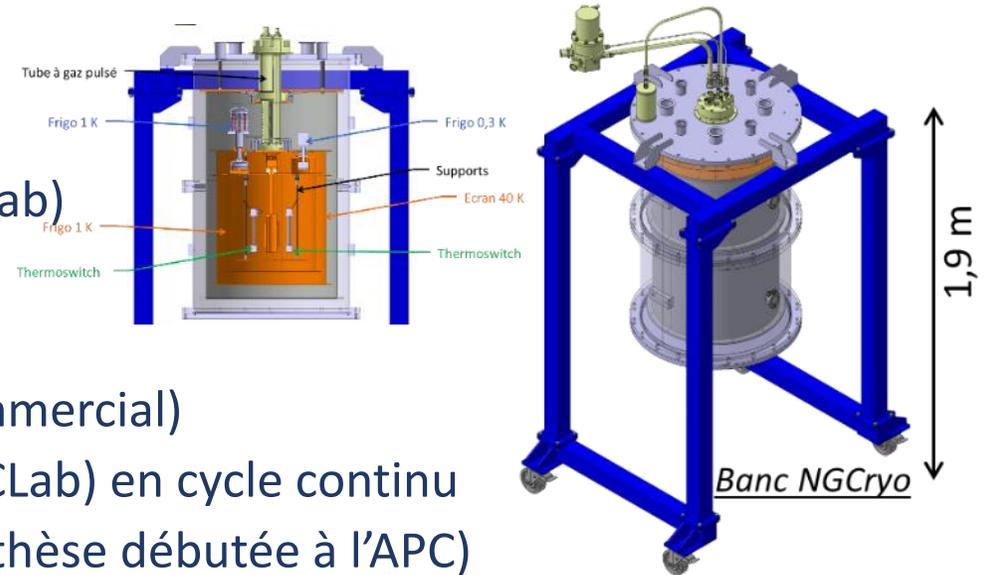
→ développement d'une nouvelle cellule de test

➤ **Cryogénie sèche (autonome) (APC + IJCLab) :**

- $300 \rightarrow 4 \text{ K}$: réfrigérateur de type tube à gaz pulsé (commercial)
 - $4 \rightarrow 0,3 \text{ K}$: 2 puis réfrigérateurs à adsorption (APC + IJCLab) en cycle continu
- dizaine de mK (2^{ème} phase NGCryo) : dilution (sèche) (thèse débutée à l'APC)

➤ **Bancs expérimentaux :**

- Banc NGCryo est installé à l'APC
- Une plateforme de tests des réfrigérateurs a été mise en place à l'IJCLab





I-3 PERSPECTIVES de R&D

- ❖ Equipex PACIFICS (2021-26) Axe 1: aimants chauds et supras (CEA-IJCLab/Maverics + Service Cryo)
 - développement de 3 bancs de R&D et de caractérisation à basse T°
 - Banc de mesures des propriétés élastiques (méthode ultra-son pulse-écho)
 - Banc d'étude de système de refroidissement alternatif pour aimants et cavités
 - Banc à réfrigération sèche
 - Etude des systèmes de transferts thermiques pour aimants et cavités (prolongation du projet Fabacc)
 - Cellule de mesure de Température critique de matériaux supras
 - Cellule de mesure de capacité calorifique
 - Banc d'étude des transferts en bain d'hélium superfluide pressurisé (et instabilité thermo-hydrauliques)

- ❖ ANR ATRACT 2024-29 : développement d'une nouvelle cible cryogénique ^3He

- ❖ Einstein Telescop : projet à lancer de mise en point d'un banc pour les mesures des émissivités (totale hémisphérique et directionnelle), de la diffusivité et de la dilation thermiques à basse température



I-4 ACTIVITES – Cryogénie très basse températures (10 mK – 1 K)

- ❖ Conception, réalisation et test/caractérisation de détecteurs cryogéniques de particules pour la physique des événements rares :
 - détection direct de matière noire
 - décroissance double bêta ($2\nu 2b$, avec/sans neutrinos)
 - scattering cohérent neutrinos-nucléons (cnns)
- ❖ Détection cryogénique de :
 - charges (ionisation-chaleur → SSED)
 - phonons (chaleur)
 - photons (scintillation → SPD)
- ❖ Étude des propriétés (quantique) de matériaux à basses températures :
 - transitions supra-métal-isolant
 - transport électrique/thermique (sous champ magnétique) ...
- ❖ Étude de systèmes anti-vibration pour mesures bas bruit (en environnement cryogénique, machines « dry »)
- ❖ Collaboration avec institutions internationales et partenaire industriel



I-4 ACTIVITES – Cryogénie très basse températures (10 mK – 1 K)

❖ Moyens :

➤ 3 Salles blanches/montage

pour la réalisation par évaporation d'échantillons pour études de physique fondamentale, senseurs quantiques, dépositions sur semi-conducteurs

➤ bonding machines

pour la réalisation de micro-contacts

➤ Infrastructures cryogéniques à l'IJCLab :

- 3 dilution « dry » (autour de 10 mK)
- 2 dilution « wet » (autour de 7 mK)
- cryostats « wet » à 1 K
- Thermométrie primaire (Johnson Noise) et secondaire à basses températures

➤ New CROSS cryogenic facility (C2U) au Canfranc underground laboratory (LSC en Espagne) :

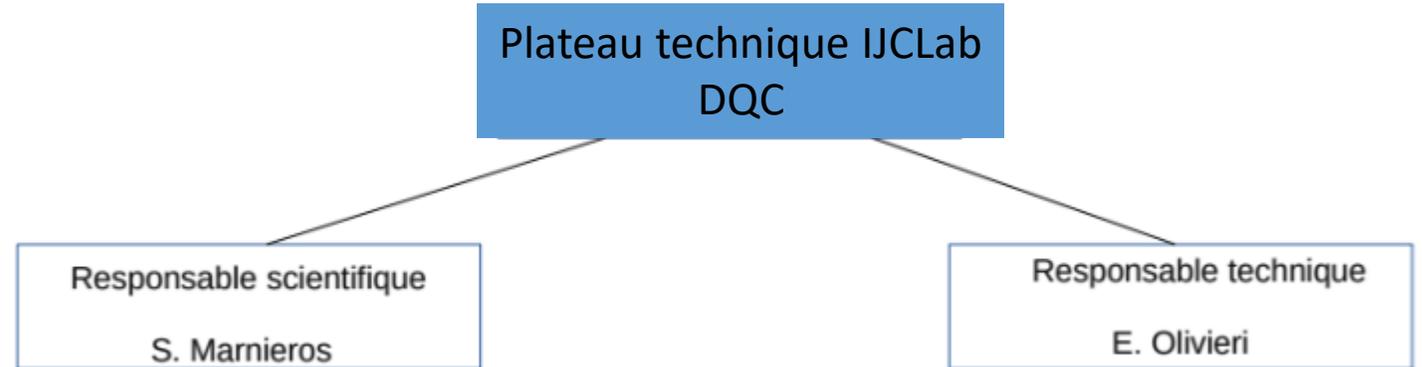
- unité dilution «dry » de forte puissance et volume, au site souterrain de Canfranc, pour expérience CROSS (double bêta).



I-4 PERSPECTIVES – Cryogénie très basse températures (10 mK – 1 K)

❖ Détecteurs Quantiques Cryogéniques (DQC) :

Mise en place d'un plateau technique au niveau du laboratoire



❖ Fonctionnement : activités scientifiques menées par :

➤ le SDCI/DDET

➤ et l'équipe A2C/ASSD de IJCLab

→ la gestion du plateau est donc à la discrétion de ces deux équipes

→ collaborations possibles mais pas de prestations de « service ».

❖ Moyens/infrastructures :

➤ plusieurs responsables/gérants d'équipements (selon la thématique et les machines)



II-1 ORGANISATION DES ACTIVITES : 2 équipes

❖ Pôle Accélérateurs/Service Cryogénie

➤ 10 personnes :

- 9 permanents :
5 IR (1 proche de la retraite), 2 IE, 2 AI (1 en exploitation) et 1 doctorant
- 1 femme - 9 hommes

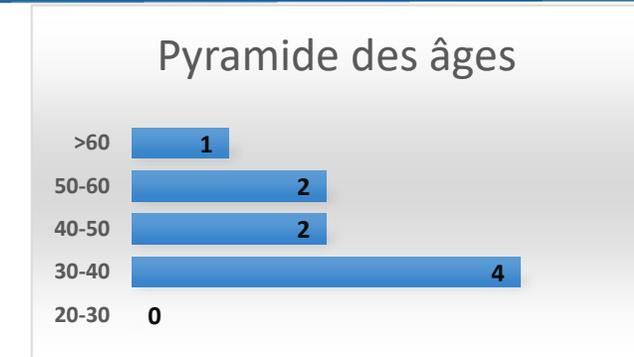
➤ Compétences :

- resp. de projets, mécanique, thermique, instrumentation, modélisation numérique multiphysique, C&C
- besoin de consolider (ou développer) notamment :
la modélisation dynamique des systèmes complexes (muliphysiques) (Thèse sur la fin)
- besoins pour l'exploitation (une des raisons est la pénurie des RHs Supratech)
→ consolider les activités techniques liées à la mise en place et à l'exploitation des dispositifs, à la maintenance

➤ Besoins RH :

- Sollicitations forte du labos (Perle, ET, Dune, Polarex, etc.)
- AI en cours de recrutement (CDD) ; profils recherchés : Mesures Physiques, Thermique, Energétique, Maintenance industrielle
- IR à recruter (CDD ANR) ; profils recherchés : mécaniques, matériaux, énergétique, propulsion
- 1 doctorant demandé pour 2024 (banc mesure d'émissivité)

NB : difficulté à recruter (et à maintenir) les RHs pour l'exploitation des bancs





II-2 ORGANISATION DES ACTIVITES : 2 équipes

❖ Pôle Ingénierie/Service Détecteurs Cryogéniques de particules et Instrumentation associée (SDCI)

➤ 5 personnes : 3 IR, 2 IE (dont 1 proche de la retraite)

➤ Besoins RH SDCI

- besoin croissant d'infrastructures et donc de personnel pour les projets qui exploitent le plateau technique DQC
- forte sollicitation dans les 5 ans à venir (double bêta, cnns, matière noire, physique quantique fondamental) pour nouvelles technologies et bâtir nouvelles installations.

⇒ Demande de personnel permanent : IR, IE (pérennisation des compétences basses-températures et exploitation/maintenance des installation existantes).

Merci pour votre attention



Le Service Cryogénie : OPérations EXtérieures

❖ Coopérations/collaborations principales avec l'extérieur (avec équipes locales, nationales, internationales)

- IJCLab : Supratech, Service RF, MAVERICS, Pôle Physique Nucléaire
- Nationales : IN2P3 (APC), CEA (IRFU/DACM), CEA (DSBT), GANIL, CES,
- Internationales (construction d'accélérateurs) : ESS Lund, SCK Molh (Myrrha)
- Industrielles : ACS (thèse CIFRE en cours) + actions de valorisation

❖ Participation à l'enseignement, à la communication, à la vulgarisation

➤ Enseignement

- Universitaire : IUT Orsay, UFR Mécanique, etc.
- Formation professionnelle :
 - Société Française du vide : connaissance et pratique de la cryogénie (1 ou 2 /an)
 - ANF CNRS-IN2P3
 - Réseau CEA/CERN : Easytrain, CAS
 - Participation à l'organisation d'Ecole thématique
- 1 agent membre du bureau de l'Association Française du Froid (Commission Cryo et Supra)