

# La Supraconductivité en régime RF (SRF)

David Longuevergne, Mohammed Fouaidy (IJCLab)

Yolanda Gomez-Martinez (LPSC)



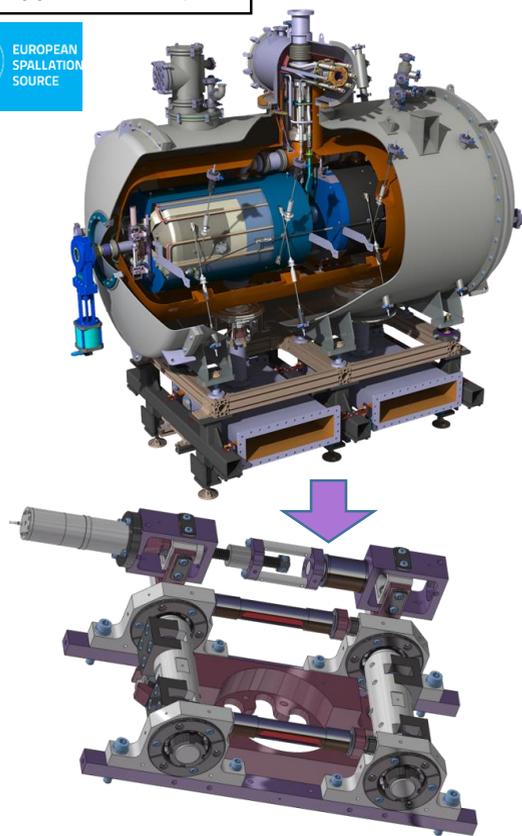


- Qu'est-ce que la SRF
- Les objectifs de la R&D SRF
- Les R&D et R&T en cours :
  - Les traitements thermiques innovants (projet HELOISE, M. Fouaidy, IJCLab)
  - Le polissage métallographique (projet PACCAS, D. Longuevergne, IJCLab)
  - Dépôts anti-multipacting et caractérisation (projet MULTIPAC, Y. Gomez-Martinez, LPSC)
  - La décontamination par plasma (projet DECAP, D. Longuevergne, IJCLab)
- La R&D amont
  - Les matériaux supraconducteurs alternatifs



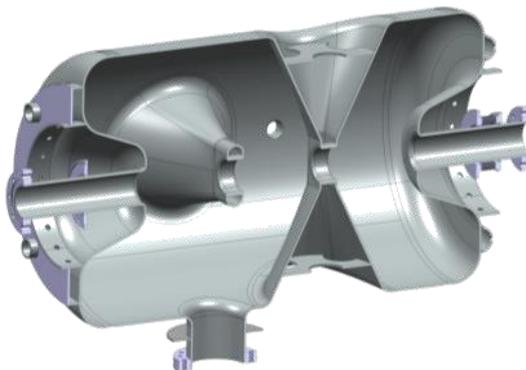
# QU'EST-CE QUE LA SRF et pourquoi ?

**CRYMODULE**  
(ESS type SPOKE)

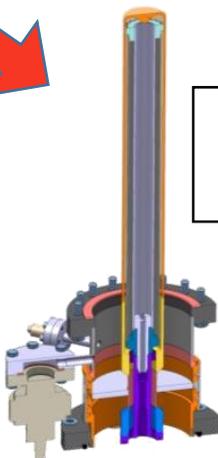


**Système d'accord en fréquence**

**Cavité Accélératrice**



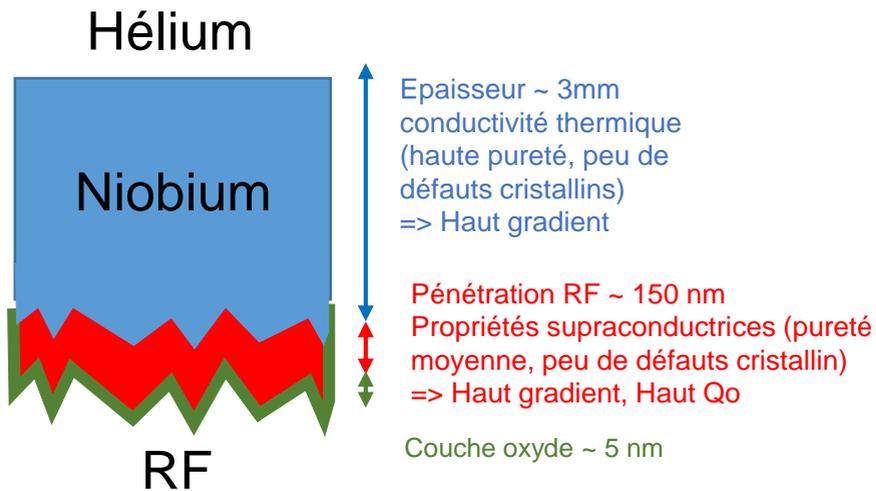
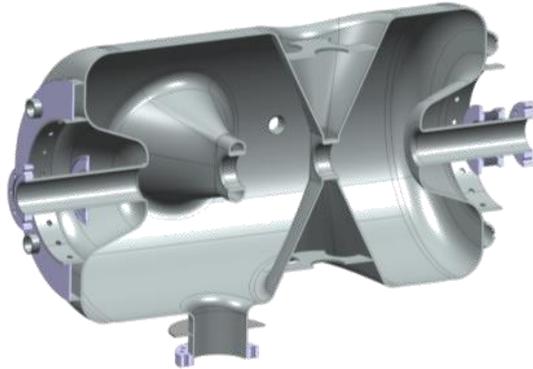
**Coupleur de  
Puissance**



- Puissances d'accélération bien supérieures aux structures accélératrices chaudes :
  - Forts gradients accélérateurs : 10 – 30 MV/m
  - Forts courants CW :  $\sim 1-100$  mA
- La dissipation thermique n'est plus le paramètre principal dimensionnant
  - $\Rightarrow$  Plus de flexibilité dans la conception
  - $\Rightarrow$  Résistance de surface  $\sim n\Omega$  @2K  $\rightarrow Q_0 \sim 5 \cdot 10^{10}$
  - $\Rightarrow$  Dissipation de quelques Watts pour plusieurs kWatts transférés au faisceau
- Fréquence RF plus basse
  - $\Rightarrow$  Cavités plus grandes, tube faisceau plus large, acceptances transverse et longitudinale plus grandes, moins de pertes faisceau...
- Des géométries différentes selon la vitesse des particules (elliptique, demi-onde, quart d'onde, ...)



# Les objectifs de la R&D SRF cavités en Niobium massif



- Fort Gradient : augmentation du gradient atteignable dans les cavités dans le but de la réduction de la taille et du coût de l'accélérateur.
- Haut Qo : Diminution de la résistance de surface dans le but de réduire le coût de l'accélérateur (usine cryogénique) et par conséquent augmentation du champ accélérateur nominal
- Fiabilisation cavité en configuration machine : Maintien des performances de la cavité équipée de son coupleur de puissance et de son système d'accord en fréquence , augmentation du taux de réussite des traitements de surface



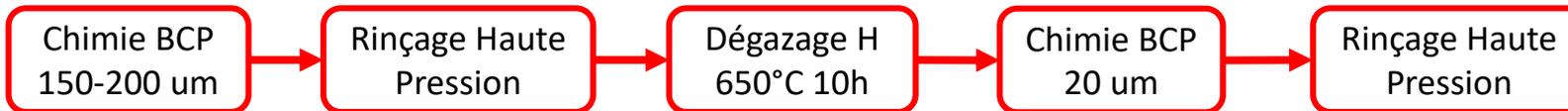
# PLAN

- Qu'est-ce que la SRF
- Les objectifs de la R&D SRF
- **Les R&D et R&T en cours :**
  - Les traitements thermiques innovants (projet HELOISE, M. Fouaidy, IJCLab)
  - Le polissage métallographique (projet PACCAS, D. Longuevergne, IJCLab)
  - Dépôts anti-multipacting et caractérisation (projet MULTIPAC, Y. Gomez-Martinez, LPSC)
  - La décontamination par plasma (projet DECAP, D. Longuevergne, IJCLab)
- La R&D amont
  - Les matériaux supraconducteurs alternatifs

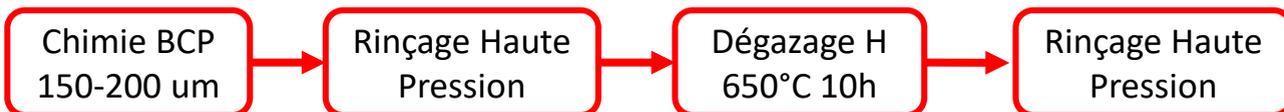


# Les traitements thermiques innovants : HELOISE

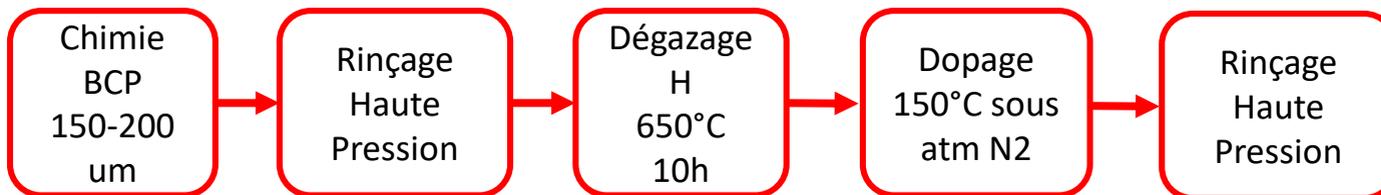
- Le traitement thermique standard sur cavité « Spoke » : 650°C pendant 10h pour dégazer l'hydrogène



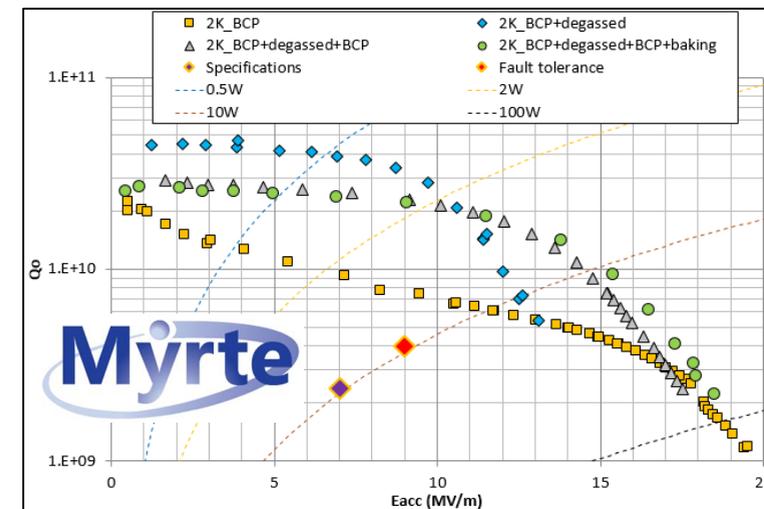
- Traitement amélioré : plus simple et meilleure performance



- En test : Le dopage de la surface à l'azote pour opérer à 4.2K au lieu de 2K?



En collaboration avec IRFU et DESY



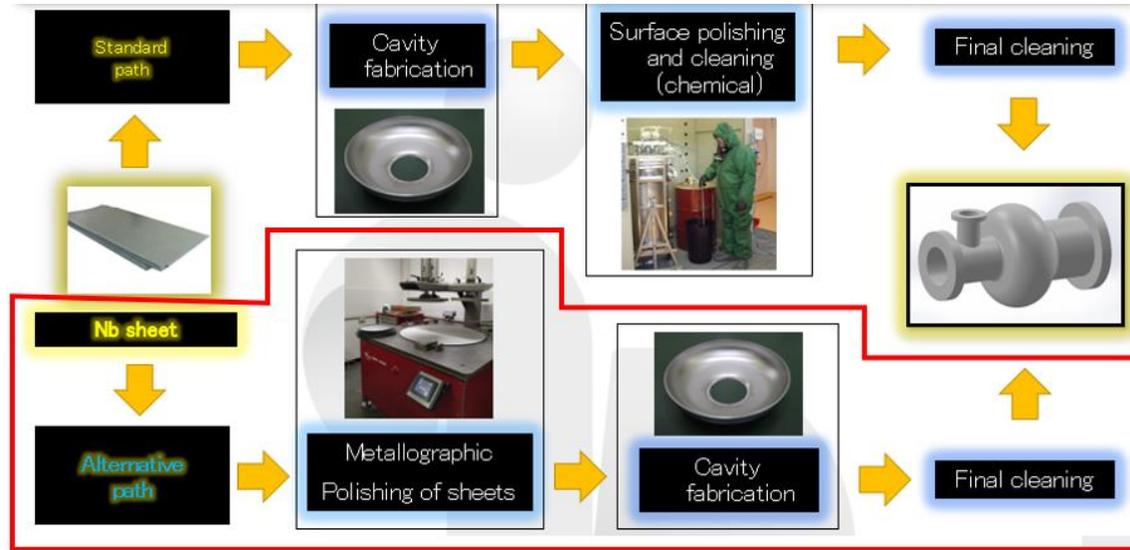


# Le polissage métallographique : alternative aux traitements chimiques (PACCAS)

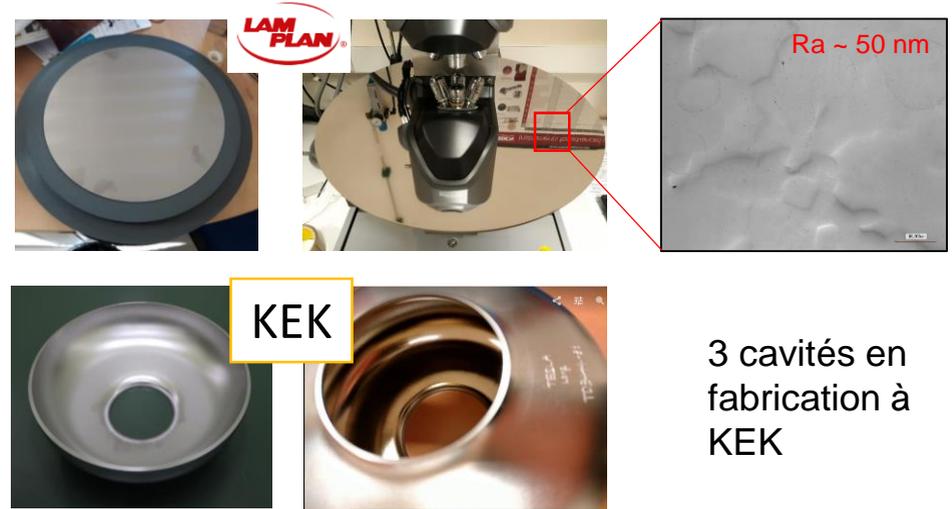
- Les motivations sont multiples :

- Diminution du coût de fabrication et traitement de surface des cavités
- Impact environnemental réduit (moins d'acide utilisé et à retraiter)
- Améliorer l'état de surface du Niobium et étudier son impact sur les performances SRF
- Substrat de meilleure qualité en vue du dépôt de couches minces

- Cependant, il faut repenser la manière de fabriquer les cavités



En collaboration avec IRFU et KEK (FJPPL)

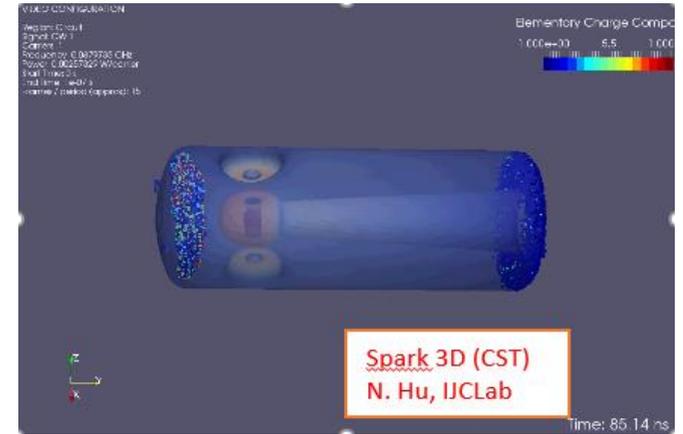


- Polissage métallographique optimisé sur échantillons pour le Niobium et contraintes SRF (thèse Oleksandr Hryhorenko, ENSAR2, H2020, 2019)

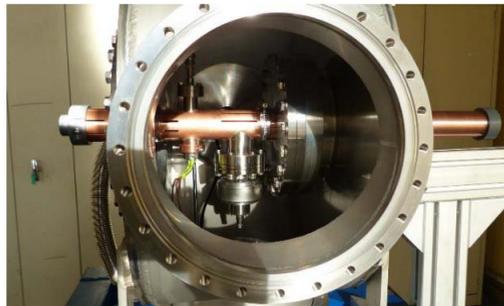


# Dépôts anti-multipacting et caractérisation

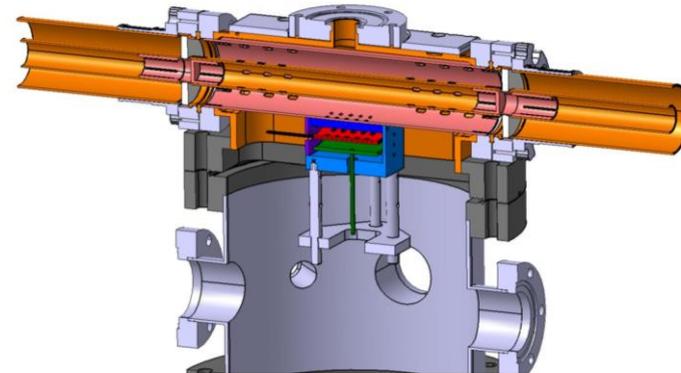
- **Multipacting : résonance électronique excitée par champ RF**
  - Composants concernés : cavités, coupleur RF, tube faisceau (e-cloud)
  - Optimisation géométrique : codes de simulations
  - Optimisation surface : réduction SEY (coefficient d'émission secondaire)
- **Collaboration IJCLab, LPSC, SIMAP (INC)**
  - IJCLab : Mesure SEY sur échantillon
  - LPSC : banc multipacting pour étude de la dynamique de conditionnement
  - SIMAP (INC) : EPISAMA (80 Primes) : Exploration de Procédés d'Ingénierie de Surface Anti-Multipacting pour les Accélérateurs : production de couches nanométriques de TiN, TiC par ALD.



Banc SEY  
(IJCLab)



Banc multipactor en  
opération (LPSC)



Banc multipactor,  
v2 en fabrication  
(LPSC)  
+ RPA\*



# La décontamination par plasma

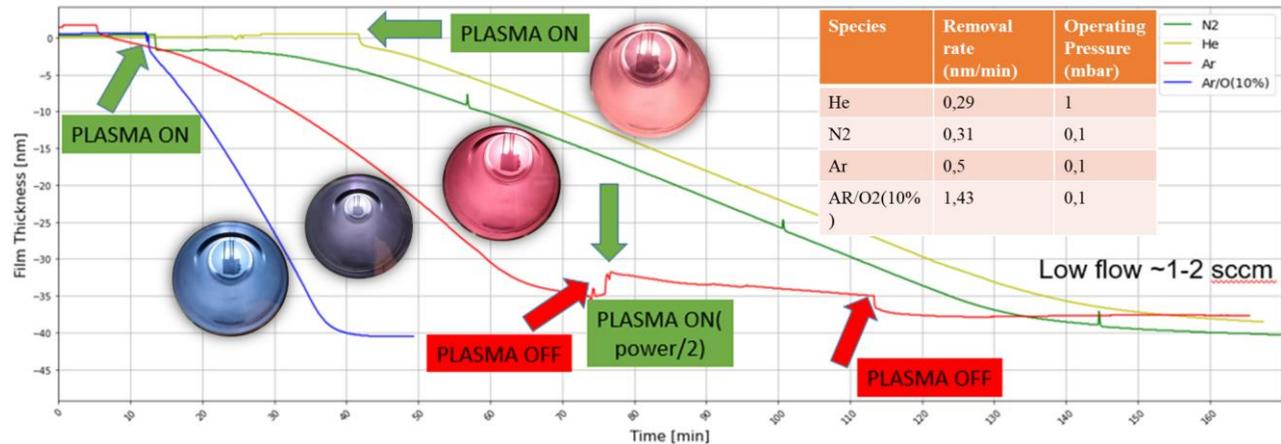
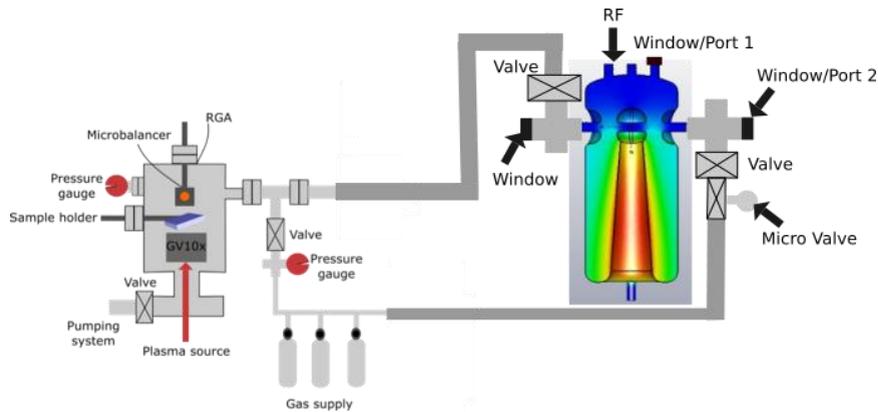
## Motivations :

- Décontamination de cavité « in-situ » sans démontage de cryomodule. Excitation plasma par système RF existant.
- Réduction du rayonnement X et multipacting causés par la pollution de surface (augmentation travail de sorti)

## Collaboration en cours de montage (GANIL, IRFU, LPSC, LPP, INSP (INP))

## Banc d'essai sur échantillon et cavité accélératrice en développement à IJCLab

- Optimisation de la chimie sur échantillon
- Optimisation des paramètres (P, flux, fréquence, ...) sur cavité : très dépendants de la géométrie.



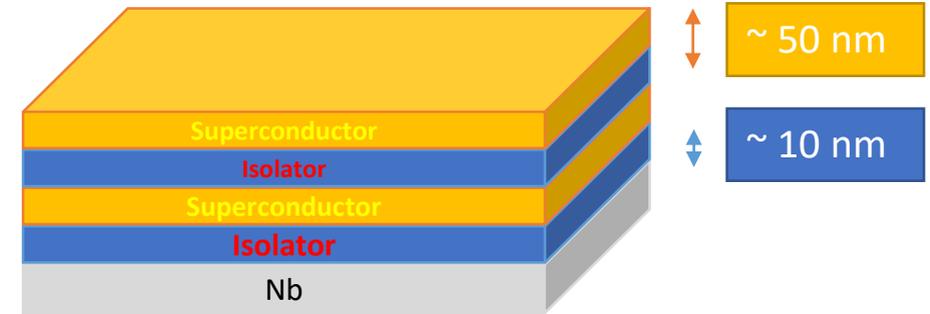
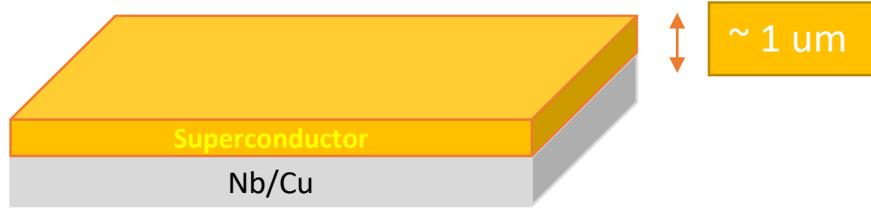


- Qu'est-ce que la SRF
- Les objectifs de la R&D SRF
- Les R&D et R&T en cours :
  - Les traitements thermiques innovants (projet HELOISE, [M. Fouaidy](#), IJCLab)
  - Le polissage métallographique (projet PACCAS, [D. Longuevergne](#), IJCLab)
  - Dépôts anti-multipacting et caractérisation (projet MULTIPAC, [Y. Gomez-Martinez](#), LPSC)
  - La décontamination par plasma (projet DECAP, [D. Longuevergne](#), IJCLab)
- **La R&D amont**
  - Les matériaux supraconducteurs alternatifs



# Les matériaux alternatifs en couche mince

- 2 voies sont étudiées dans la communauté:



## Couches épaisses (composés A15)

- A15 : Nb<sub>3</sub>Sn, V<sub>3</sub>Si déposé sur Niobium ou cuivre
- Utilisation à 4.2K (T<sub>c</sub> > 15K)
- Le champ accélérateur peut être potentiellement doublé (~ 100 MV/m)
- Mais des limitations importantes (~ 20 MV/m) à cause de problèmes de stœchiométrie selon orientation cristalline

## Les multi-couches (SIS)

- Couches supraconductrices (NbN or NbTiN) séparées par une couche isolante (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN)
- Suggéré par Gurevich en 2007
- L'efficacité dépend du nombre de couches et de leur épaisseurs
- Le blindage multicouche n'a pas encore été démontré sous champ RF intense.
- ALD (Atomic Layer Deposition) est très prometteur

- Collaborations : I-FAST, IRFU
- Rôle IJCLab : traitement thermique, préparation de substrat (polissage métallographique)



# Les matériaux alternatifs en couche mince

**Vide&Surfaces** Platform for analysis and production of surface and material

**PANAMA** : Platform for the ANalysis and chAracterization of Materials for Accelerators



**A network of instruments and expertise dedicated to accelerator R&D of materials and surfaces. (Superconductors, photocathodes, Ultra High Vacuum, beam lines, ...)**



- Grazing angle XRD
- SEY measurement,
- Optical microscope
- Cryogenic test stands (RRR, **thermal conductivity**, ...)
- Cryostat for SRF cavity characterization
- Thin film deposition capabilities (TiN, NEG)
- Metallographic polishing device



- Electronic microscope EDS+EBSD
- SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer)
  - Confocal microscope
- Test stand for Specific heat (Cp) measurement
  - XPS
- Multi-technique set-up (XPS, LEED, SEY)

- Magnetometry (Hc1, Hc2)
- Cryogenic test stands (RRR, ...)
- Cryostat for SRF cavity characterization
- Optical microscope
- Metallographic polishing device
- Hardness measurement
- Thin films deposition capabilities (ALD)
- Point contact spectroscopy (superconducting gap)



GXRD



SIMS



SEM (EDS + EBSD)



# Conclusions

- **L'IN2P3 a contribué très fortement à plusieurs grands accélérateurs supraconducteurs et futurs grands projets**
  - LHC, Spiral2, XFEL, ESS, MYRRHA, PIP-II, ...
  - Une forte R&D est menée depuis plusieurs dizaines d'années plus spécifiquement sur les cavités supraconductrices basses fréquences type « Spoke » et coupleurs de puissance.
- **Plusieurs projets de R&D sont en cours pour répondre à plus ou moins long terme aux futurs projets**
  - Amélioration des performances ( $Q_0$  et champ accélérateur) des cavités en Niobium : HELOISE, DECAP
  - Fiabilisation et amélioration des conditions d'opération : MULTIPAC, DECAP
  - Préparation de l'avenir de la SRF (dépôts de couches minces) : PACCAS
- **R&D amont : une position à renforcer**
  - Matériaux alternatifs au Niobium massif : couches minces épaisses ( $Nb_3Sn$ ) ou multicouches (SIS)
  - Pas de compétences aujourd'hui à l'IN2P3 pour l'élaboration de couches minces de matériaux supra
  - Des collaborations en cours de développement SIMAP (INC)
- **Nouveaux travaux sur nouvelles méthodes de refroidissement par cryogénérateur**

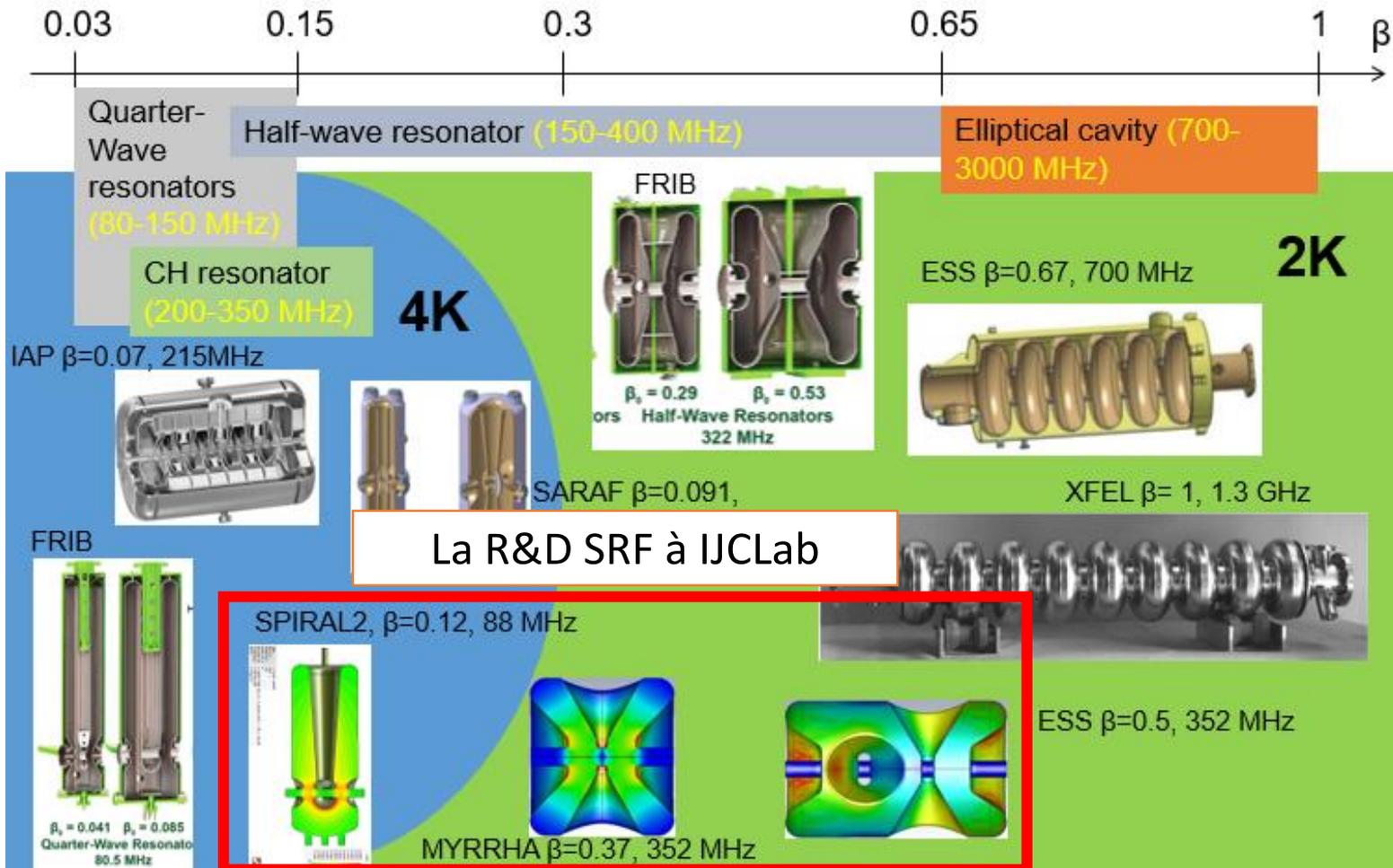


Merci pour votre attention



# Les différentes géométries (cavités en Niobium massif)

□ Particle velocity ( $\beta$ )  $\Rightarrow$  Cavity frequency ( $F_0$ )

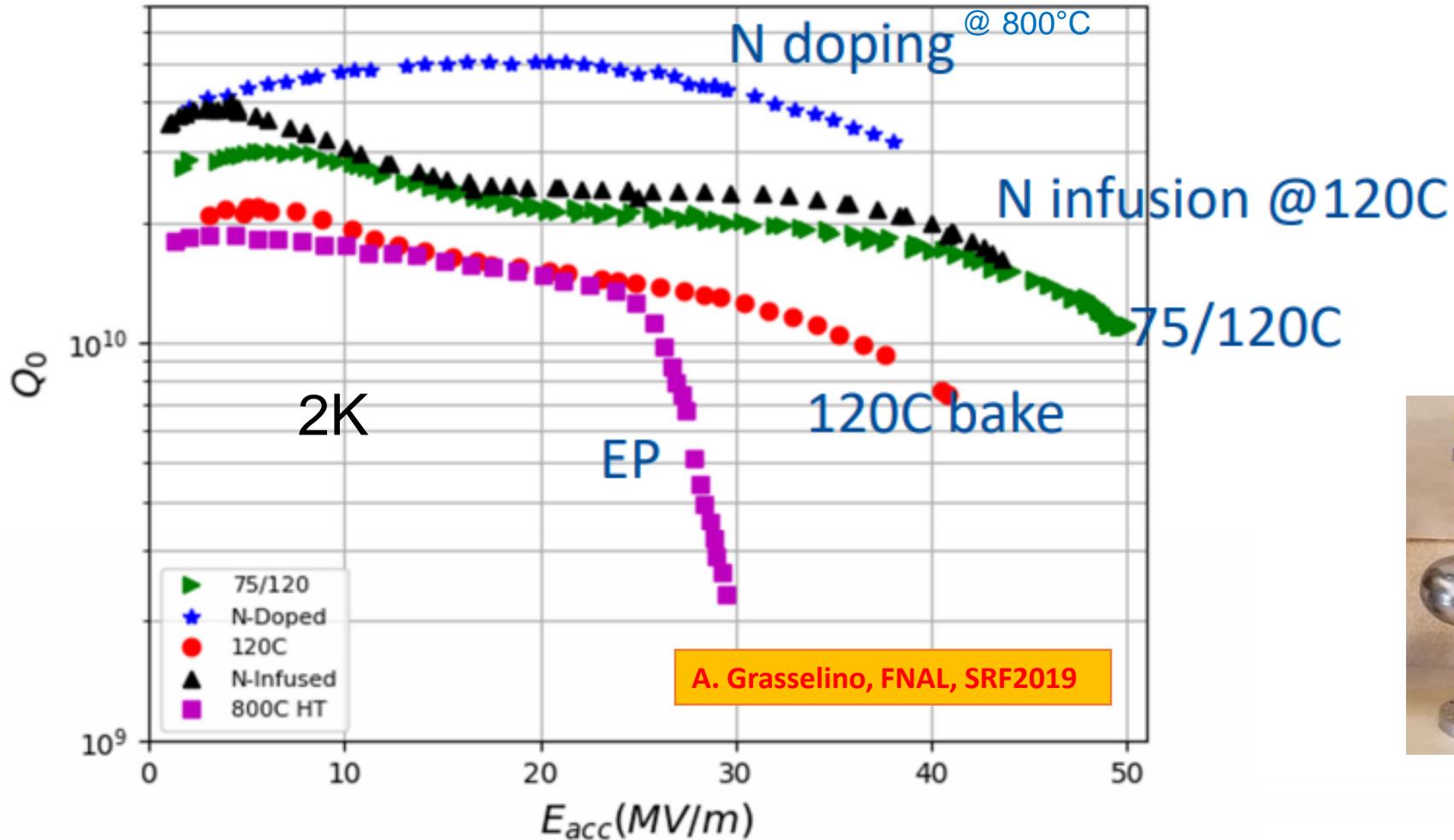


La R&D SRF dans le monde





# Les limites du Niobium massif





# Les limites du Niobium massif

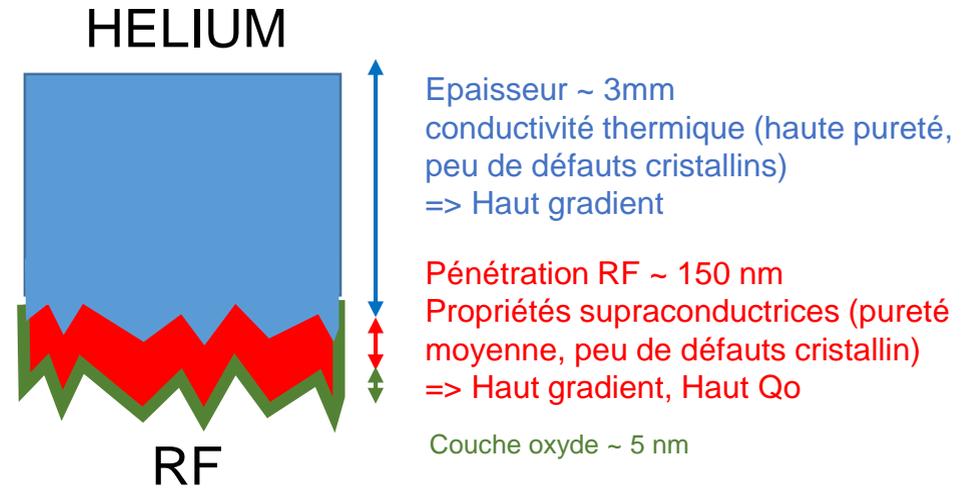
- Température de transition : 9.2 K
- Champ magnétique limite :
  - $H_{c1} \sim 180$  mT pour des champs normaux à la surface
  - $H_{sh} \sim 240$  mT pour des champs parallèles à la surface

- ⇒ Eacc max pour cavité Spiral2 :  $\sim 25$  MV/m
- ⇒ Eacc max pour cavité ESS :  $\sim 32$  MV/m
- ⇒ Eacc max pour cavité elliptique :  $\sim 60$  MV/m

- Résistance de surface:  $R_s = R_{BCS} + R_{res}$
- $R_{res} \sim 1 - 10$  n $\Omega$  (champ magnétique résiduel, oxyde, ...)

$$R_{BCS} = A(\lambda, \xi, l, v_F) \cdot \frac{\omega^2}{T} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B \cdot T}\right)$$

$$Q_0 = G/R_s$$



$Q_0$ ( $R_{res} = 1$ n $\Omega$ )	G	4.2K	2K	1.5K
1300 MHz	250	4.2E+08	4.2E+10	1.1E+11
700 MHz	200	1.1E+09	3.8E+10	1.5E+11
352 MHz	110	2.4E+09	5.5E+10	1.0E+11
88 MHz	30	8.3E+09	3.1E+10	3.3E+10

# Vide&Surfaces Platform for analysis and production of surface and material



## PANAMA : Platform for the ANalysis and chAracterization of Materials for Accelerators



**A network of instruments and expertise dedicated to accelerator R&D of materials and surfaces. (Superconductors, photocathodes, Ultra High Vacuum, beam lines, ...)**



GXRD



SIMS



SEM (EDS + EBSD)

- Grazing angle XRD
- SEY measurement,
- Optical microscope
- Cryogenic test stands (RRR, **thermal conductivity, ...**)
- Cryostat for SRF cavity characterization
- Thin film deposition capabilities (TiN, NEG)
- Metallographic polishing device



- Electronic microscope EDS+EBSD
  - SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer)
    - Confocal microscope
  - Test stand for Specific heat (Cp) measurement
    - XPS
    - **Multi-technique set-up (XPS, LEED, SEY)**

- Magnetometry (Hc1, Hc2)
- Cryogenic test stands (RRR, ...)
- Cryostat for SRF cavity characterization
- Optical microscope
- Metallographic polishing device
- Hardness measurement
- Thin films deposition capabilities (ALD)
- Point contact spectroscopy (superconducting gap)

# Etude refroidissement des cavités par cryogénérateur

## Motivations:

1. Problème approvisionnement et/ou disponibilité hélium liquide (LHe) et hélium gaz
2. LHe: coût élevé et nécessite support technique (cryogénistes)
3. Nouveaux développements industriels : amélioration performances des cryogénérateurs (ordinateurs quantiques (QBIT))
4. Nouvelles compétences techniques et maîtrise utilisation cryogénérateurs
5. Impulsion R&D à l'interface cryogénie-cavités

Cryogénérateur type Pulse Tube (PT)  
Modèle PT420 (CRYOMECH)



Financement banc  
d'essais:  
Axe1 PACIFICS

Comparaison performances et limites de 2  
modes de refroidissement : LHe versus  
PT

2<sup>ème</sup> étage 2 W @ 4.2 K

couplage a tête froide  
cryogénérateur (PT)

1<sup>er</sup> étage  
55 W @ 45 K

