

La Supraconductivité en régime RF (SRF)

David Longuevergne, Mohammed Fouaidy (IJCLab)

Yolanda Gomez-Martinez (LPSC)



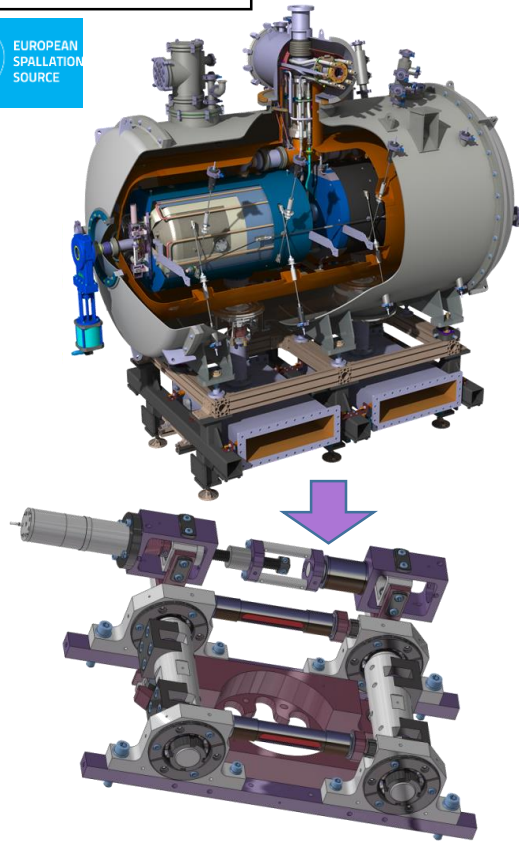


- Qu'est-ce que la SRF
- Les objectifs de la R&D SRF
- Les R&D et R&T en cours :
 - Les traitements thermiques innovants (projet HELOISE, M. Fouaidy, IJCLab)
 - Le polissage métallographique (projet PACCAS, D. Longuevergne, IJCLab)
 - Dépôts anti-multipacting et caractérisation (projet MULTIPAC, Y. Gomez-Martinez,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



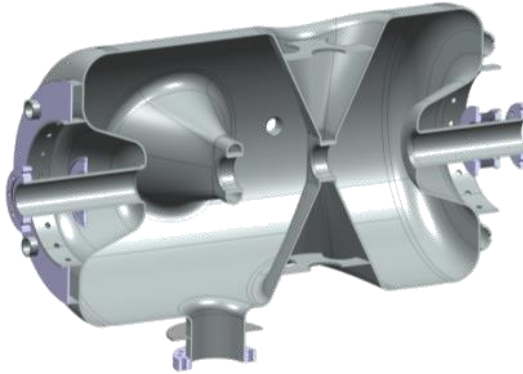
QU'EST-CE QUE LA SRF et pourquoi ?

CRYMODULE
(ESS type SPOKE)



Système d'accord en fréquence

Cavité Accélératrice



- 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

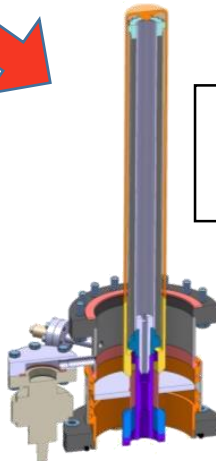
- ⇒ Plus de flexibilité dans la conception
- ⇒ Résistance de surface $\sim n\Omega$ @2K $\rightarrow Q_0 \sim 5 \cdot 10^{10}$
- ⇒ Dissipation de quelques Watts pour plusieurs kWatts transférés au faisceau

- Fréquence RF plus basse

- ⇒ Cavités plus grandes, tube faisceau plus large, acceptances transverse et longitudinale plus grandes, moins de pertes faisceau...

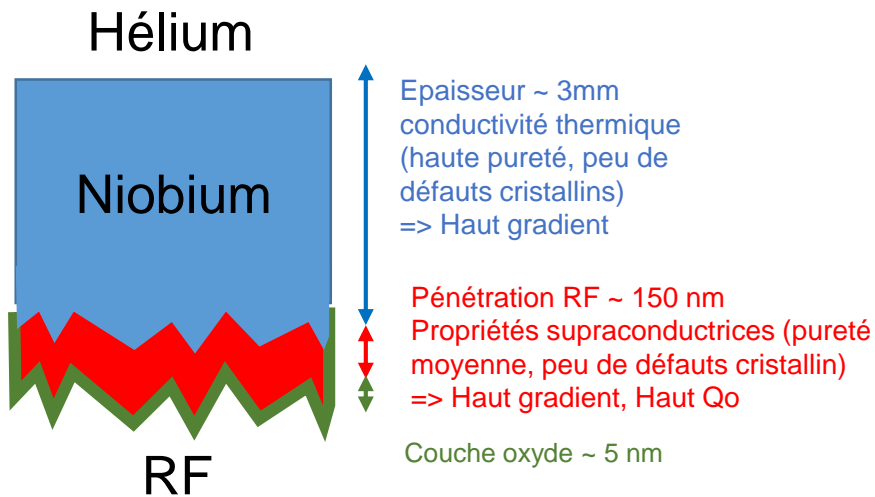
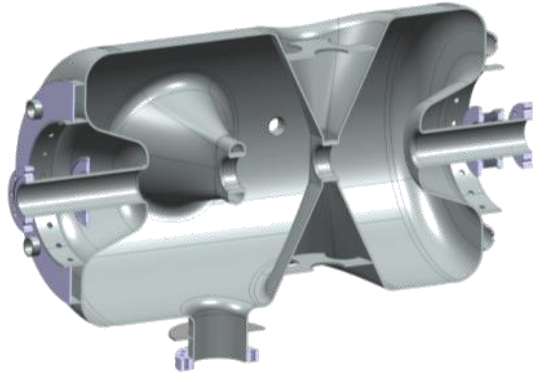
- Des géométries différentes selon la vitesse des particules (elliptique, demi-onde, quart d'onde, ...)

Coupleur de Puissance





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



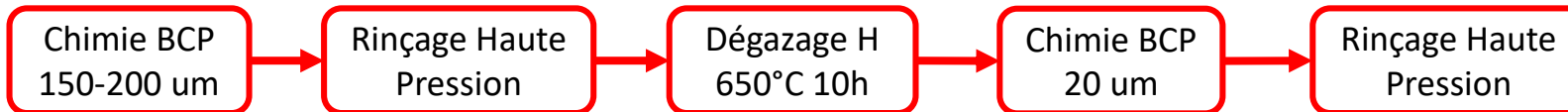
PLAN

- 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

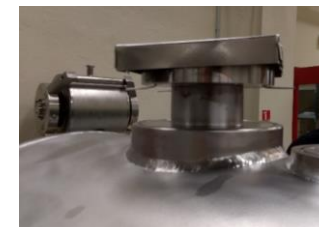
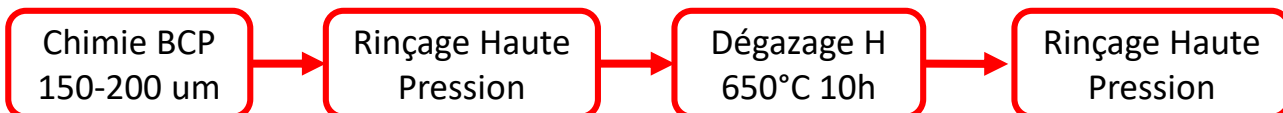


Les traitements thermiques innovants : HELOISE

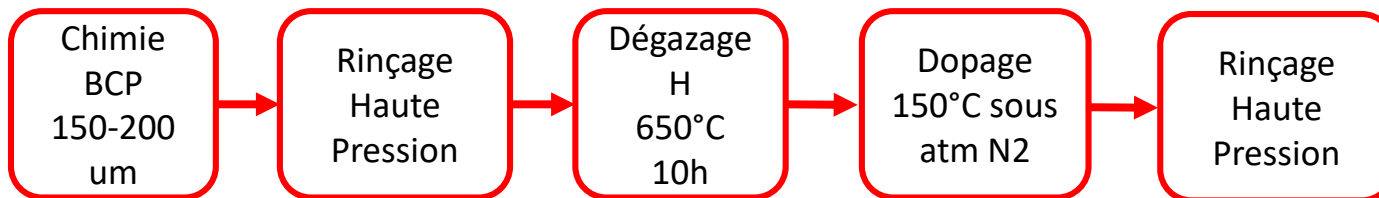
- Le traitement thermique standard sur cavité « Spoke » : 650°C pendant 10h pour dégazer l'hydrogène



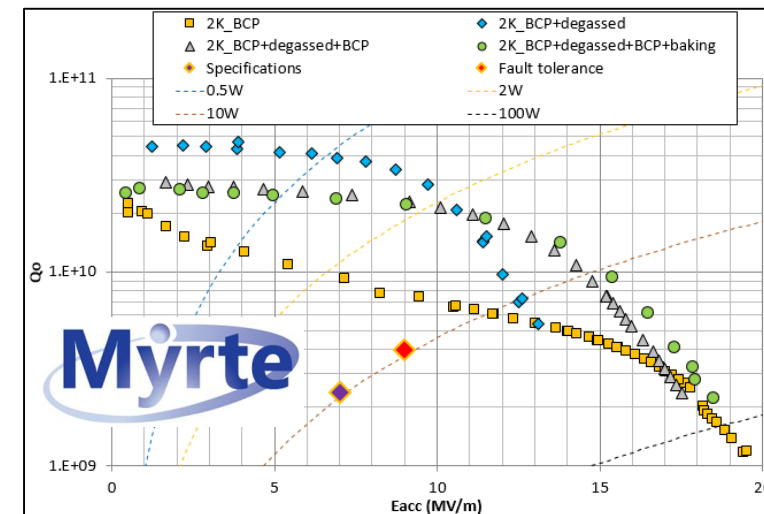
- Traitement amélioré : plus simple et meilleure performance



- 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



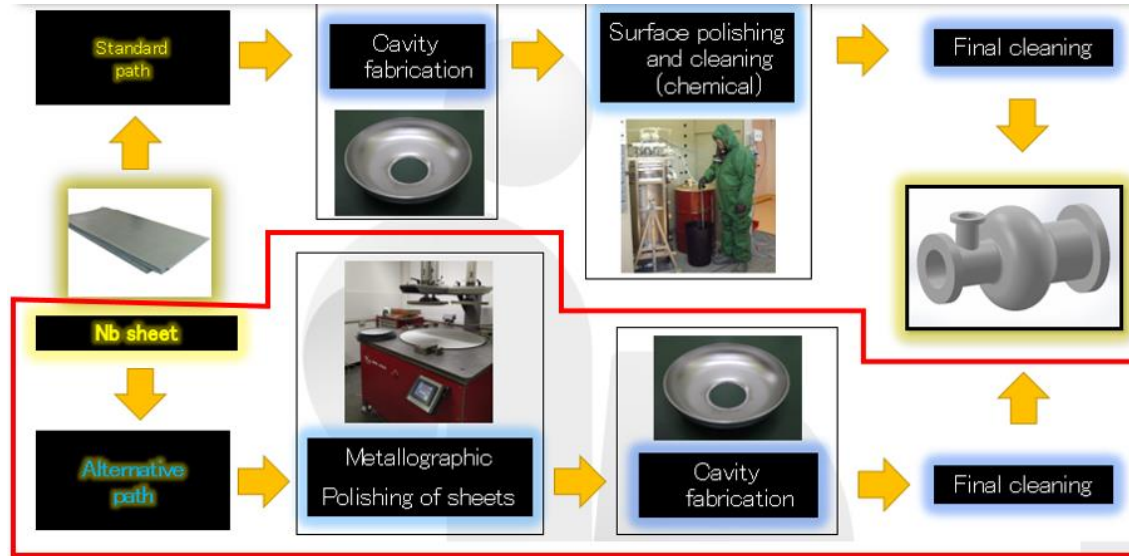


Le polissage métallographique : alternative aux traitements chimiques (PACCAS)

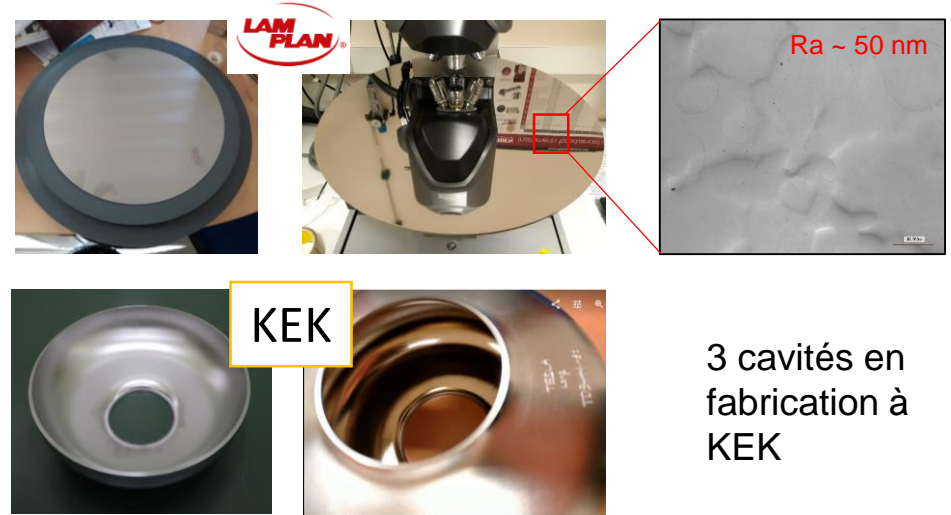
- Les motivations sont multiples :

- 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)

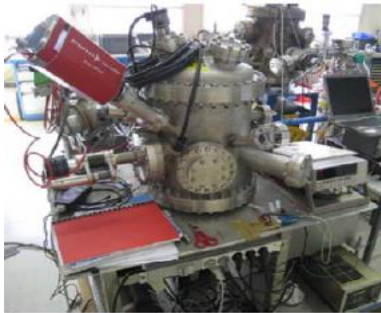
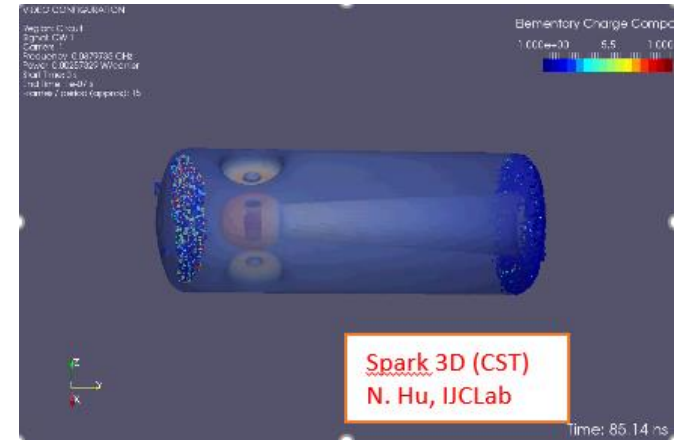


- Polissage métallographique optimisé sur échantillons pour le Niobium et contraintes SRF (thèse Oleksandr Hryhorenko, ENSAR2, H2020, 2019)

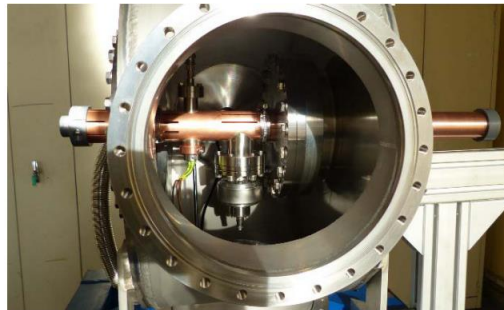


Dépôts anti-multipacting et caractérisation

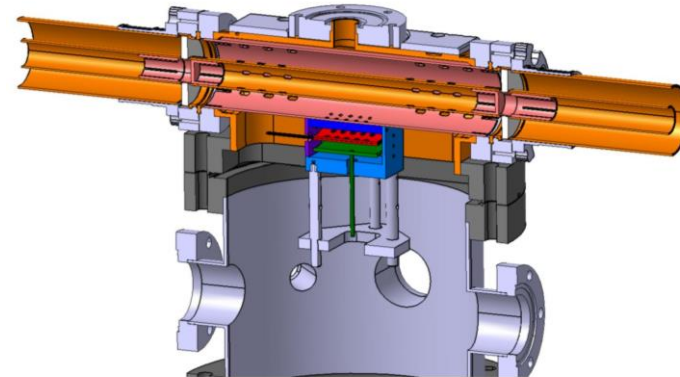
- **Multipacting : résonance électronique excitée par champ RF**
 - Composants concernés : cavités, coupleur RF, tube faisceau (e-cloud)
 - Optimisation géométrique : codes de simulations
 - Optimisation surface : réduction SEY (coefficient d'émission secondaire)
- **Collaboration IJCLab, LPSC, SIMAP (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

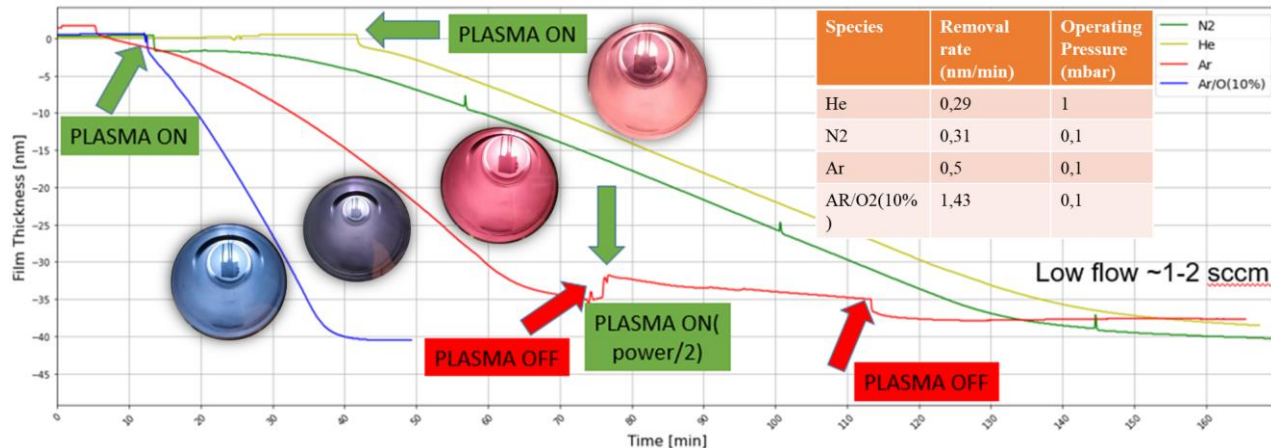
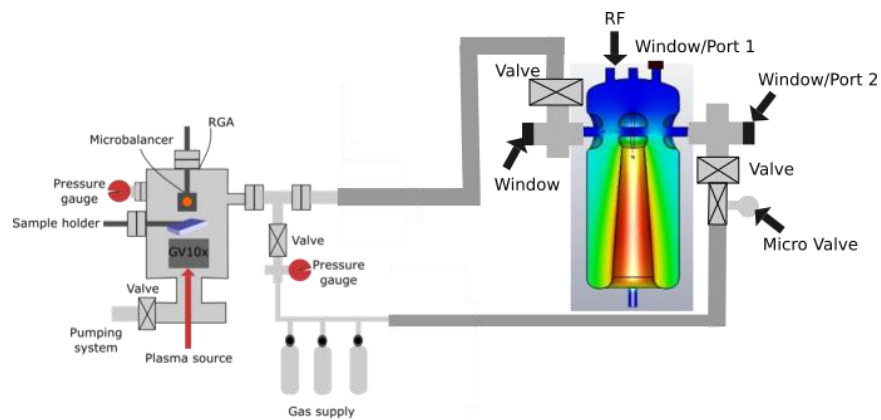
Motivations :

- 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.



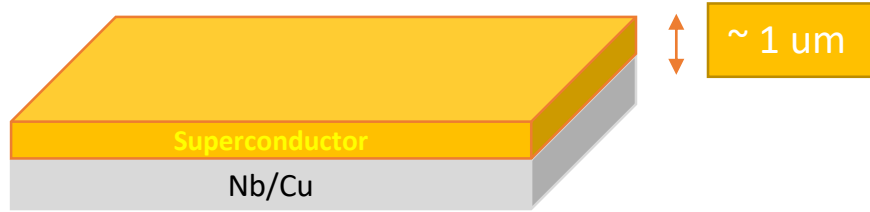


- Qu'est-ce que la SRF
- Les objectifs de la R&D SRF
- Les R&D et R&T en cours :
 - Les traitements thermiques innovants (projet HELOISE, [M. Fouaidy](#), IJCLab)
 - Le polissage métallographique (projet PACCAS, [D. Longuevergne](#), IJCLab)
 - Dépôts anti-multipacting et caractérisation (projet MULTIPAC,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



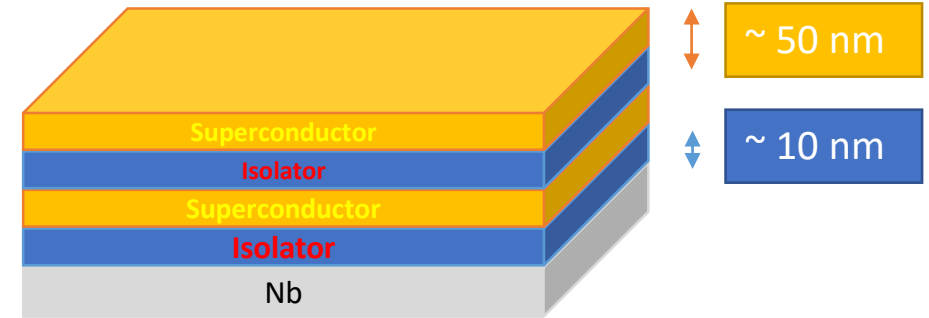
Les matériaux alternatifs en couche mince

- 2 voies sont étudiées dans la communauté:



Couches épaisses (composés A15)

- A15 : Nb₃Sn, V₃Si déposé sur Niobium ou cuivre
- Utilisation à 4.2K (T_c > 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 (Al₂O₃, 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, ...)

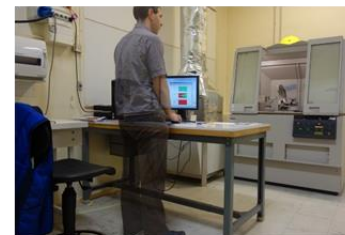


- Grazing angle XRD
- SEY measurement,
- Optical microscope
- Cryogenic test stands (RRR, **thermal conductivity**, ...)
- Cryostat for SRF cavity characterization
- Thin film deposition capabilities (TiN, NEG)
- Metallographic polishing device



- 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**

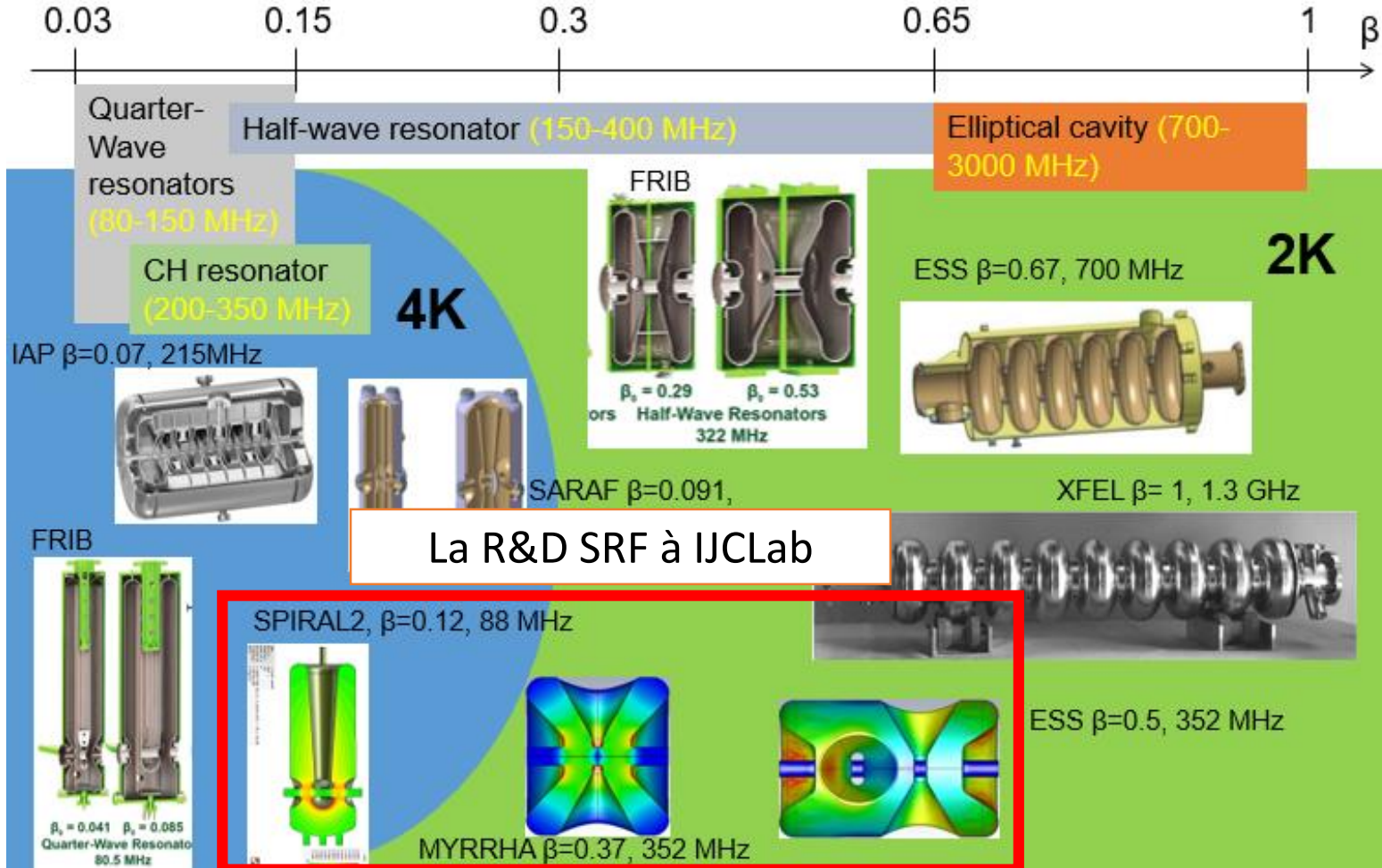


Merci pour votre attention



Les différentes géométries (cavités en Niobium massif)

□ Particle velocity (β) \Rightarrow Cavity frequency (F_0)



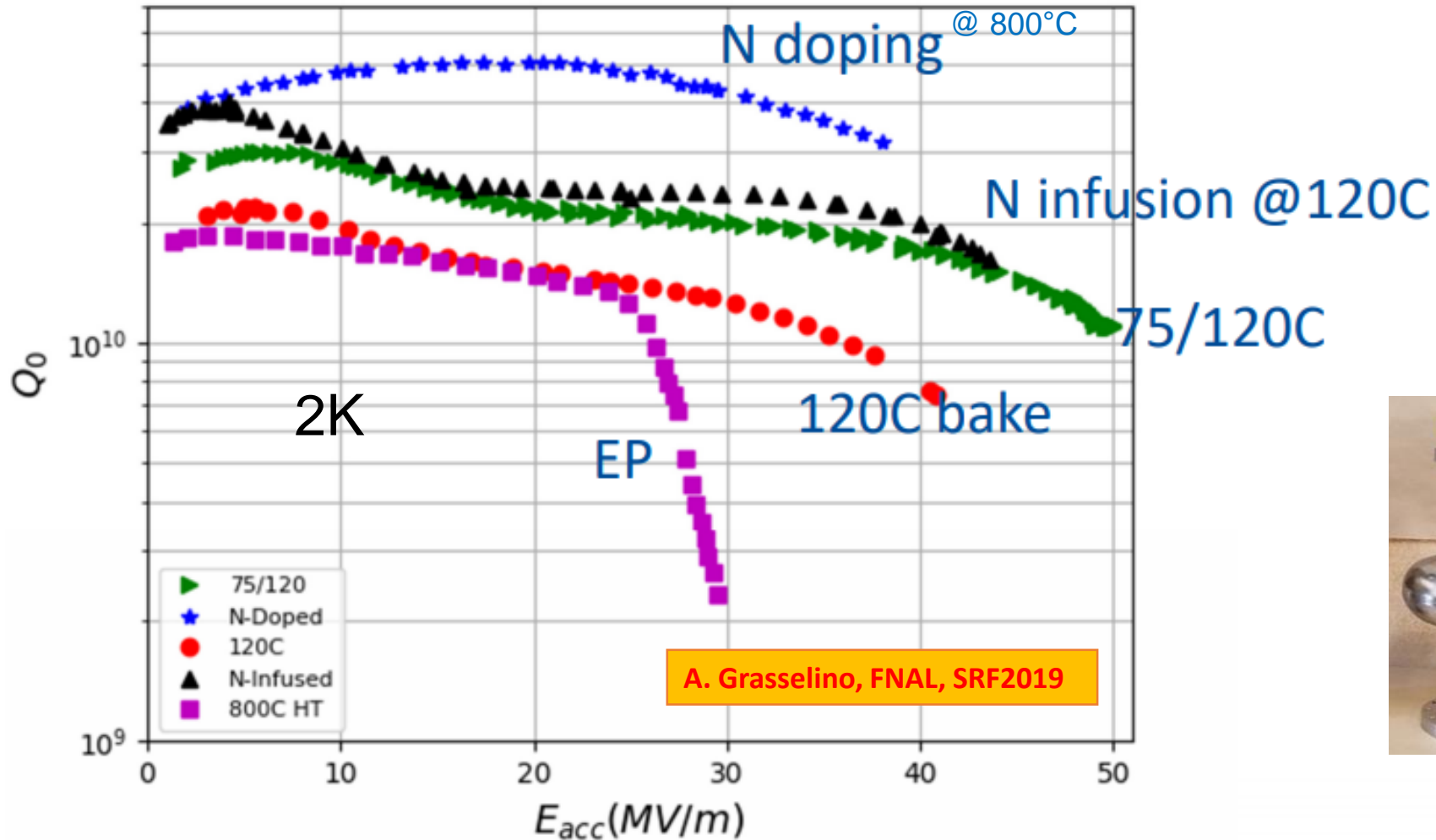
La R&D SRF à IJCLab

La R&D SRF dans le monde

1.3 GHz



Les limites du Niobium massif





Les limites du Niobium massif

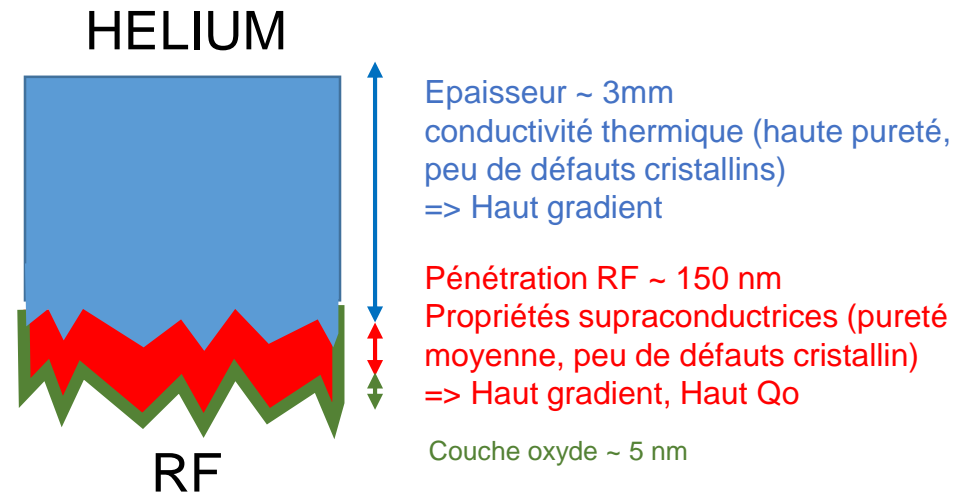
- Température de transition : 9.2 K
- Champ magnétique limite :
 - $H_{c1} \sim 180$ mT pour des champs normaux à la surface
 - $H_{sh} \sim 240$ mT pour des champs parallèles à la surface

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

- Résistance de surface: $R_s = R_{BCS} + R_{res}$
- $R_{res} \sim 1 - 10$ n Ω (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 Ω)	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)**

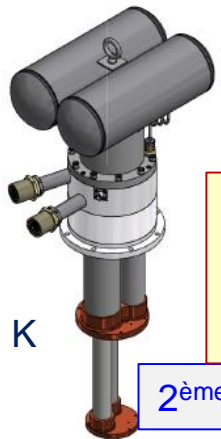
- Magnetometry (Hc1, Hc2)
- Cryogenic test stands (RRR, ...)
- Cryostat for SRF cavity characterization
- Optical microscope
- Metallographic polishing device
- Hardness measurement
- Thin films deposition capabilities (ALD)
- Point contact spectroscopy (superconducting gap)

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^{ème} étage 2 W @ 4.2 K

couplage a tête froide
cryogénérateur (PT)

1^{er} étage
55 W @ 45 K

