

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



D-Day des doctorants de 2^{ème} année

Département des accélérateurs, de
cryogénie et de magnétisme

Yasmine KALBOUSSI

Mahmoud ABDEL HAFIZ

Clément GENOT

Unai DURAÑONA

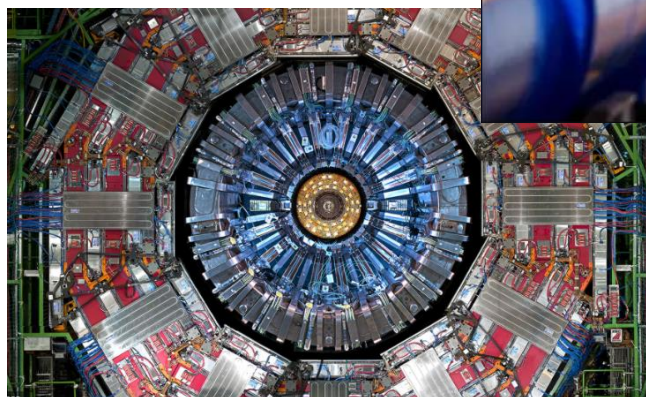
Thomas PROSLIER



Sources



Cavités SRF



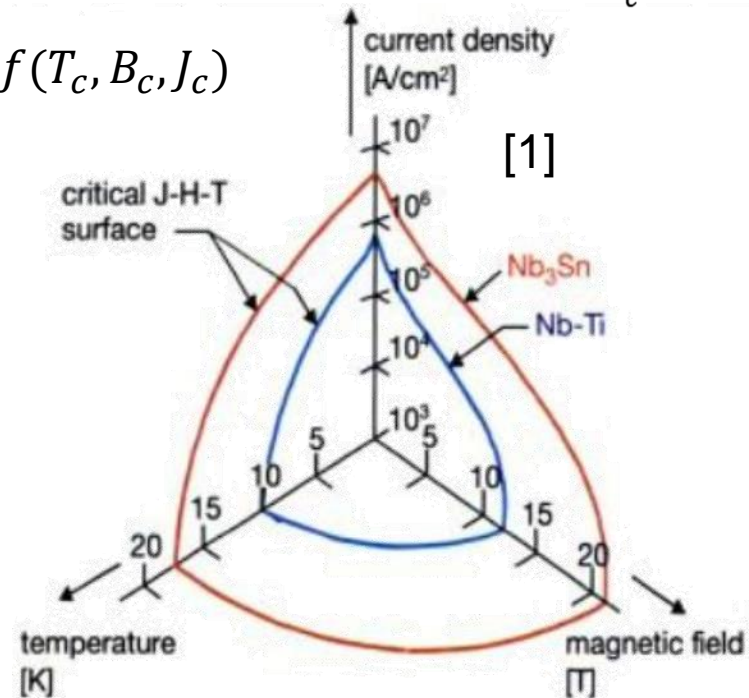
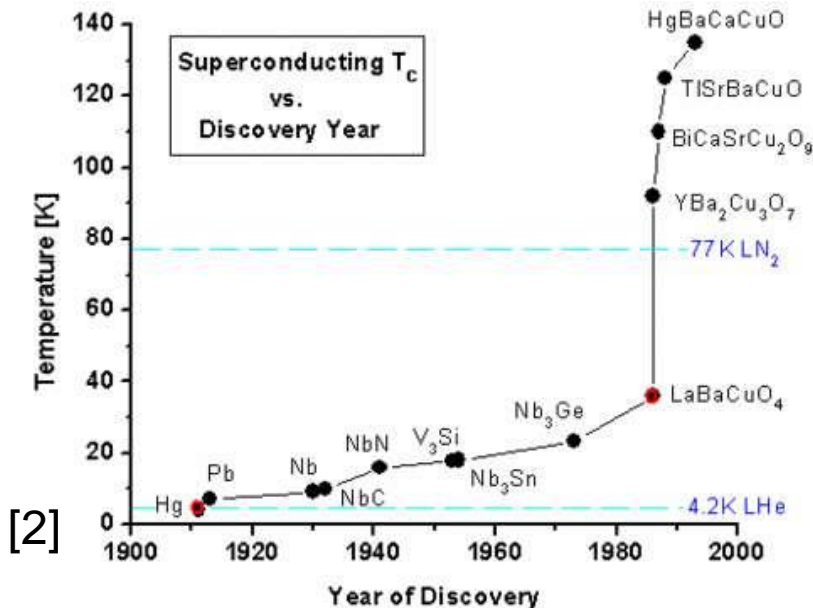
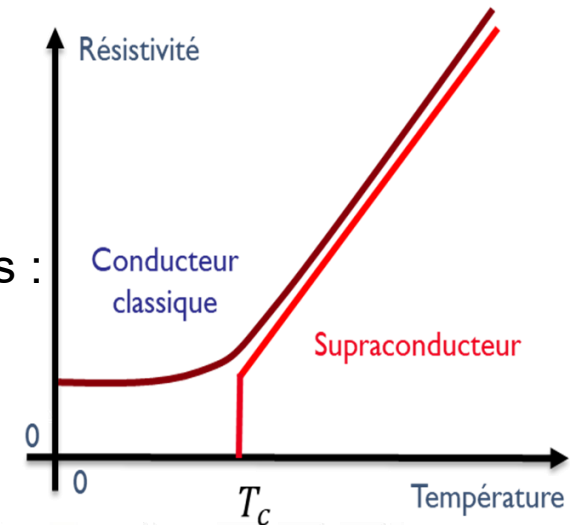
Détecteurs (CMS/ ATLAS)

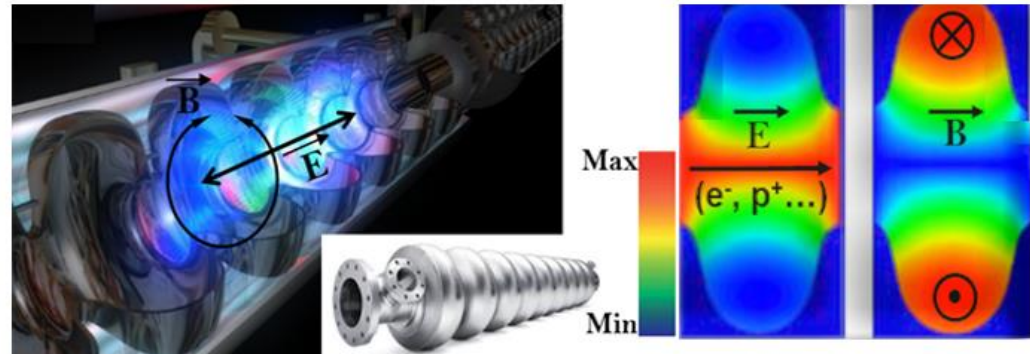


Electro aimants

Matériaux supraconducteurs :

- Pas de perte d'énergie par effet Joule
 - Obtention de densités de courant importantes
 - Electro-aimant : génère de forts champs magnétiques
- L'état du supraconducteur dépend de plusieurs paramètres :
 - Le champ magnétique \vec{B}
 - La densité de courant \vec{J}
 - La température T
 - L'état mécanique $\underline{\sigma}$
- On définit une surface critique par : $\mathcal{S}_c = f(T_c, B_c, J_c)$





Performances:

- Facteur de Qualité: $Q = \frac{\text{Energie injectée}}{\text{Pertes}} = \frac{G}{R_S(B)}$
- Champs accélérateur maximal: E_{MAX}

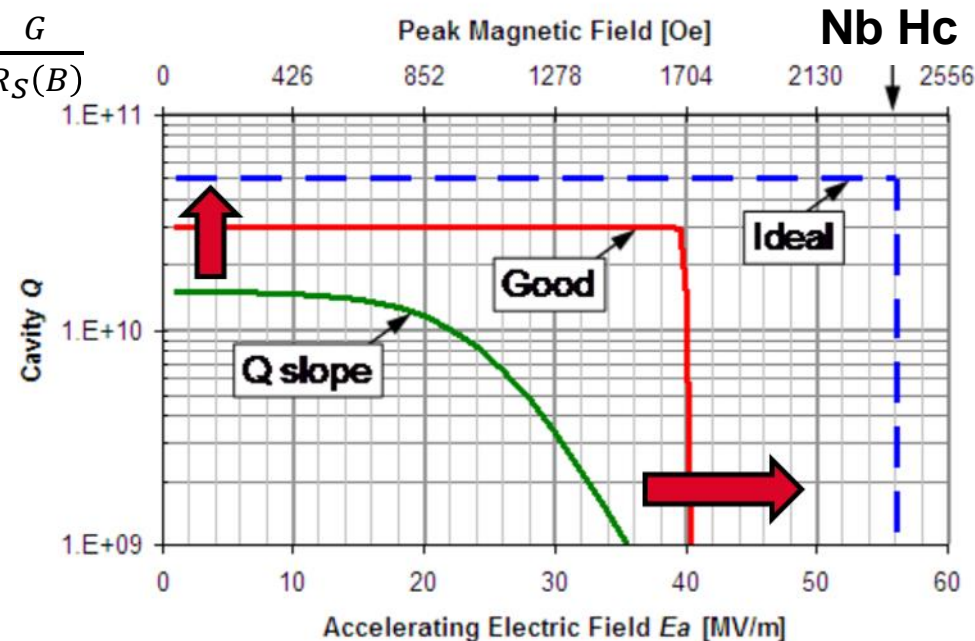
But:

Réduction des coûts:

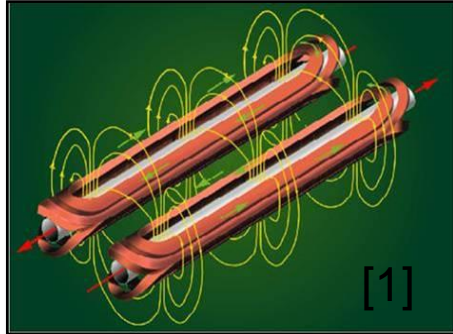
- Réduire les pertes -> Augmenter Q
- 100% d'augmentation de Q -> dizaines de M€
- Réduire la longueur -> Augmenter E_{MAX}
- 30% d'augmentation de E_{MAX} -> dizaines de M€.
- Graal: 100% de E_{MAX} (~ 70 MV/m)**

Méthodes:

- nouveaux matériaux (Nb₃Sn, V₃Si, MgB₂...)
- Nouvelles structures: multicouches.



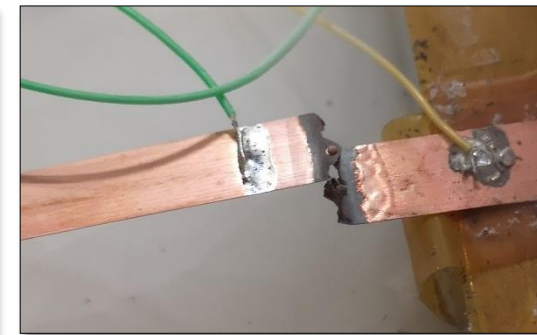
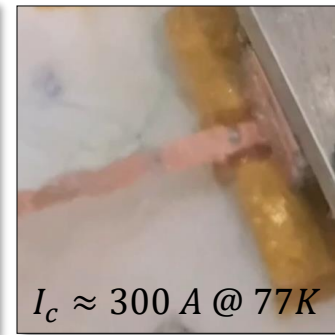
Dipôle



Quadripôle LHC NbTi

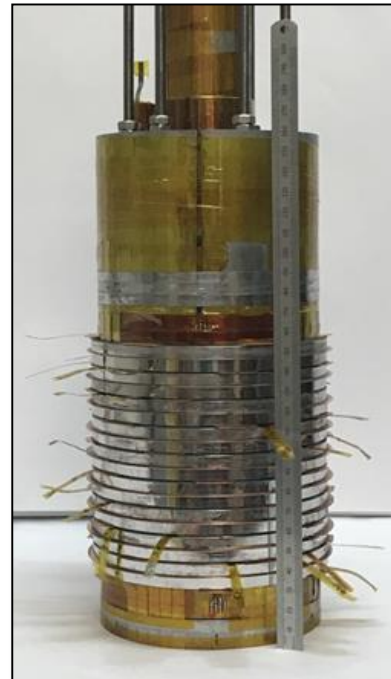
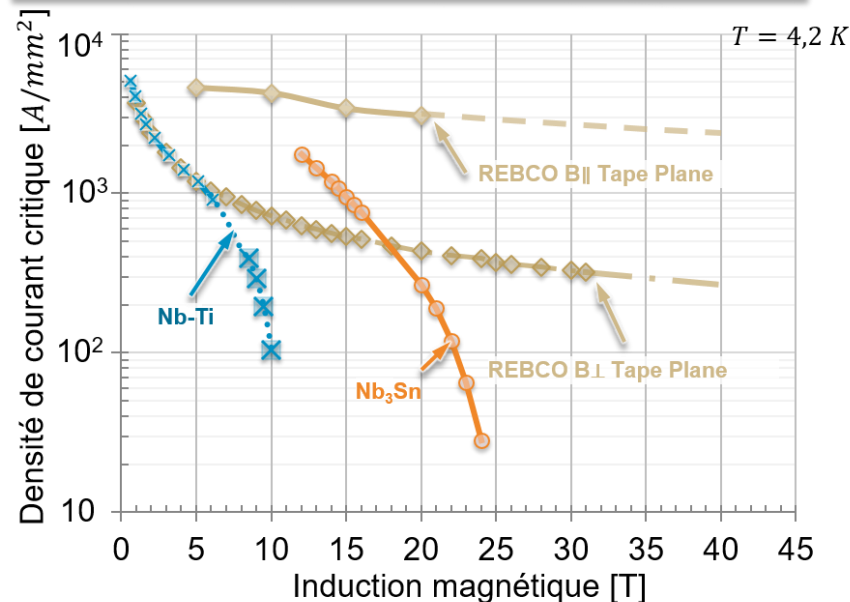


Ruban HTS *SuperPower*



Dipôle → courber le faisceau
Quadripôle → focaliser le faisceau

HTS : induction critique plus élevée



- Dynamique du quench dans les aimants
- Protection aimant HTS
- Caractérisation états mécaniques-supraconducteur Nb₃Sn.

Insert **NOUGAT** : HTS, record du monde champ 32.5 T dans 50 mm + Award 2020 **quand même !!!**

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Material engineering of ALD-deposited multilayer to improve the superconducting performances of RF cavities under intense RF fields.

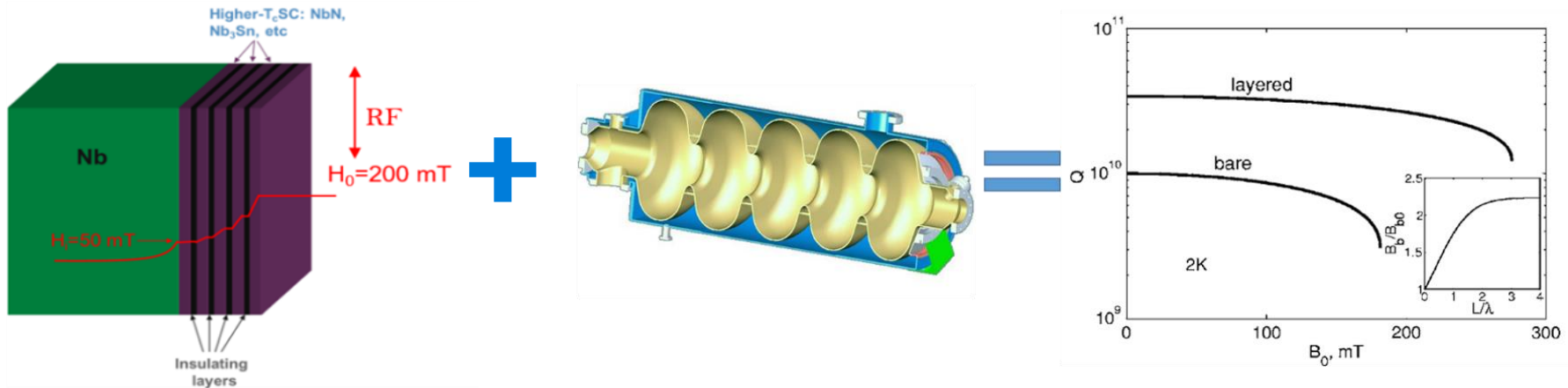
D-Day

*Thésard : **Yasmine KALBOUSSI***

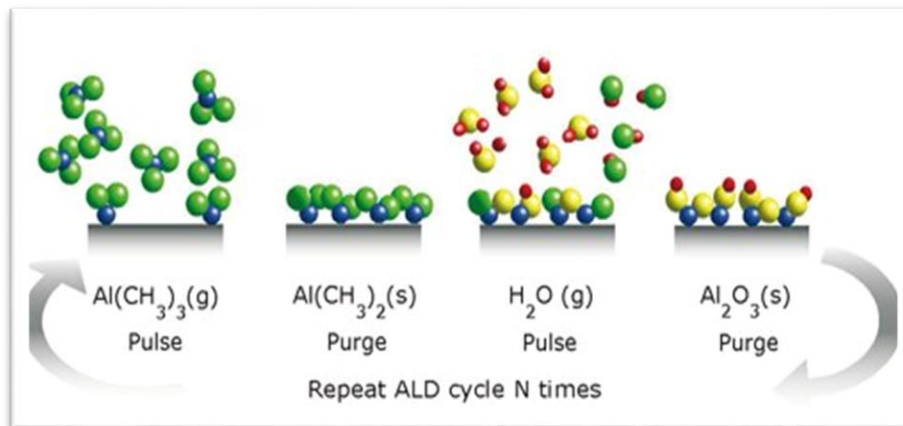
*Directeur de thèse : **Claire ANTOINE***

*Encadrants : **Thomas PROSLIER***

INTRODUCTION



- An original approach proposed by A. Gurevich [1] to improve RF cavities through depositing a superconducting multilayer capable of screening efficiently the magnetic field.

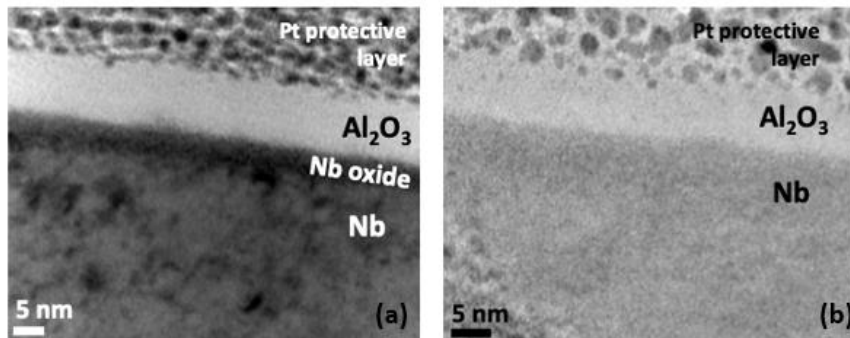
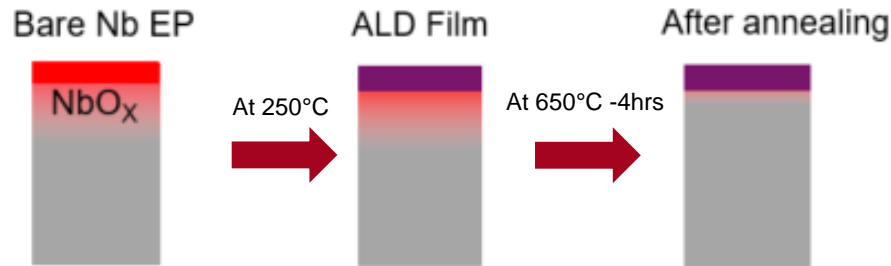


- The multilayer is a stack of nanometric films of high T_c superconductors and insulators.
- To synthesize this structure, we use atomic layer deposition ALD as a deposition technique as it well known to provide high quality Nano-films over large surfaces with complex shapes such as RF cavities.

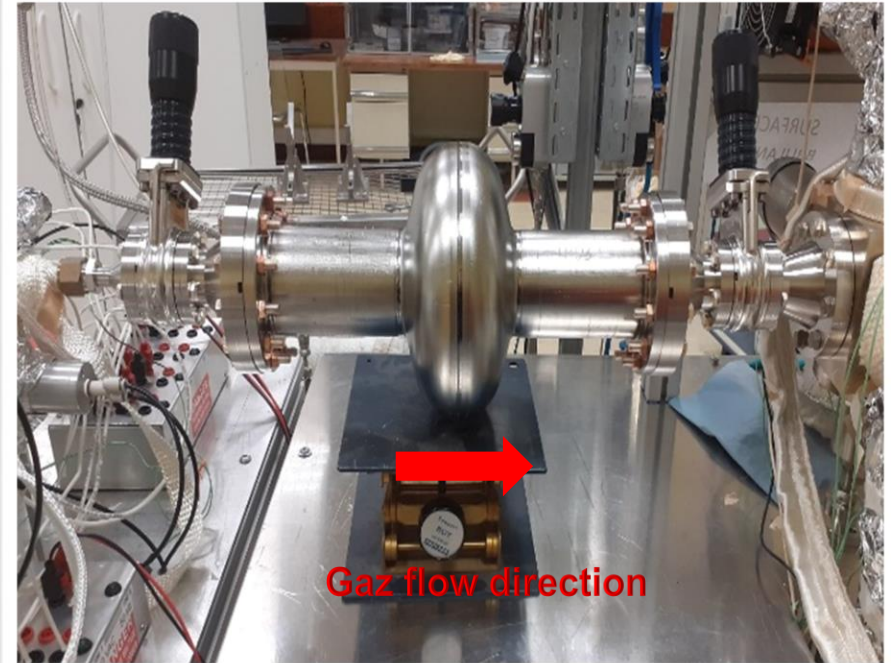
[1] A.Gurevich, Enhancement of RF breakdown field of SC by multilayer coating. Appl. Phys.Lett, 2006.

ALD PROTECTIVE LAYER

- First Step: Reduce Niobium native oxides which are deleterious for superconductivity and replace it with a thermally stable ALD-deposited diffusion barrier.



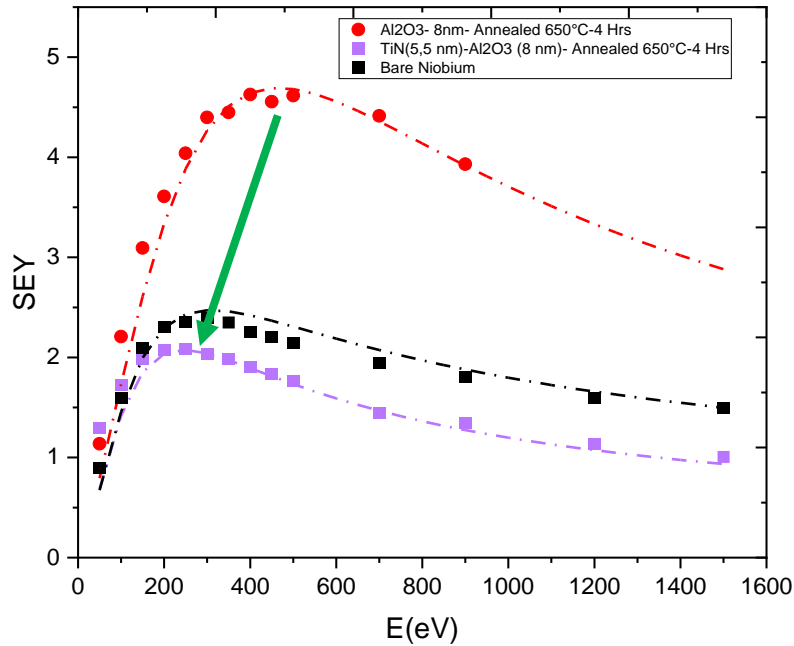
Transmission Electron Microscopy bright-field images (JANNuS-SCALP facility @ IJCLab) of 10 nm thick Al_2O_3 films deposited on niobium : (a) as-deposited ; (b) after annealing at 650°C , 4 hrs.



- We manage to deposit uniformly a thin film of alumina.
- RF test shows a slight Improvement of the Q_0 at low field that increases with the accelerating gradient..
- Strong Multipacting barrier found at 18 MV/m that cannot be processed...
- Why and how to mitigate this effect?

SEY ON ALD-DEPOSITED FILMS

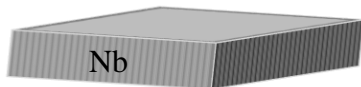
SEY measurment @IJClab



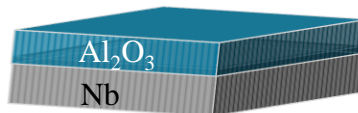
Picture of the new ALD system under construction



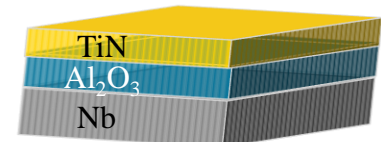
SEY= 2,5



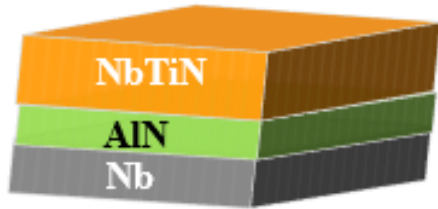
SEY= 4,5



SEY = 2



BILAYER ALN - NBTiN

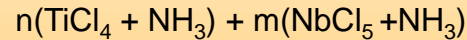


Motivation

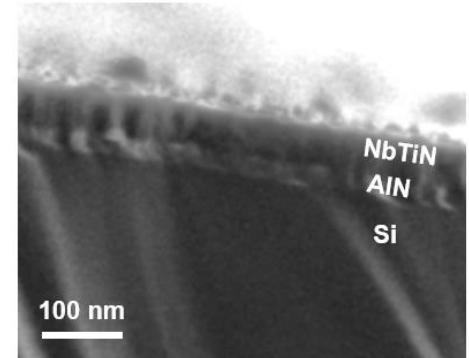
NbTiN has good superconducting performance ($T_c = 17$ K)

Results

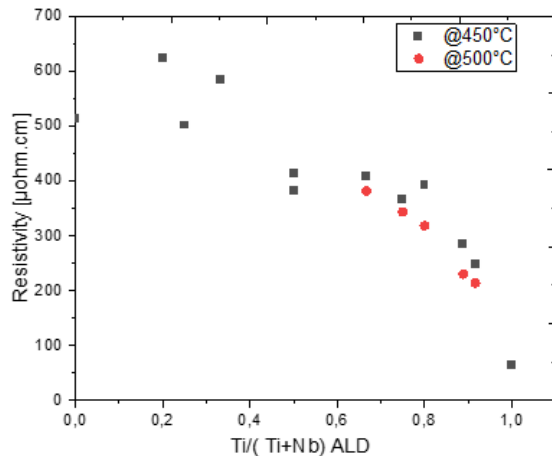
- Chemistry: Combination of $\text{NbCl}_5/\text{NH}_3$ and $\text{TiCl}_4/\text{NH}_3$ cycles:



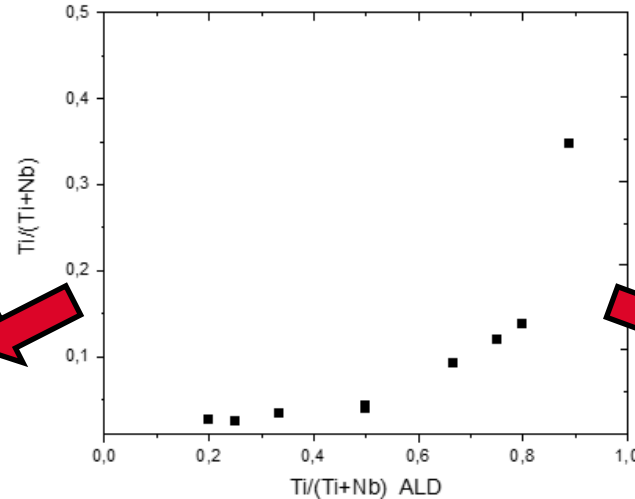
- Ti content varies with $\text{TiCl}_4:\text{NbCl}_5$ Ratio non linearly.



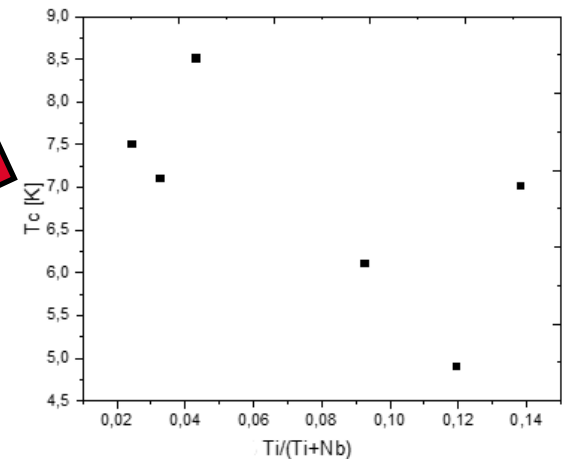
Resistivity variation with Ti/(Ti+Nb) ALD cycles



Ti/(Ti+Nb) variation with Ti/(Ti+Nb) ALD cycles

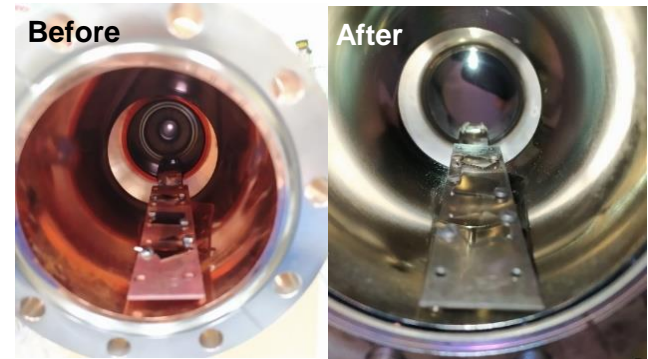
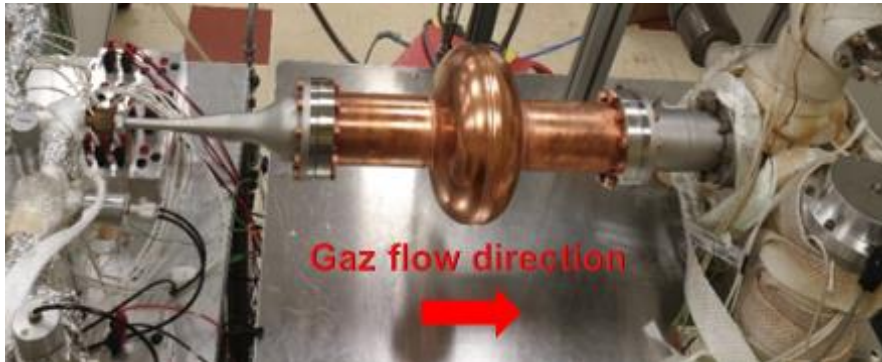


T_c variation with % Ti/(Ti+Nb) content in NbTiN films

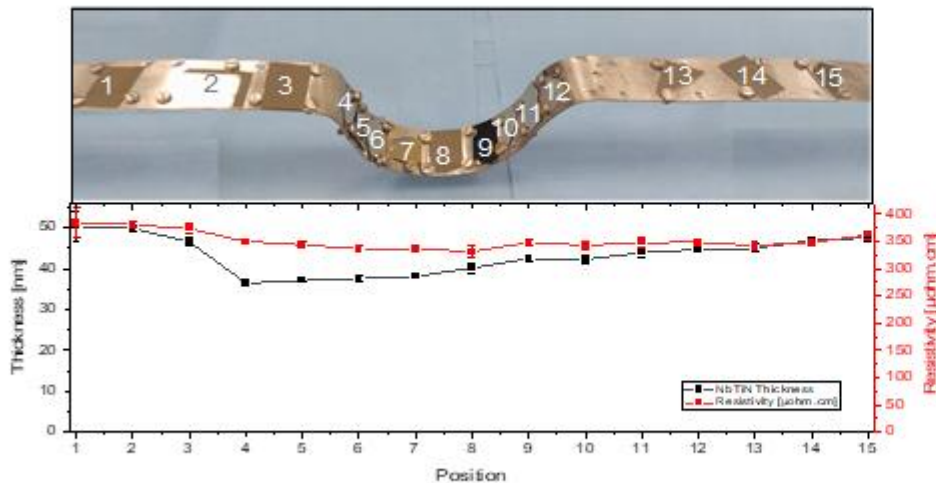


- Ti content varies with $\text{TiCl}_4:\text{NbCl}_5$ Ratio non linearly.
- Highest T_c by ALD without any post-treatment.

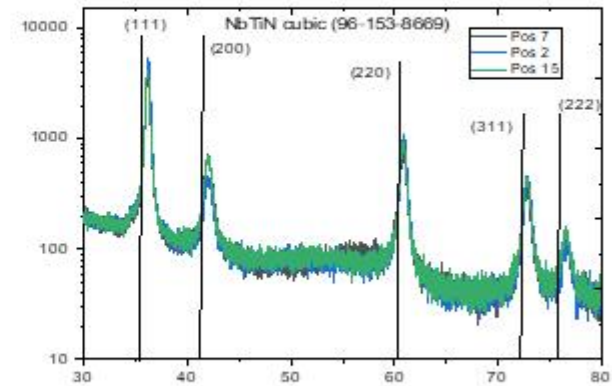
ALN-NBTIN ON COPPER 1,3 GHZ CAVITY



Test 2 : purge 20s



GIXRD diffraction patterns on different samples



- Chemical, structural and electronic properties are homogeneous along the cavity.

CONCLUSION

Achievements:

- We manage to deposit uniformly a thin film of alumina and reduce drastically niobium native oxides.
- First RF test to show an improvement of the Q_0 under low and medium Fields with ALD.
- TiN film is promising to reduce multipacting inside RF structures (cavities, couplers ...) and a patent is under submission.
- Growth of superconducting NbTiN by ALD with homogeneous composition and thickness control over large surface areas.
- First growth of superconducting multi-layer in an SRF cavity.

Future Goals:

- Optimization of NbTiN process to improve superconducting properties.
- Test the NbTiN-AlN structure on Niobium RF cavities.
- ALD deposition of other superconductors.

Thank you for your attention

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Comportement transitoire d'une bobine REBCO NI ou MI (multi galettes ou racetrack) utilisant un modèle PEEC. Influence de la résistance de contact entre les spires.

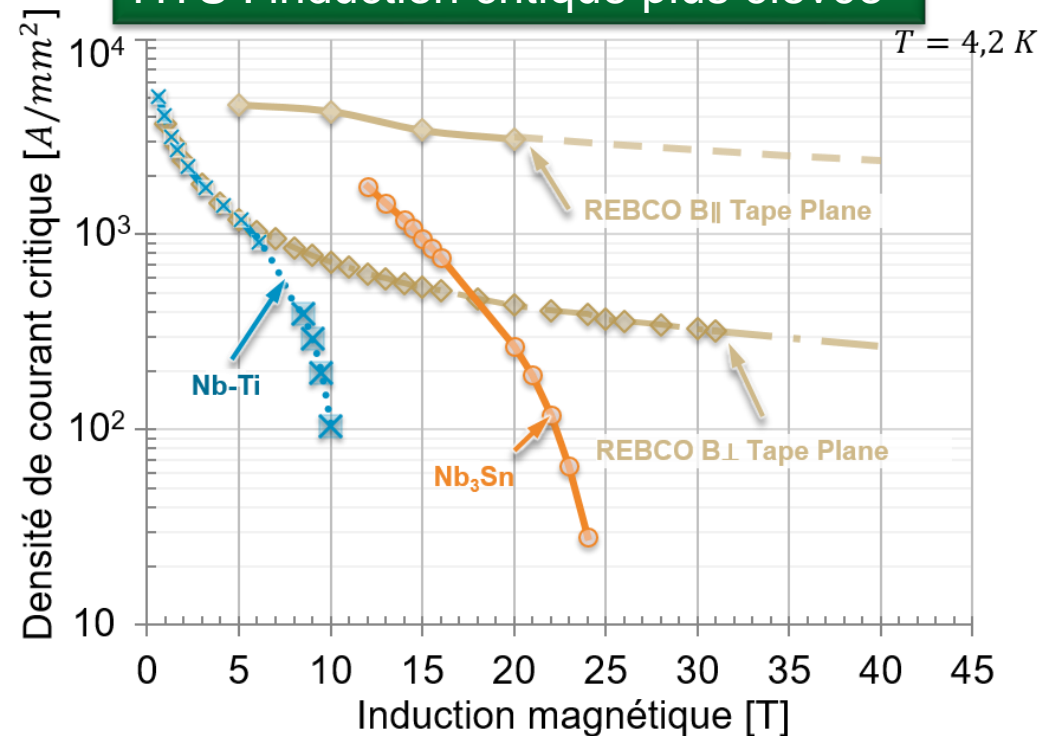
D-Day

*Thésard : **Clément GENOT***

*Directeur de thèse : **Pascal TIXADOR***

*Encadrants : **Thibault LECREVISSE**
et **Philippe FAZILLEAU***

HTS : induction critique plus élevée

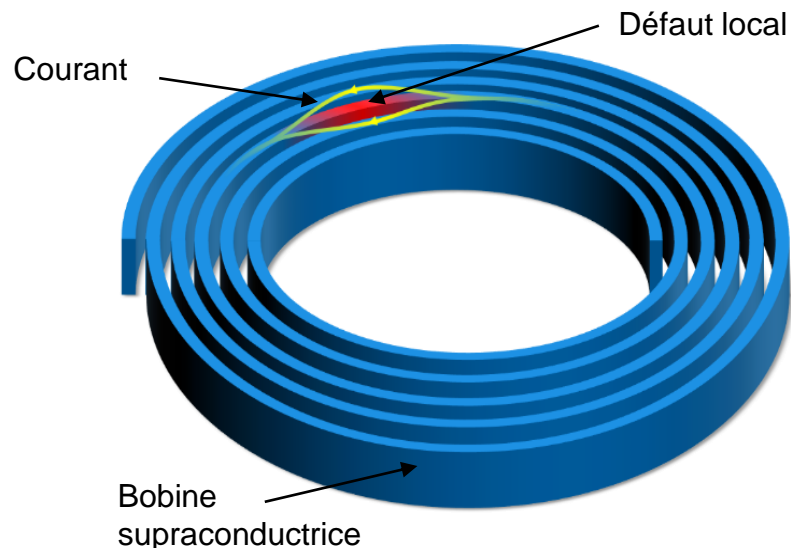


Galettes HTS

→ ruban enroulé sur lui-même

Stabilité thermique : isolation *NI* ou *MI*

→ retirer l'isolation du ruban permettant de contourner le défaut local dans la galette



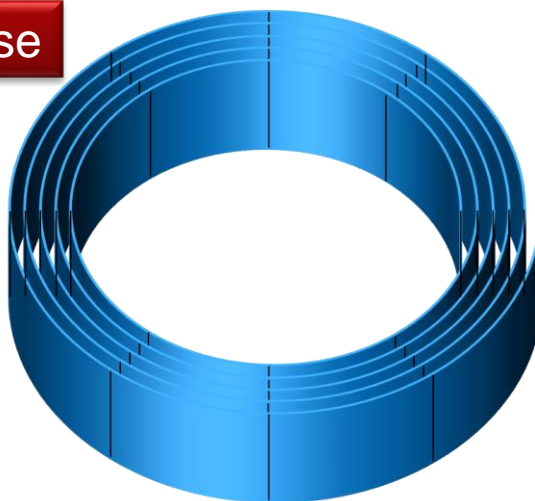
Problème de protection :

Faible vitesse de propagation du quench : une très faible zone devient résistive ce qui rend la protection plus complexe

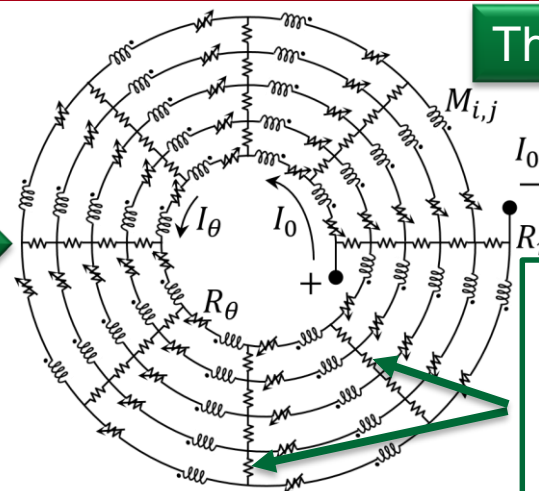
Retirer l'isolation :

- + : Moins sensibles aux dégradations locales
- : Perte du contrôle du chemin du courant
- : Nouvelle répartition des contraintes

Modèle de base



Thermoélectrique



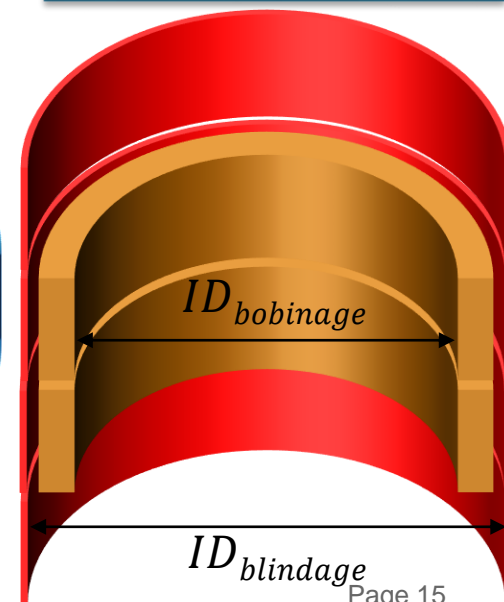
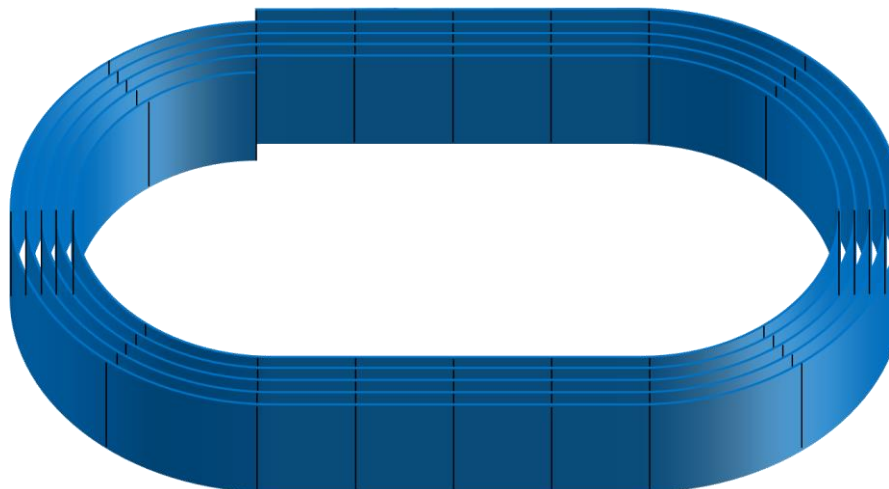
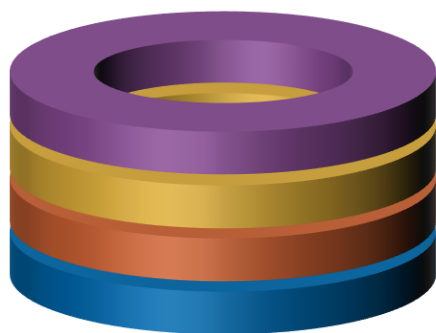
Paramètre important :
la résistance
de contact R_{ct}

Modèles
développés

Racetrack

Bobinage extérieur

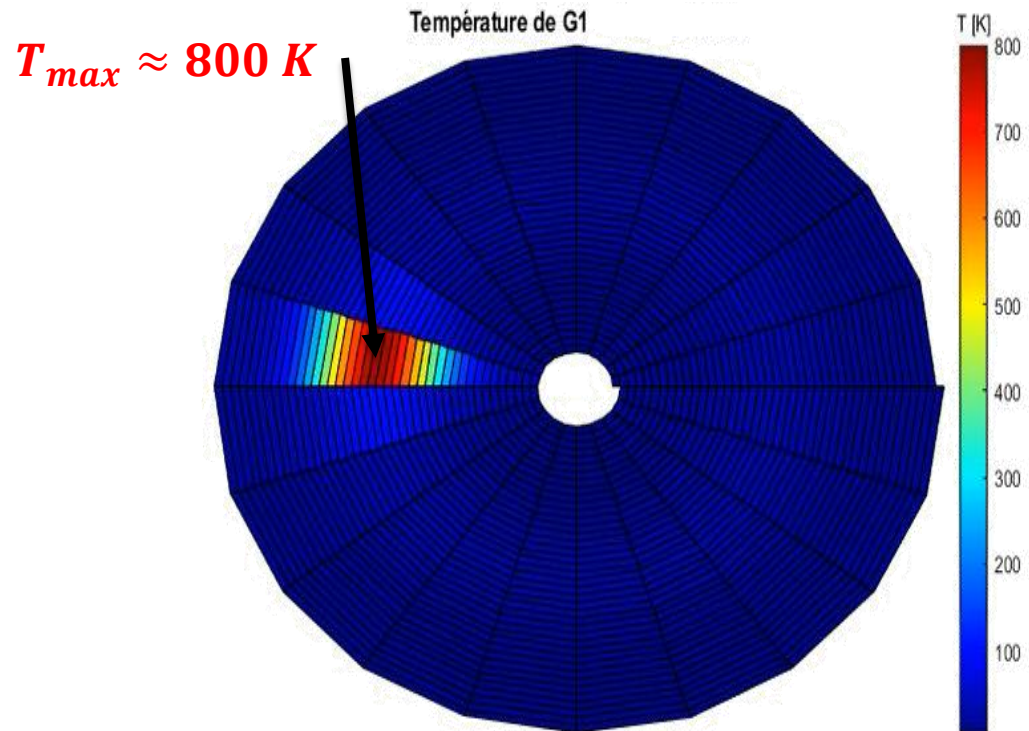
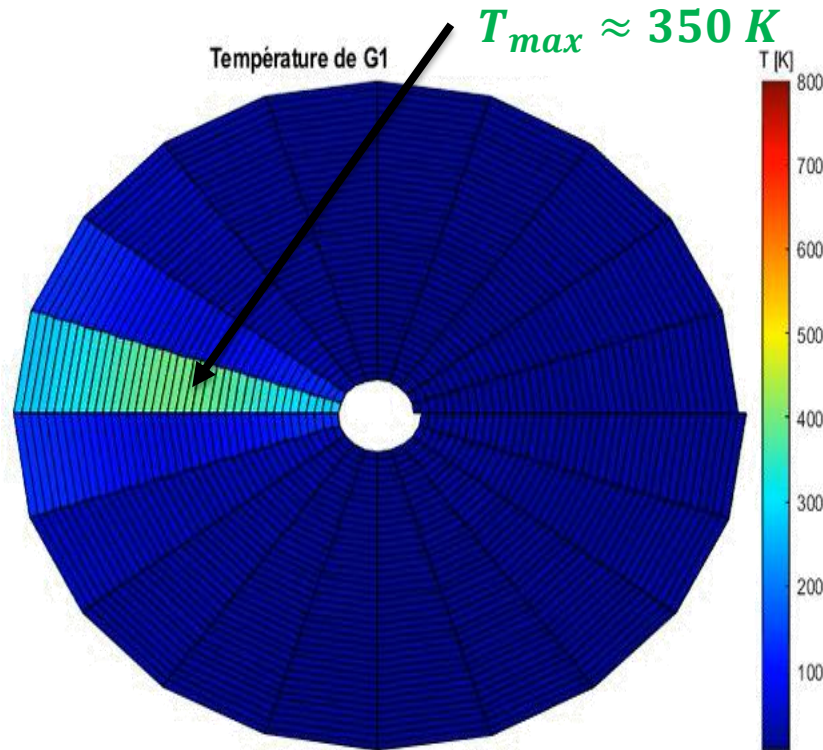
Multi Galettes



$$R_{ct} = 10^3 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$$

Recherche de la valeur de R_{ct}
optimale pour protéger la bobine

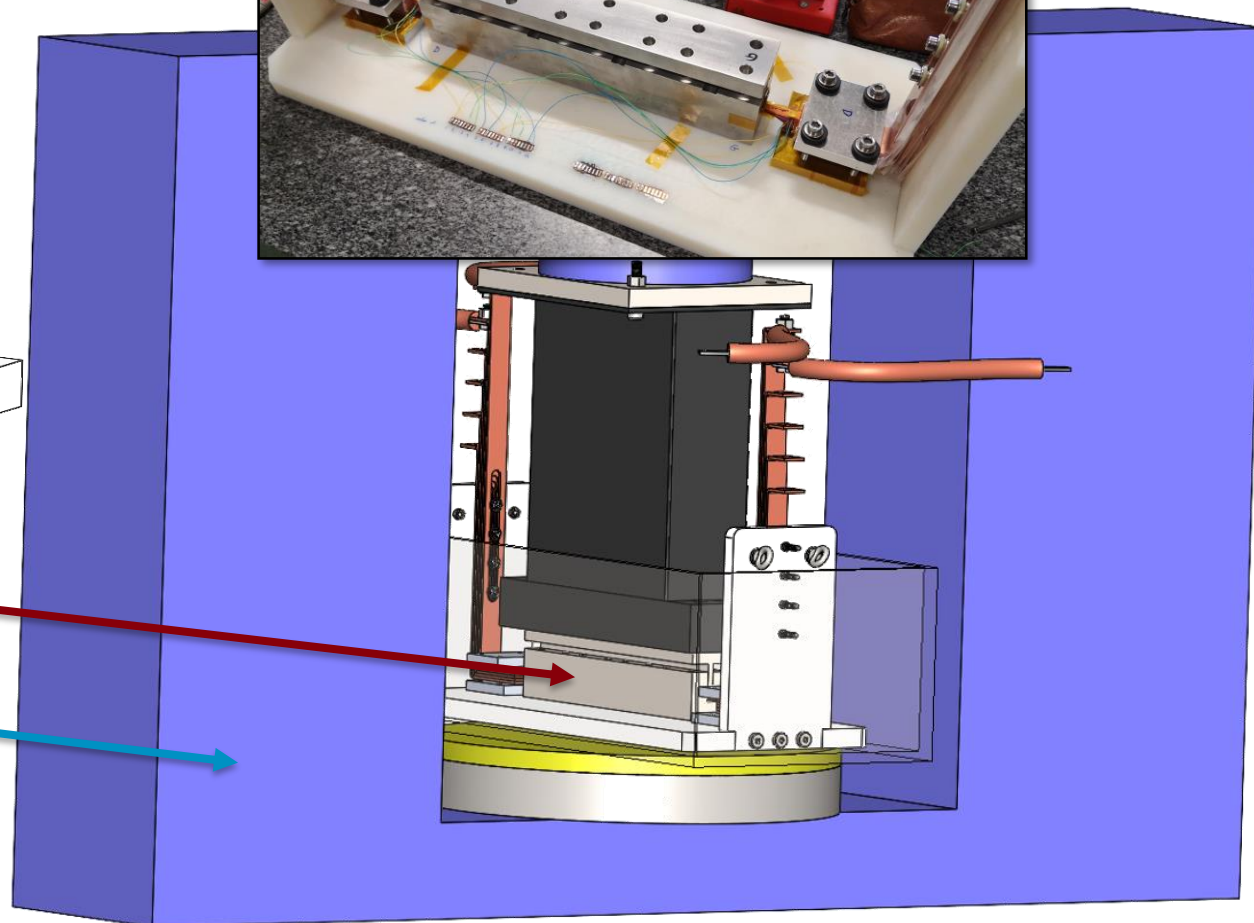
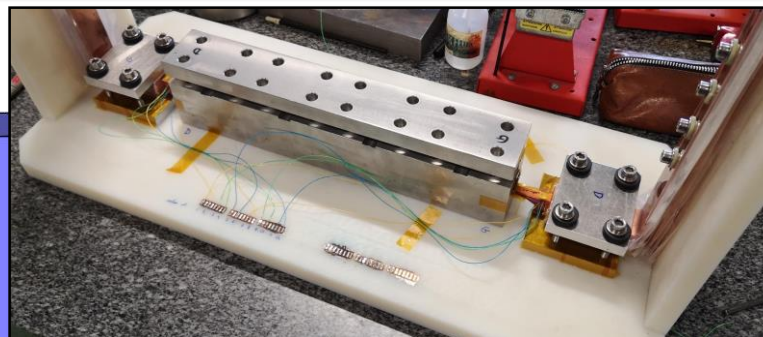
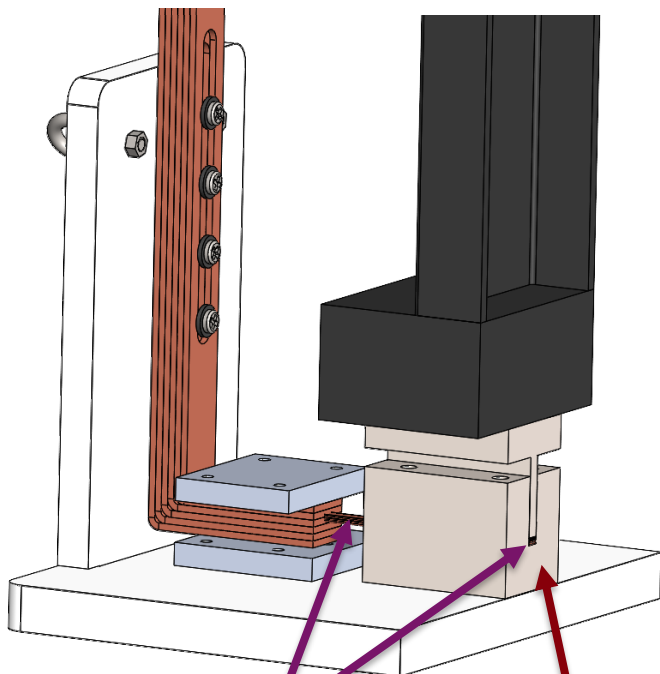
$$R_{ct} = 10^6 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$$



- + : Redistribution du courant
- + : Température maximale limitée
- : Temps de charge élevé

- + : Redistribution du courant très limitée
- : Température maximale importante
- + : Temps de charge faible

Mesure de la résistance de contact entre des rubans supraconducteurs HTS en fonction de la contrainte.

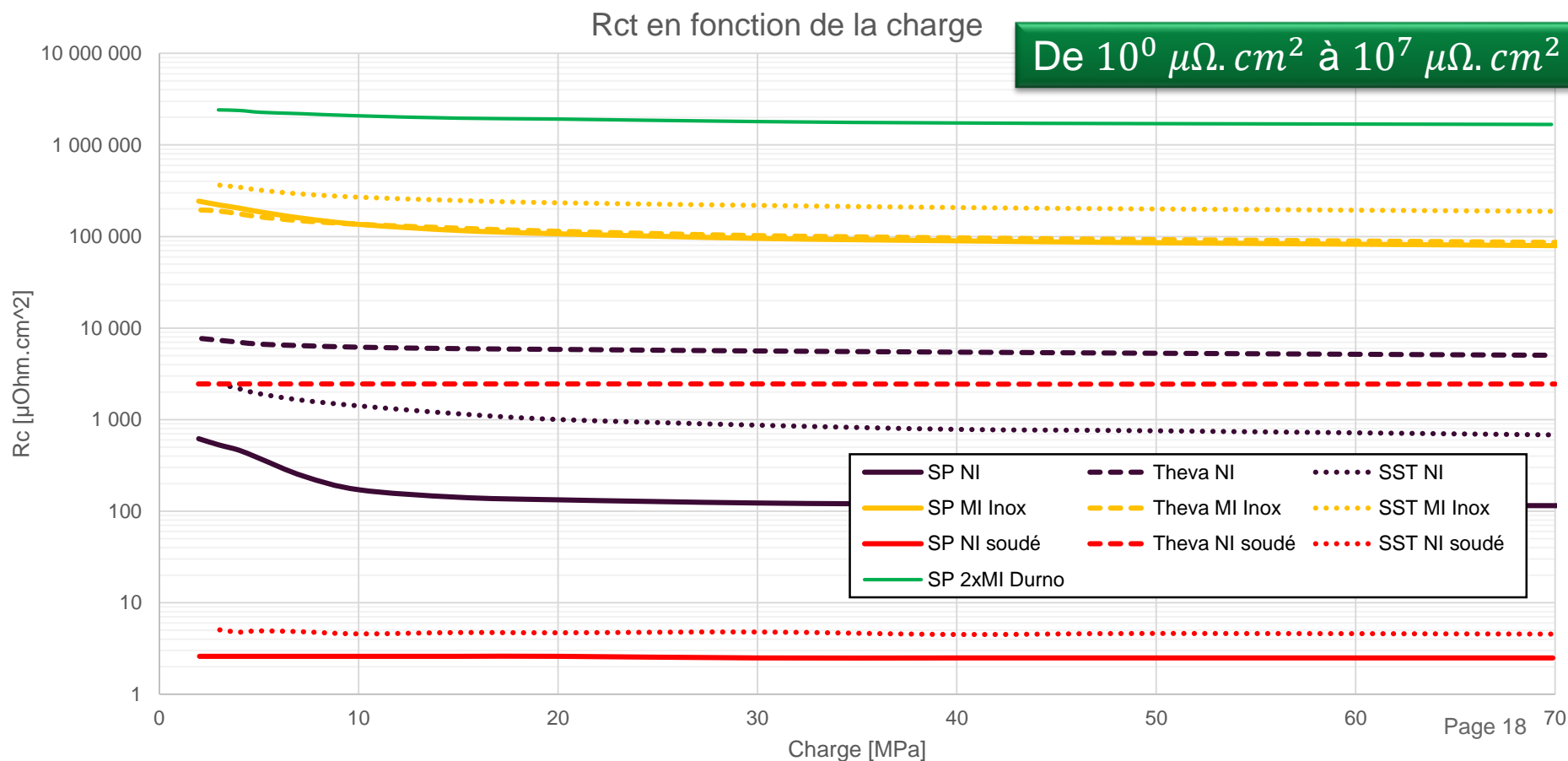


- ✓ Stack de ruban HTS
- ✓ Dispositif pour compression
- ✓ Presse mécanique

Jusqu'à 70 MPa sur 1800 mm²
→ 12,6 T

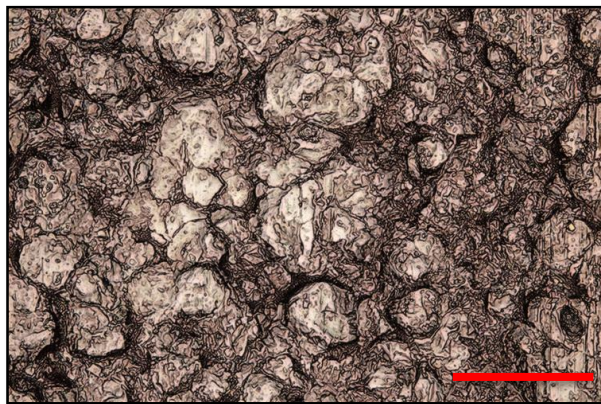
PARTIE EXPÉRIMENTALE : MESURE DE LA RÉSISTANCE DE CONTACT ENTRE DES RUBANS

$R_{ct} [\mu\Omega \cdot cm^2]$	<i>SuperPower</i>	<i>Theva</i>	<i>SST</i>
<i>NI</i>	[200 ; 4 000]	[4 000 ; 15 000]	[700 ; 6 000]
<i>MI Inox</i>	[70 000 ; 300 000]	[60 000 ; 250 000]	[190 000 ; 600 000]
$2 \times MI$ Durnomag	[1 600 000 ; 2 500 000]		
<i>NI soudé</i>	2,6	2500	6,6

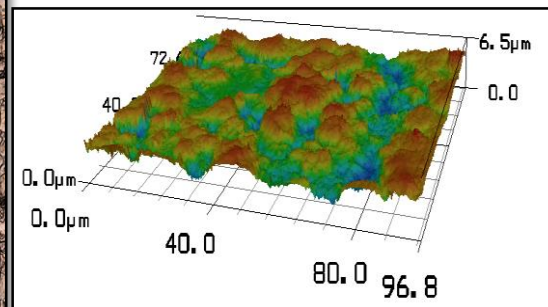


CONCLUSION : RÉSISTANCE DE CONTACT ENTRE DEUX RUBANS

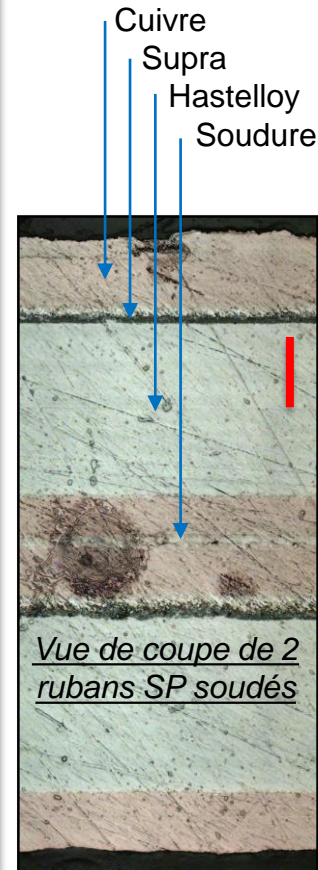
- Diminution de R_{ct} avec une augmentation de la compression
- R_{ct} est principalement générée par les interfaces entre les rubans : souder revient à s'affranchir de cette R_{ct}
- L'ajout de matière (MI) ne vient pas modifier la R_{ct} , c'est l'ajout d'interface qui augmente R_{ct}
- La R_{ct} dépend de la nature de l'interface (du niveau de dureté du matériau, de sa rugosité, de son oxydation)



20 μm



État de surface ruban SP HTS côté supra



Suites des activités :

- Dépôt ALD (*atomic layer deposition*) pour modifier R_{ct}
- Simulations avec limitation en tension sur une bobine + comparaison expérimentale

Merci pour votre attention !



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Etablissement public à caractère industriel et commercial | R.C.S Paris B 775 685 019

Tel : +33 1 69 08 xx xx – Fax : +33 1 69 08 xx xx

Direction de la Recherche Fondamentale

Institut de recherche
sur les lois fondamentales de l'Univers

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Study and modelling of the thermohydraulic phenomena taking place during the quench of a superconducting magnet cooled with superfluid helium

D-Day

*Thésard : **Unai DURAÑONA***

*Directeur de thèse : **Bertrand BAUDOUY***

*Encadrants : **Walid ABDEL MAKSOUD***

- ❑ Quench : transition from superconducting state to resistive state
- ❑ To protect the coils, quench needs a propagation speed high enough to be detected

Analytical correction

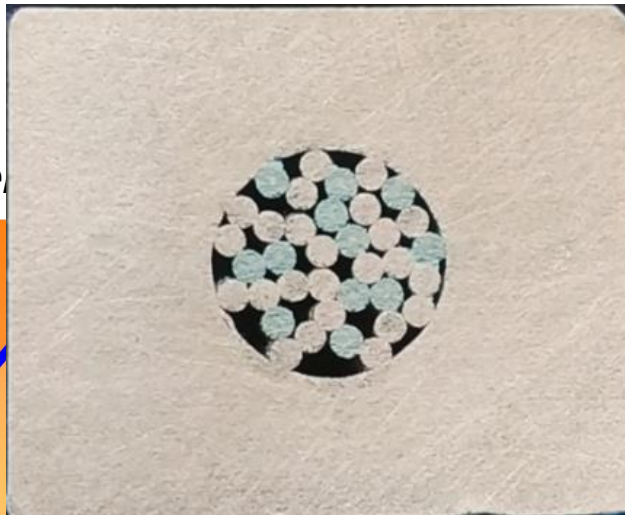
long coil
high pressure rise

$$v_{quench} = 0.766 \left(\frac{D_h}{2 f t_M} \right)^{1/5} \left(\frac{R L_q}{c_0} \frac{1}{f_{st}} \frac{\eta_{st} J_{op}^2}{C} \right)^{2/5}$$

long coil
low pressure rise

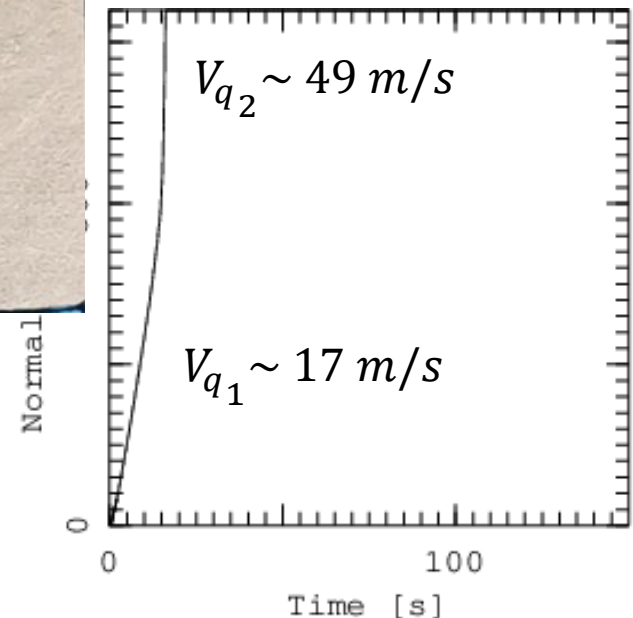
$$v_{quench} = \frac{R \rho_0 L_q}{2 p_0} \frac{1}{f_{st}} \frac{\eta_{st} J_{op}^2}{C}$$

$$V_q \sim 3 \text{ cm/s}$$



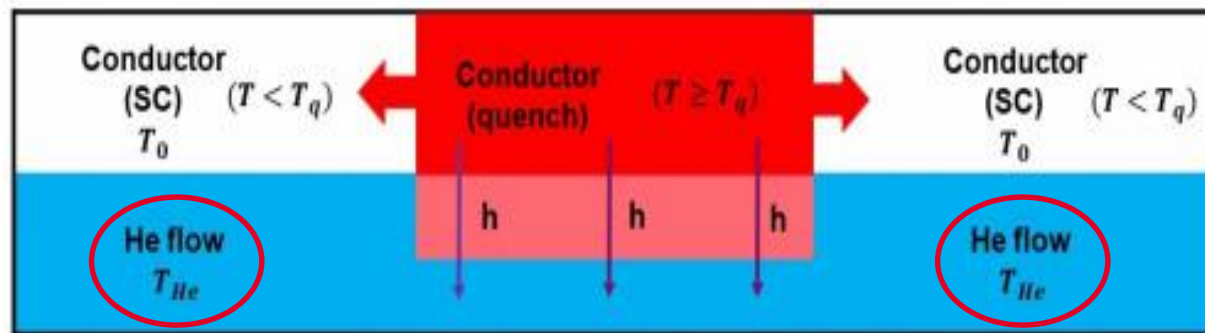
CICC conductor
short coil
low pressure rise

Numerical calculation



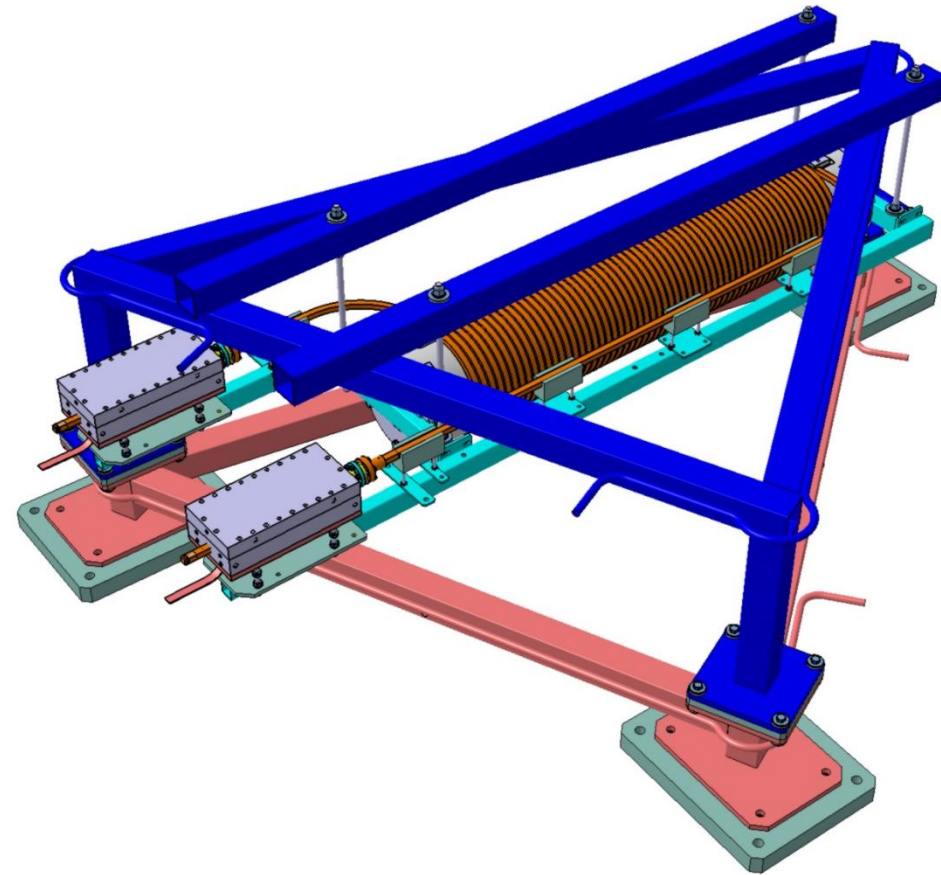
□ Analysis of the THEA model:

- Friction forces pre-warm the magnet by local energy deposit (before the quench arrival), until reaching current sharing temperature (T_{cs})
- After reaching T_{cs} , a « new » quench starts far away from the propagation front : Thermal Hydraulic Quench Back (THQB)
- Depends on the friction coefficient ...



- MACQU integrated in the JT60-SA cryostat during March/May 2021

Parameters	Values	Units
Operating temperature	1.8	K
Nominal current	21.6	kA
Max. field	2.30	T
RRR	60	
Conductor length	50	m
Section of Cu	175	mm ²
Number of strands	12 Sc / 24 Cu	
Cu/Sc	1.105	
Coil weight	150	kg
Self	0.19	mH
Magnetic stored energy	43.5	kJ
Discharge voltage	130	V



MACQU coil with its structure



- ❑ 2 quench campaigns (May & July)
 - ❑ 17.5 kA reached : 80% of nominal current (objective : 21.5 kA)
- ❑ Modifications to improve the system
 - ❑ Removing of the pre-cooling system
 - ❑ Removing of G10 plate to limit the impact of training
- ❑ Several other tests done during summer 2021
 - ❑ PURE THERMAL HYDRAULIC TESTS, MQE, COOLING DOWN TECHNIQUES ...

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Comportement du Nb_3Sn Lors du Traitement Thermique pour les Futurs Aimants d'Accélérateurs

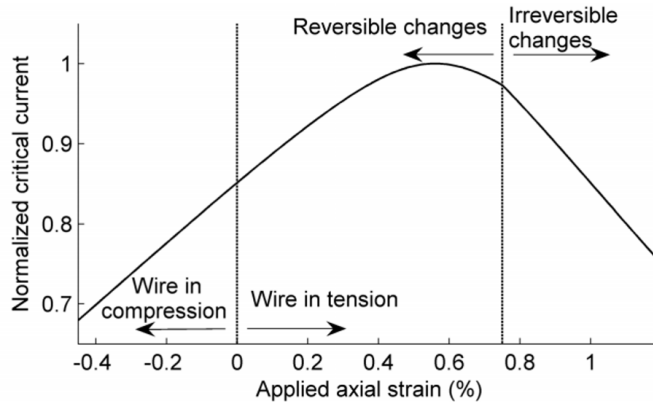
D-Day

M. Abdel Hafiz^{1,2}

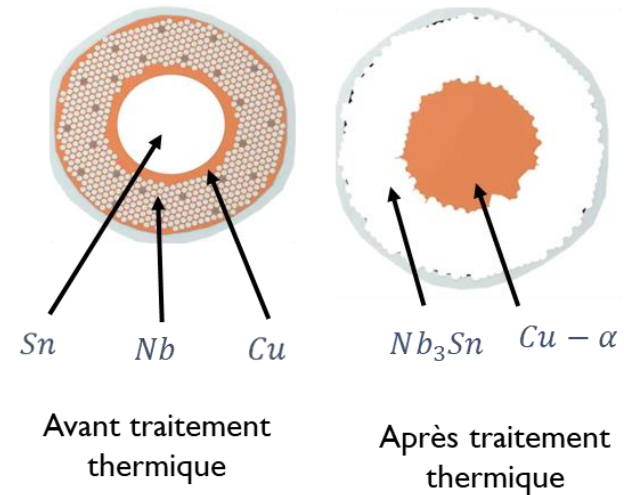
E. Rochepault¹, H. Felice¹, C. Lorin¹
K. Lavernhe², O. Hubert²

¹CEA Paris-Saclay/LEAS

²ENS Paris-Saclay/LMT



Ahoranta, M. 2008



Sanabria, C. 2017



Pong, I. 2015

Problème :
Nb₃Sn fragile

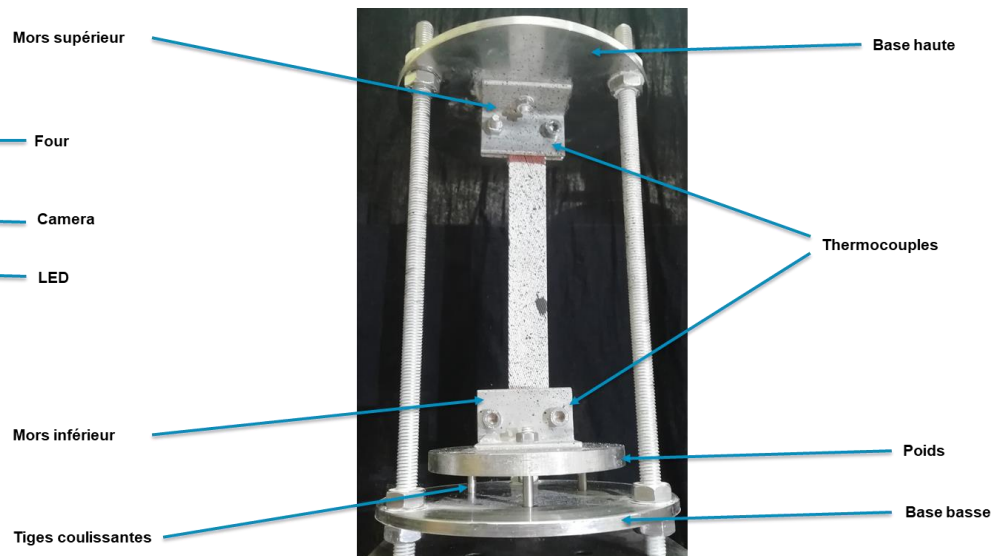


Bobinage avant
traitement thermique

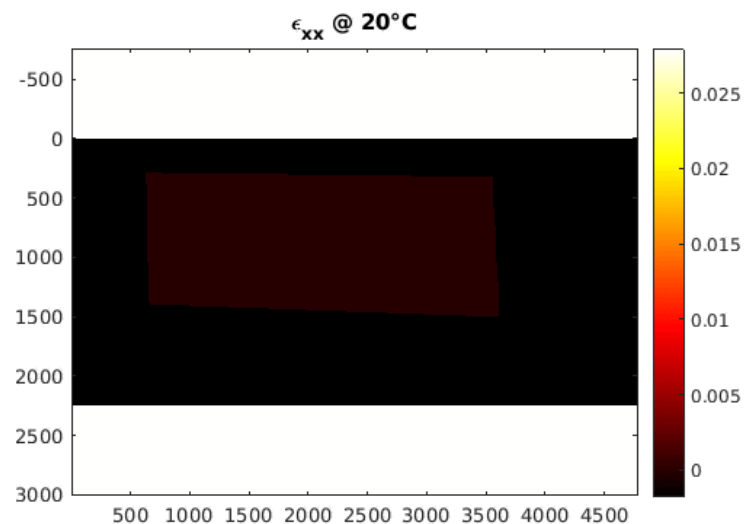
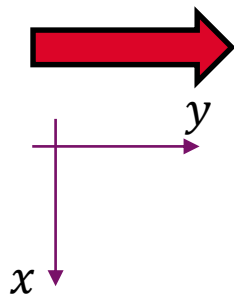
2 Objectifs :

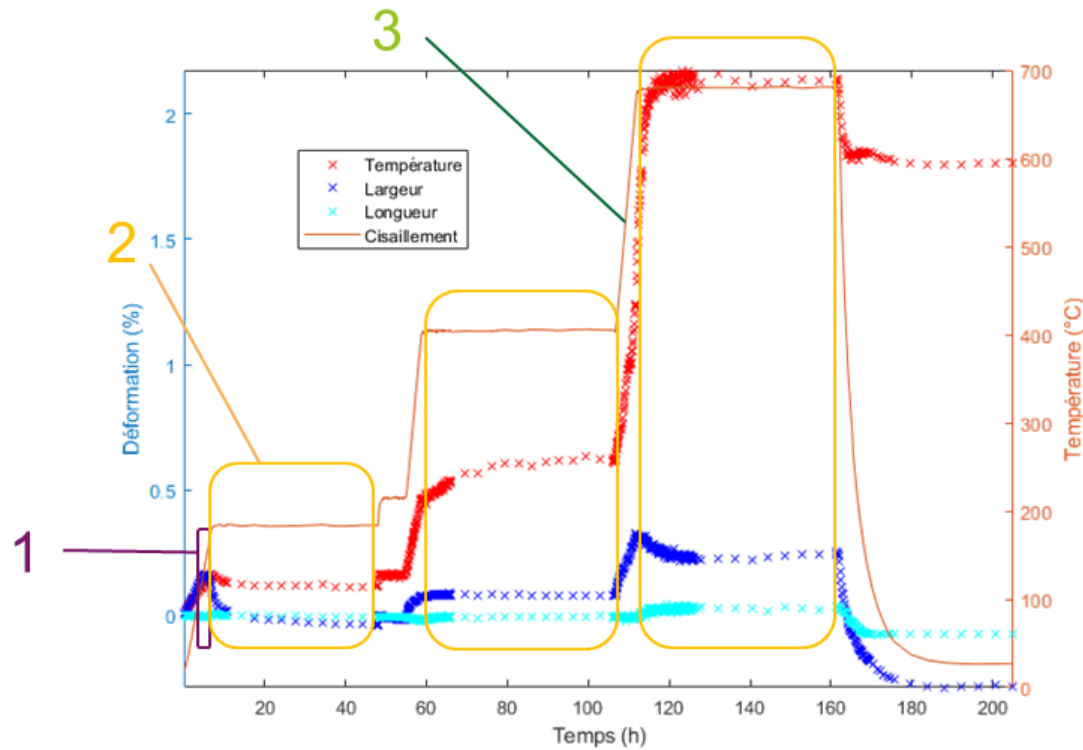
- Etudier la dynamique des changements de dimension
- Estimer l'état thermo-mécanique durant le traitement thermique

Essai sous atmosphère contrôlée (flux d'argon)

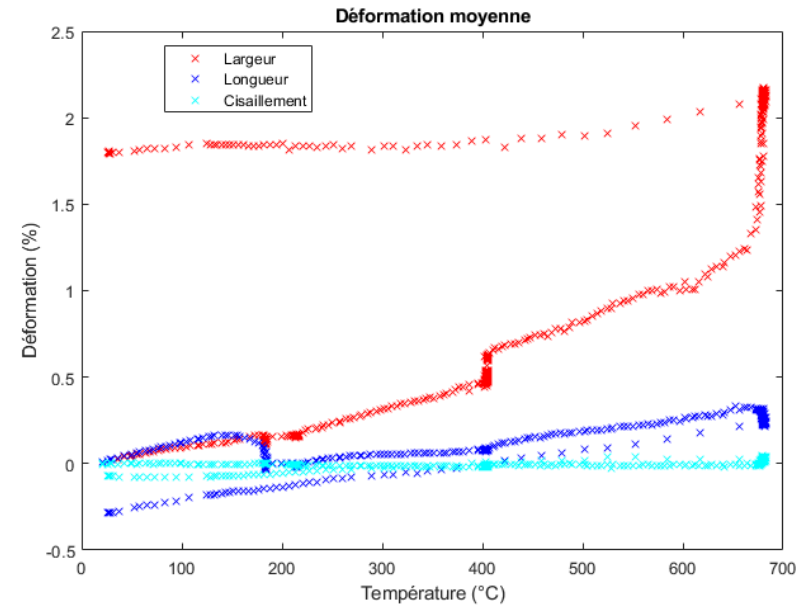


Longueur du câble



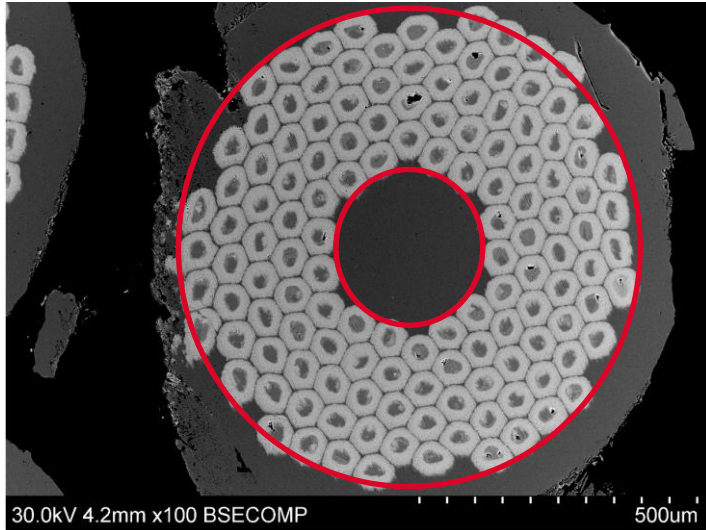


1^{re} mesure in-situ bidimensionnelle



3 phénomènes physiques :

1. Recristallisation du cuivre (littérature)
2. Changement de phase
3. Dilatation thermique



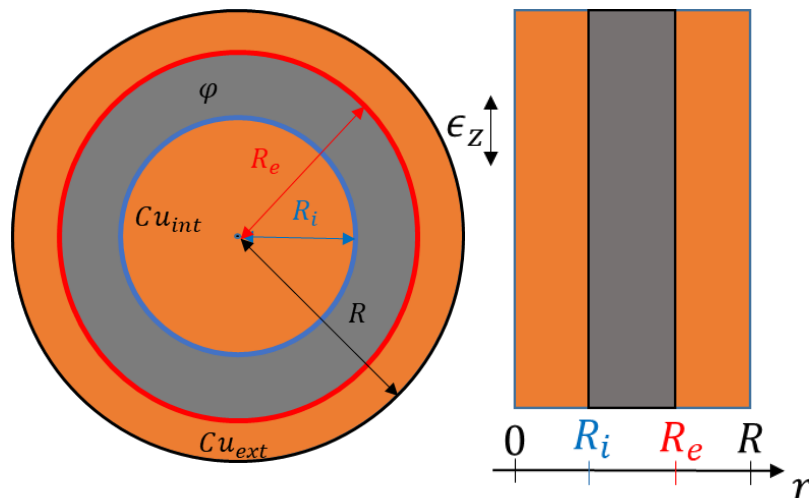
1^{er} modèle mécanique du traitement thermique

3 Origine de la déformation

ϵ^e Une déformation d'origine mécanique

ϵ^{th} Une déformation d'origine thermique

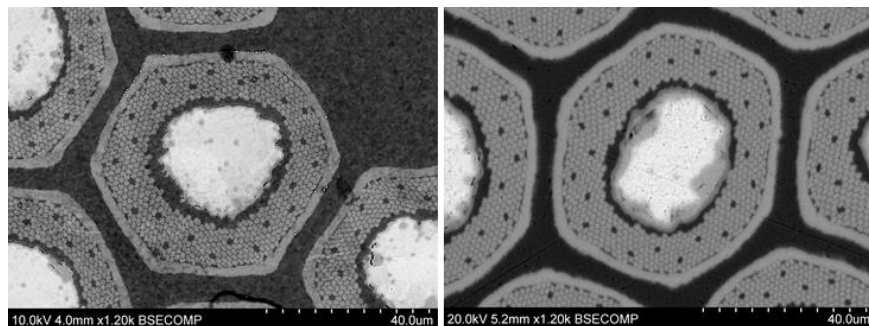
ϵ^{ch} Une déformation d'origine chimique



2 matériaux

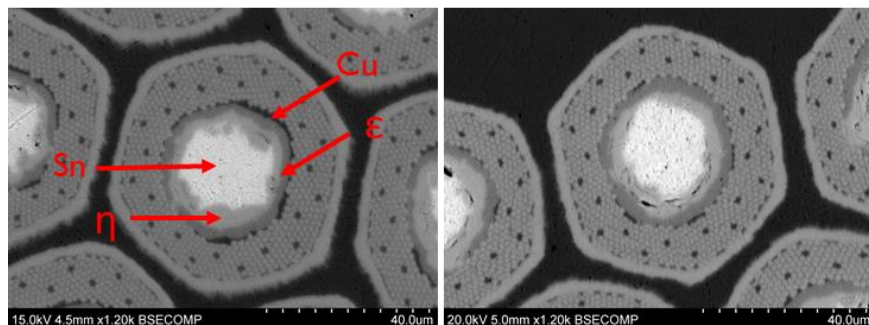
Cu Cuivre recristallisant

φ Matériau Homogène Equivalant isotrope transverse



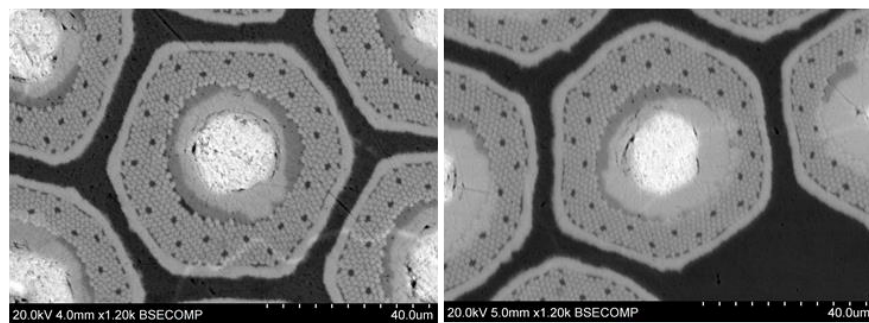
Unreacted

Ramp



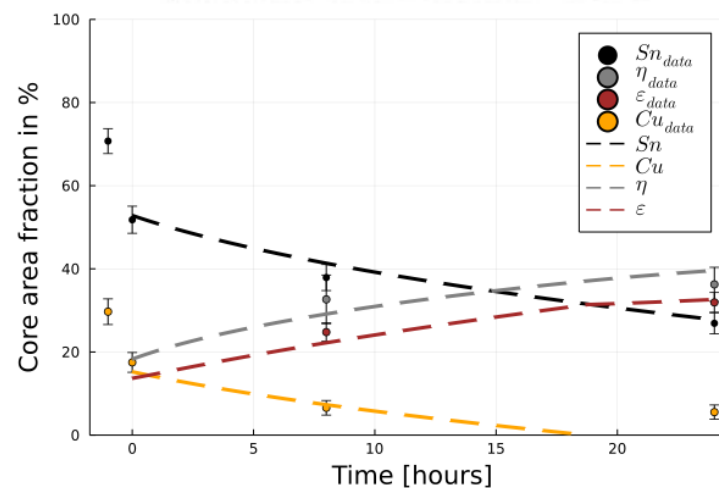
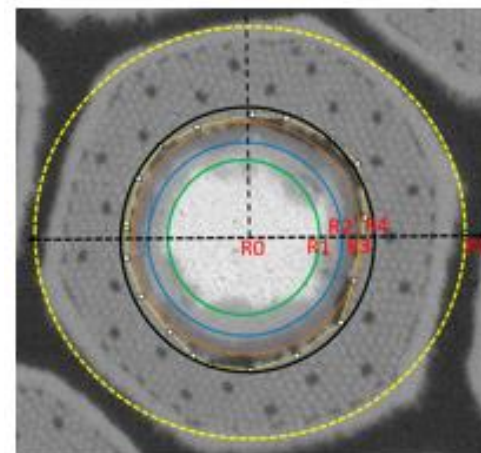
8 hours

24 hours



32 hours

72 hours

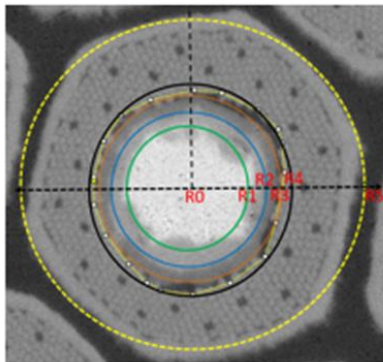


1 HT step, 215 C, time = 0.0 hours

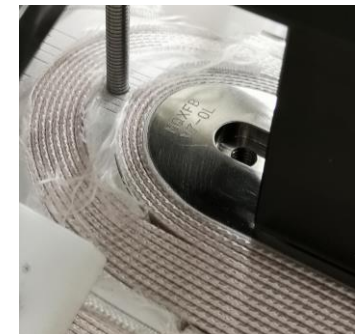
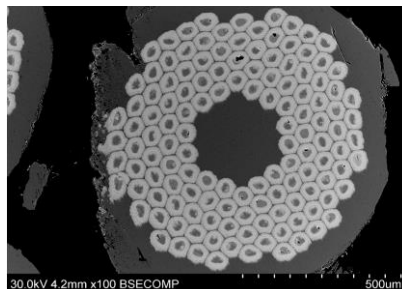
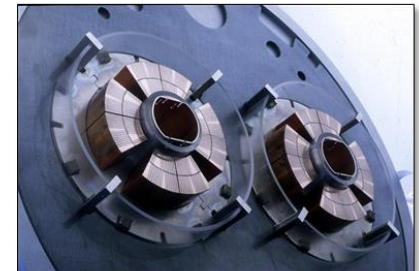


POUR RÉSUMÉ : UN PROBLÈME MULTI-ÉCHELLE

Des filaments ...



... Aux électro-aimant



Merci pour votre attention !



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Etablissement public à caractère industriel et commercial | R.C.S Paris B 775 685 019

Tel : +33 1 69 08 xx xx – Fax : +33 1 69 08 xx xx

Direction de la Recherche Fondamentale

Institut de recherche
sur les lois fondamentales de l'Univers

- [1] : L. Evans, *The Large Hadron Collider : a Marvel of Technology*, EPEL Press. 2009.
- [2] : <http://hoffman.physics.harvard.edu/materials/SCintro.php>
- [3] : « Le plus grand accélérateur au monde | LHC France ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.lhc-france.fr/spip.php?article6>. [Consulté le: 02-mai-2019].