



Université de Lorraine - UR 4366

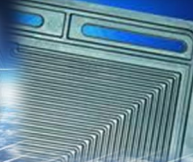
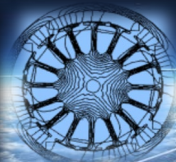
Pôle Scientifique « Energie Mécanique Procédés Produits »

Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy

# Séminaire Scientifique du GREEN

## Etudes des massifs supraconducteurs, synthèse caractérisation et application

12 septembre 2022



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE



EMPP  
Energie Mécanique  
Procédés Produits



INSTITUT  
CARNOT  
ICÉEL



Groupe de Recherche en  
Energie Electrique de Nancy

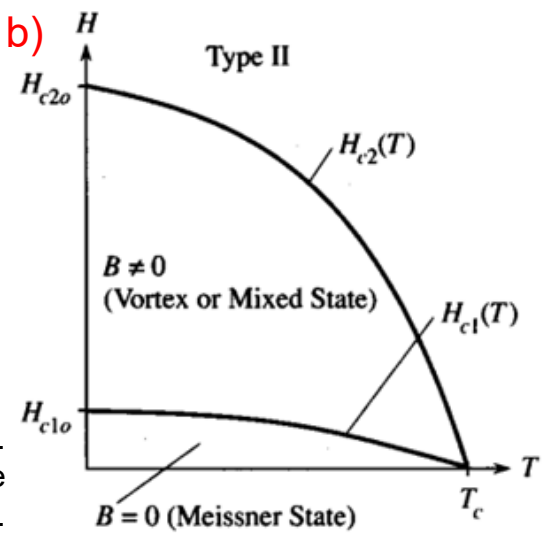
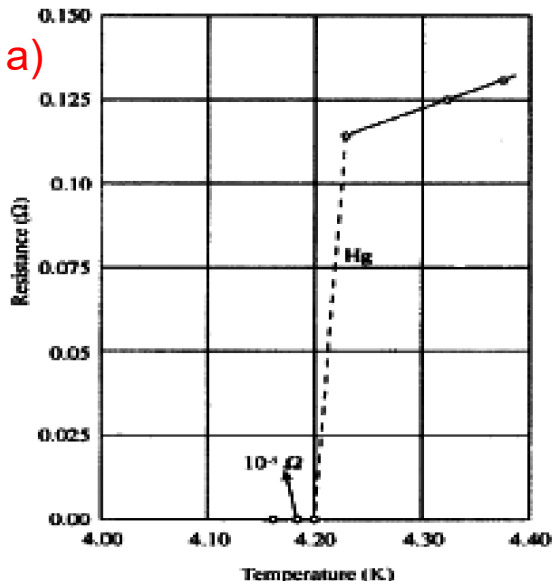
## ➤ Plan :

---

- Quelques bases sur la supraconductivité
- Supraconducteurs et applications technologiques
- Les massifs supraconducteurs
- La synthèse de massifs supraconducteurs
- La caractérisation de massifs supraconducteurs

# ➤ Quelques bases sur la supraconductivité

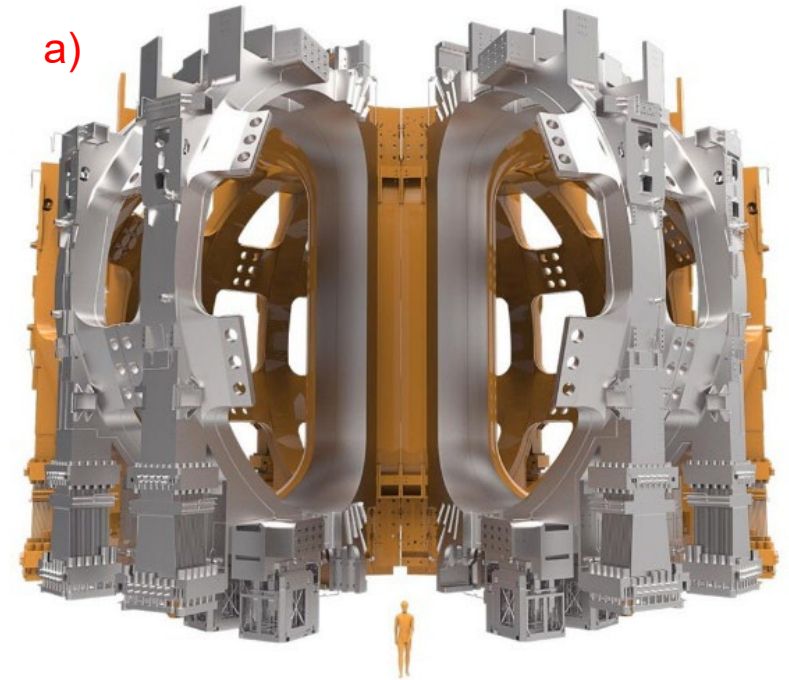
- Supraconducteur : Matériau qui perd toute résistance électrique en dessous d'une température appelée température critique  $T_c$
- La supraconductivité disparaît au-delà de propriétés "critiques" caractéristiques :
  - Température critique  $T_c$
  - Champ magnétique critique  $H_c$
  - Densité de courant critique  $J_c$
  - Champ d'irréversibilité  $H_{irr}$  (quand  $J_c < 100 \text{ A.cm}^{-2}$ )



a) Transition supraconductrice du Mercure découverte par Onnes en 1911.  
 b) Etats possibles d'un supraconducteur type II en fonction de la température et du champ magnétique.

# ➤ Supraconducteurs et applications technologiques

- Majoritairement à base de Niobium-Titane et refroidis à 4.2 K (He liquide)
- Utilisés dans les grands instruments
  - Accélérateur de particules (cavités accélératrices et aimants)
  - TOKAMAK pour la fusion nucléaire (aimants)
  - Aimants très hauts champs (>40 T)
- Dans le médical (IRM)
- Dans le transport (Maglev)



a) Schéma des aimants supraconducteurs Toroïdaux d'ITER

b) Photo du train Maglev Japonais

# ➤ Supraconducteurs et applications technologiques

## ➤ Applications technologiques au GREEN:

### ➤ Développement de câbles et de bobines supraconducteur

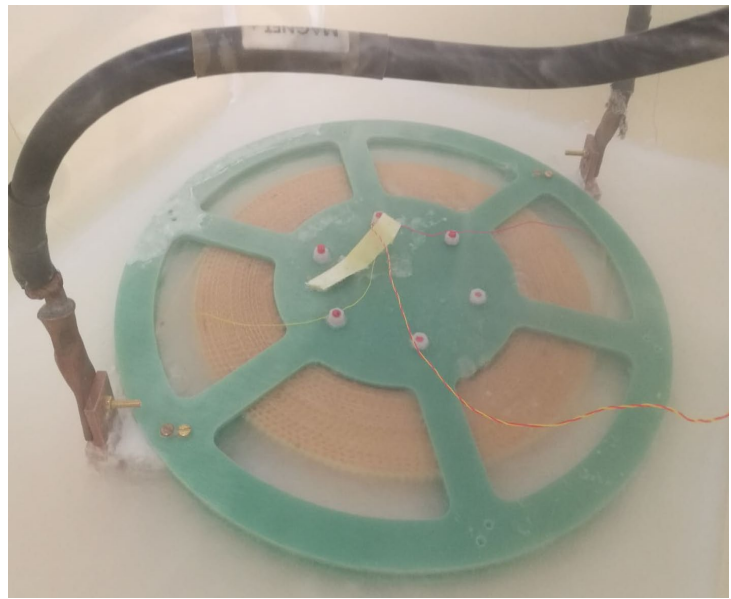
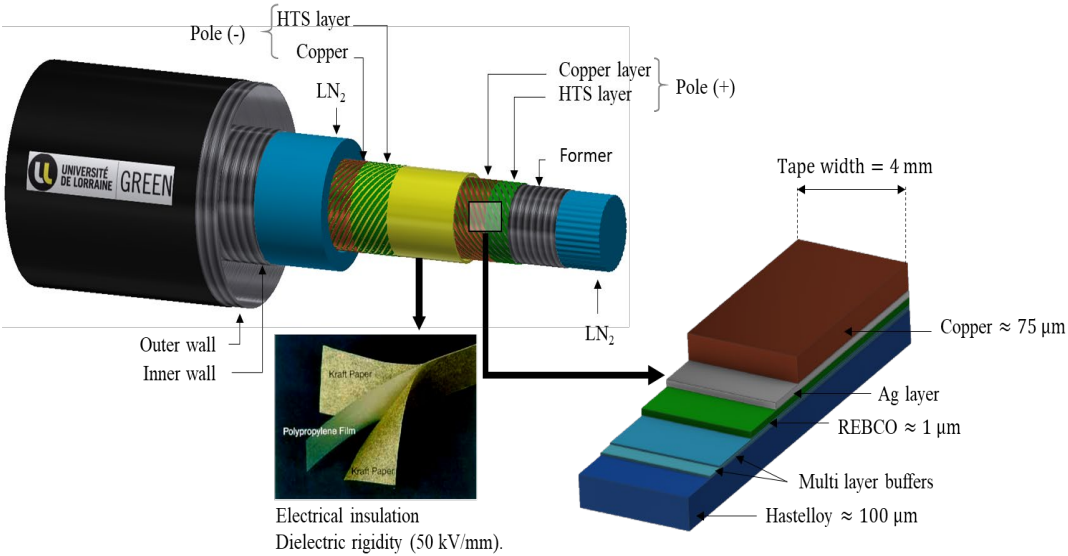


Schéma d'un câble supraconducteur en développement au GREEN utilisant des rubans supraconducteurs REBCO

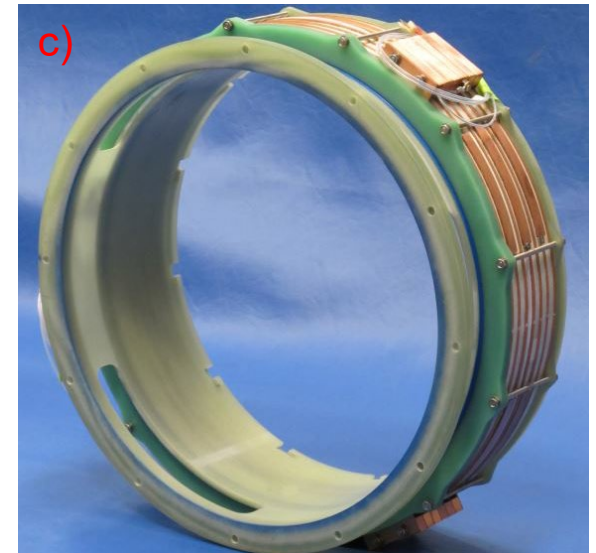
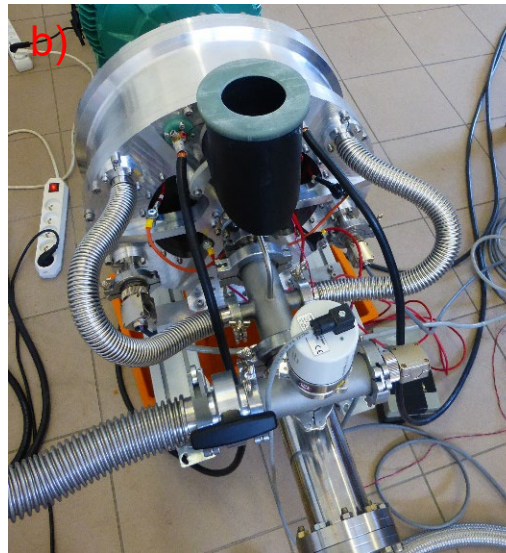
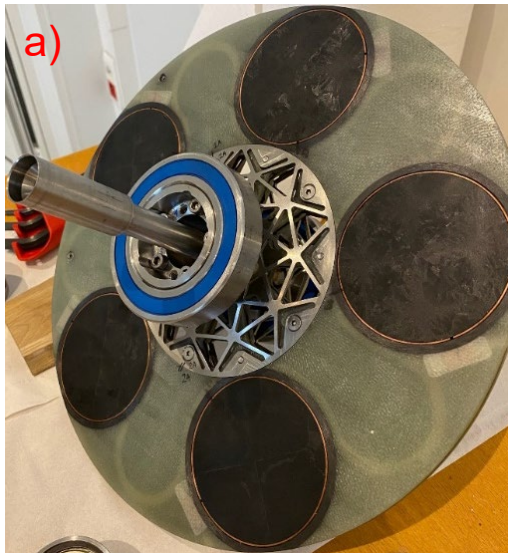
Photo de la bobine non-inductive en test au Laboratoire pour des applications de limiteurs de courants ou de filtres

- a) Schéma des aimants supraconducteurs Toroïdaux d'ITER
- b) Photo du train Maglev Japonais

# ➤ Supraconducteurs et applications technologiques

## ➤ Applications technologiques au GREEN:

- Réalisation d'un premier prototype de moteur supraconducteur
  - 50 kW de puissance
  - Rotor cylindrique en supraconducteur massif
  - Stator en ruban supraconducteur de première génération
  - En cours de test



a) Rotor avec des supraconducteurs massifs, b) Moteur supraconducteur monté, c) Stator en ruban supraconducteur

# ➤ Les massifs supraconducteurs

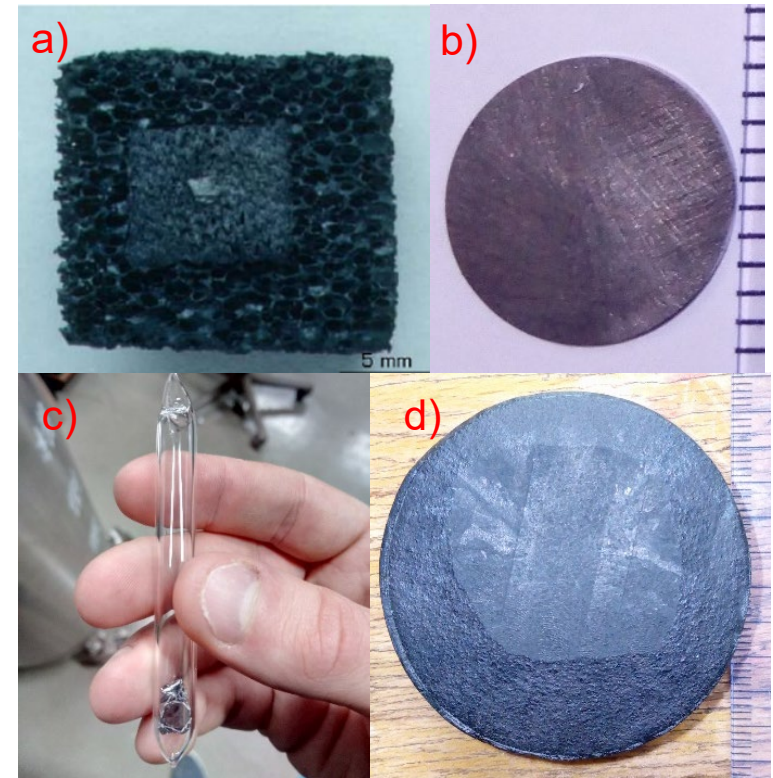
- Massif supraconducteur:
  - Bloc mono ou polycristallin de taille centimétrique
  - Généralement peu coûteux à fabriquer
  - Possibilité de "piéger" de très importants champs magnétiques (record du monde: 17.6 T à 26 K)
  - Facile à démagnétiser (réchauffer jusqu'à la température critique)
  - Peut être utilisé à la température de l'hydrogène liquide (20 K) ou celle de l'azote liquide (77 K)
- Une bonne alternative aux aimants permanents à base de terre rare



Lévitiation d'un massif supraconducteur commercial en GdBaCuO refroidi par de l'azote liquide au dessus d'un aimant permanent.

# ➤ Les massifs supraconducteurs

- De nombreux matériaux existent sous la forme de massif:
  - Yttrium-Barium-Cuivre-Oxygène (YBaCuO)
  - Bismuth-Strontium-Calcium-Cuivre-Oxygène (BiSrCaCuO)
  - Famille des Fer-Arsenic ou Fer-Sélénium
  - Magnésium-Bore ( $\text{MgB}_2$ )
  - ...
- Il est nécessaire de pouvoir les caractériser et ainsi les améliorer, les comparer ou les adapter aux applications technologiques possibles



- a) Mousse YBaCuO
- b) FeSe préparé par Frittage Flash
- c) Poudre de Fer et de Sélénium dans une feuille de Tantale sous atmosphère d'argon
- d) Massifs d'YBaCuO commercial



# ➤ La synthèse de massifs supraconducteurs

- Synthèse "classique" au four pour des mono et poly-cristaux
  - Simple et pas chère
  - Plusieurs heures pour un polycristal
  - Plusieurs jours/semaines de synthèse pour un monocristal
- Synthèse par frittage flash (Spark Plasma Sintering)
  - Méthode novatrice
  - Synthèse très rapide ( $< 1h$ ) pour polycristaux
  - Permet un développement industrielle

a) Photo d'un four avec des échantillons à l'intérieur

b) Photo du machine à frittage flash

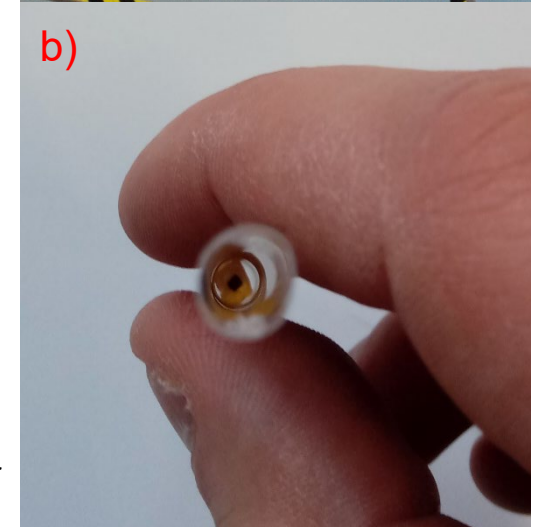
c) Vue d'intérieur de la chambre à frittage flash



# ➤ La caractérisation de massifs supraconducteurs

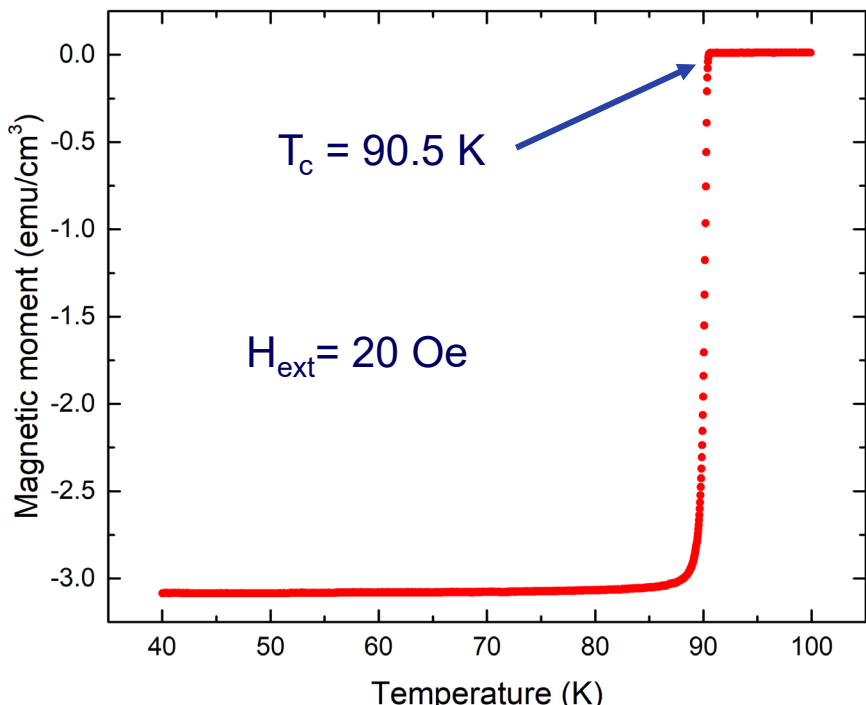
- Déterminer les propriétés supraconductrices  $T_C$ ,  $H_{C,irr}$ ,  $J_C$  par mesures du moment magnétiques sur de petits échantillons millimétriques
  - Comparer les échantillons
  - Optimiser les méthodes de synthèses
  - Donner une première idée du potentiel applicatif
- Réalisé avec un MPMS-SQUID (Magnetic Property Measurement System équipé d'un Superconducting Quantum Interference Device)
  - Mesure du moment magnétique en fonction du champ appliqué et de la température
  - Répandu et facile a prendre en main

- a) Photo d'un MPMS-SQUID de l'institut Jean Lamour.
- b) Photo d'un échantillons d'YBaCUO préparé pour une mesure du moment magnétique.

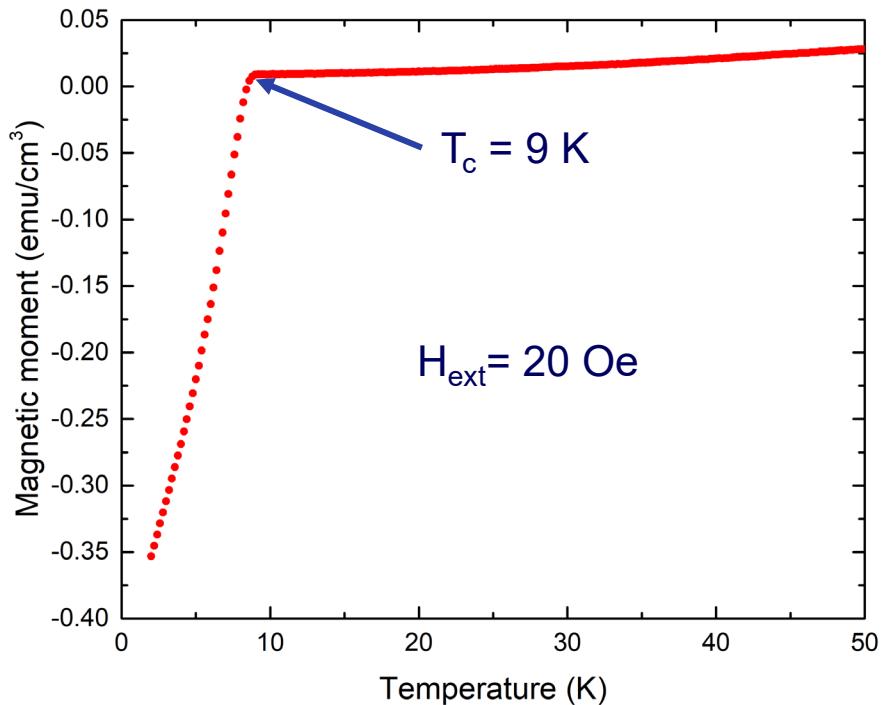


# ➤ La caractérisation de massifs supraconducteurs

## ➤ Mesure de la température critique grâce au moment magnétique



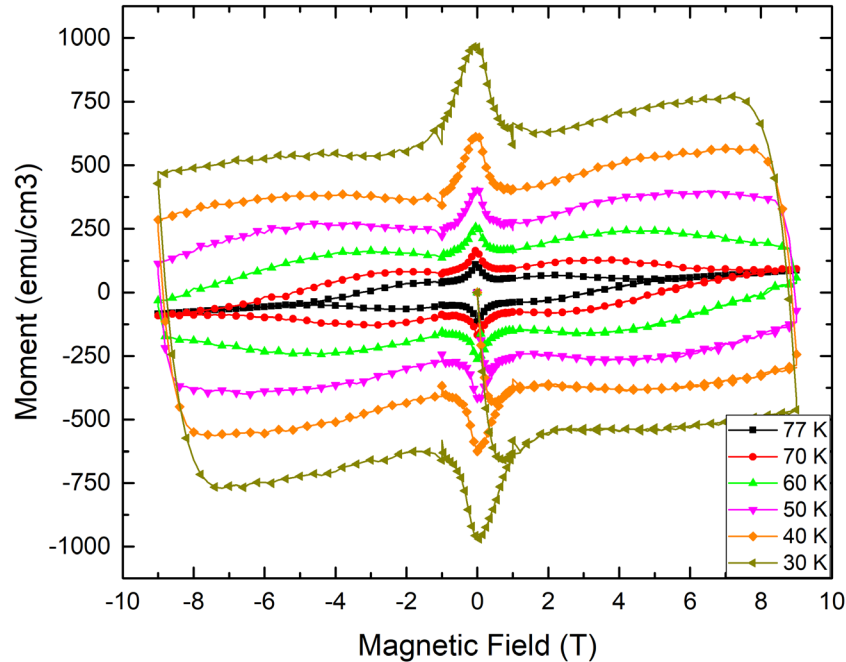
Evolution du moment magnétique en fonction de la température pour un échantillon YBaCuO.



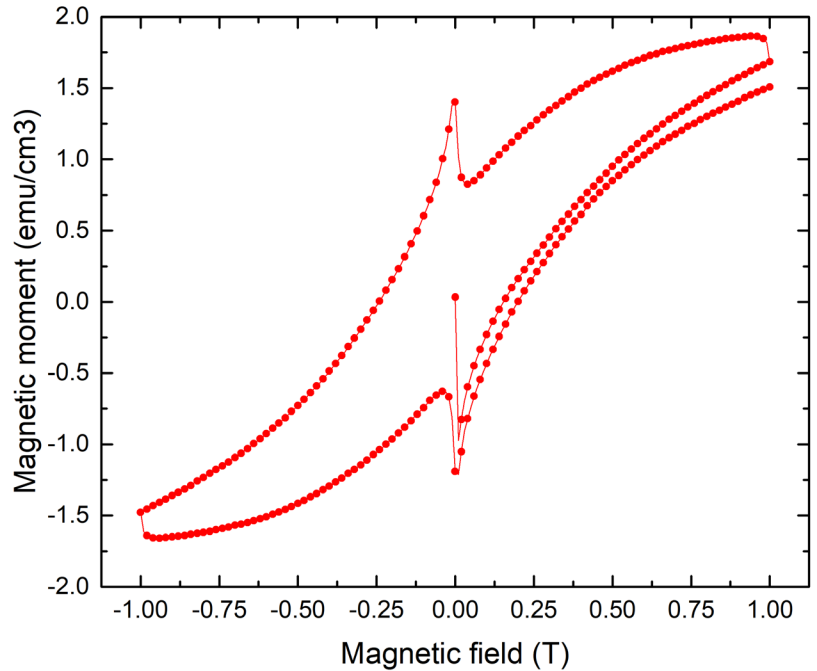
Evolution du moment magnétique en fonction de la température pour un échantillon de Fer-Sélénium (FeSe).

# ➤ La caractérisation de massifs supraconducteurs

## ➤ Mesure du moment magnétique en fonction du champ magnétique pour différentes températures



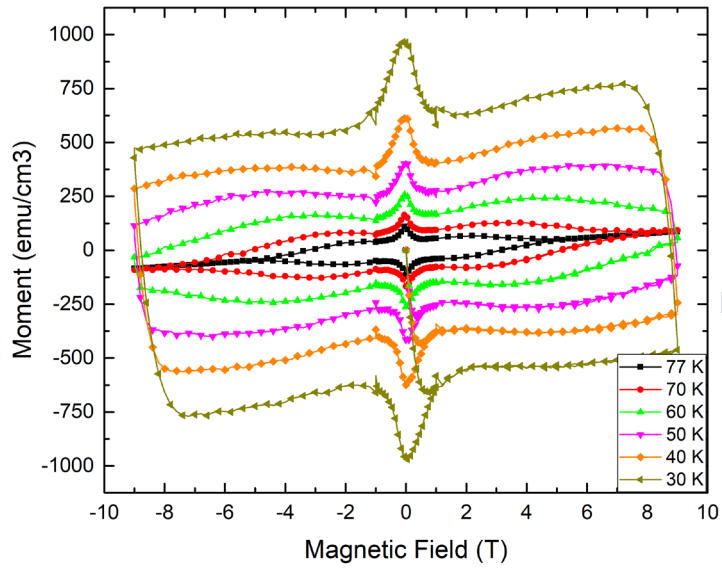
Moment magnétique en fonction du champ magnétique appliqué pour différentes températures sur un échantillon d'YBaCuO dopé à l'argent.



Moment magnétique en fonction du champ magnétique appliqué pour un échantillon de Fer-Sélénium à 2 K.

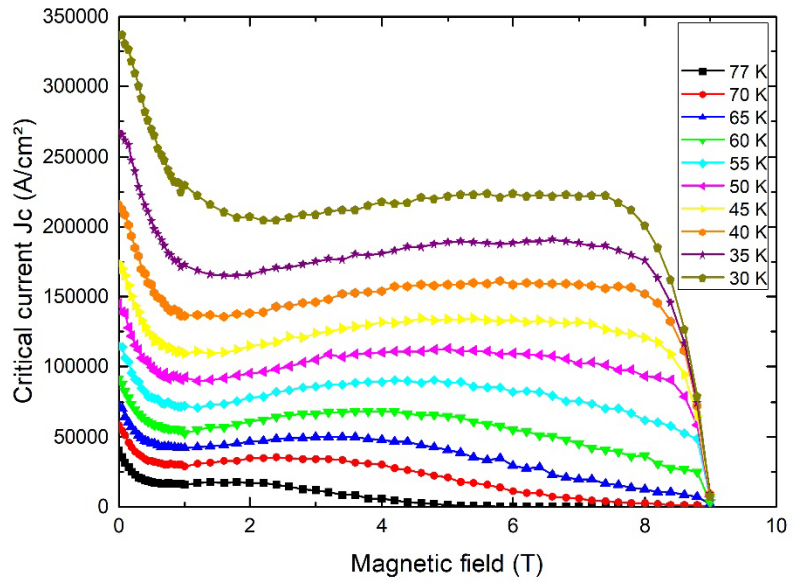
# La caractérisation de massifs supraconducteurs

## Extraction du courant critique à partir du moment magnétique



« Nettoyer le signal »  
 Extraire le courant critique

$$J_c = \frac{20\Delta M}{a \left(1 - \frac{a}{3b}\right)}$$



Calcul du courant critique pour les différentes valeurs du moment magnétique en utilisant  $\Delta M$  la largeur du cycle magnétique, la largeur  $a$  et longueur  $b$  de l'échantillon.

# ➤ La caractérisation de massifs supraconducteurs

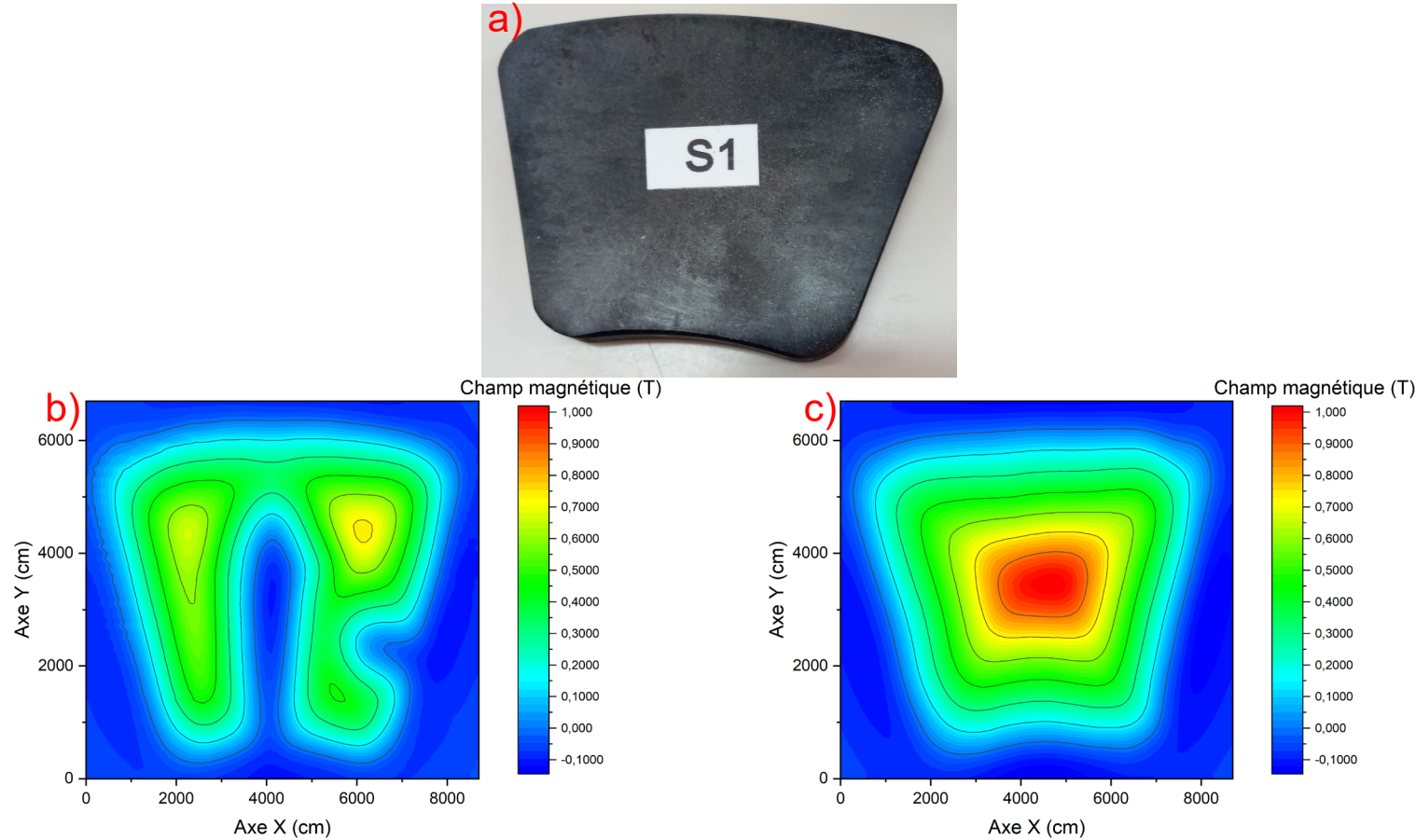
- Déterminer le moment magnétique généré par des massifs entiers centimétriques
  - Donne les performances proches des applications potentiels
  - Rend compte de la maturité de la technologie
- Réalisé par l'applications d'un champ extérieur pulsé ou continue
  - Mesure le champ magnétique piégé ou écranté en fonction du champ appliqué et de la température
  - Possibilité de réaliser une cartographie du champ piégé sur la surface du massif



- a) Photo de l'aimant 9T supraconducteur avec un trou de 150 mm.  
b) Photo de la table 3 axes utilisée pour faire une cartographie du champ magnétique d'un massif.

# ➤ La caractérisation de massifs supraconducteurs

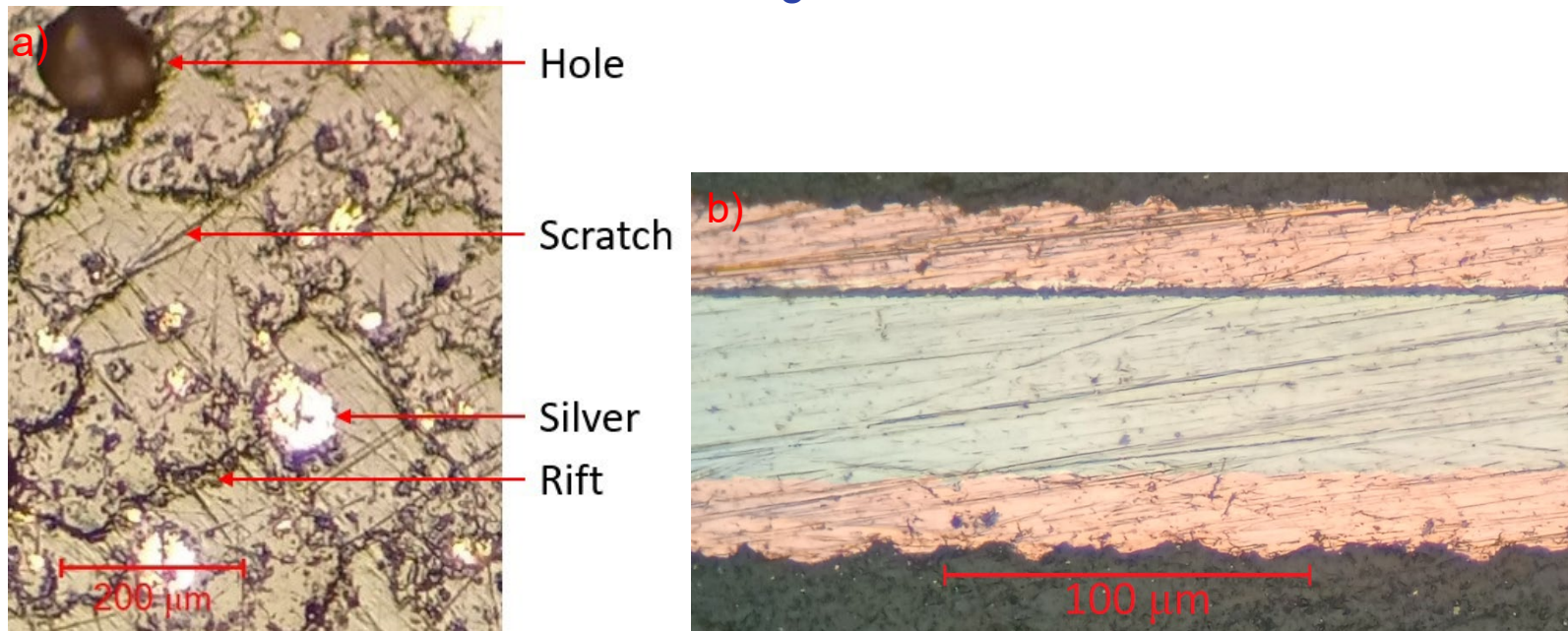
- Cartographie du champ magnétique émis par un massif supraconducteur après magnétisation sous un champ de 3T a 77K



a) Photo d'un massif supraconducteur pour le nouveau moteur supraconducteur en préparation.  
b) cartographie du champ magnétique généré par le massif présenter en a) magnétisé sous 3 T.  
c) cartographie du champ magnétique d'un autre échantillon.

# ➤ La caractérisation de massifs supraconducteurs

- Réalisation de photo avec un microscope optique sur des massifs ou autres type de matériaux
  - Permet de discriminer les composants d'un échantillons
  - Permet de déterminer la taille des grains d'un massif



- a) Photo de la surface d'un massif supraconducteur en YBaCuO dopé à l'argent.  
b) Vue en coupe d'un ruban supraconducteur en YBaCuO (couche noir).





Université de Lorraine - UR 4366  
Pôle Scientifique « Energie Mécanique Procédés produits »  
Groupe de Recherche en Energie et Electrique de Nancy

**Merci pour votre attention**

**QUESTIONS**

