# SUPRACONDUCTIVITÉ DANS L'AÉRONAUTIQUE

Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy

Jean Lévêque Bruno Douine

# Sommaire

1) Contexte
2) La supraconductivité et ses applications en GE
3) Moteur supraconducteur pour l'aéronautique

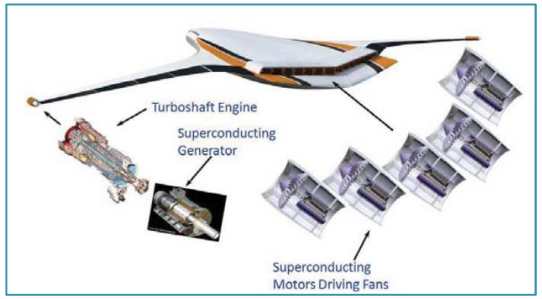
# Sommaire

1) **Contexte**
2) La supraconductivité et ses applications en GE
3) Moteur supraconducteur pour l'aéronautique

# CONTEXTE

- Transition du transport aérien
  - ➡ Clean Sky programme : réduction CO2, émission de gaz, bruit, …
  - ➡ Avion plus électrique (remplacement des fonctions hydrauliques)
  - ➡ Avion tout électrique (propulsion électrique) ou hybride

## Avions commerciaux

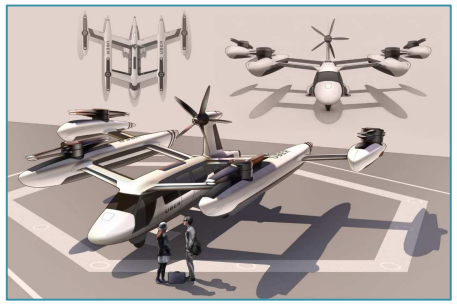



*N3-x étudié par la NASA composé de 14 moteurs de 5MW et 2 génératrices de 40MW*

*Easy Jet promet des vols commerciaux tout-électriques pour 2022*

**Plusieurs MW installées**

## Avions de service



*Taxi volant par Uber*

*Taxi autonome volant par Airbus*

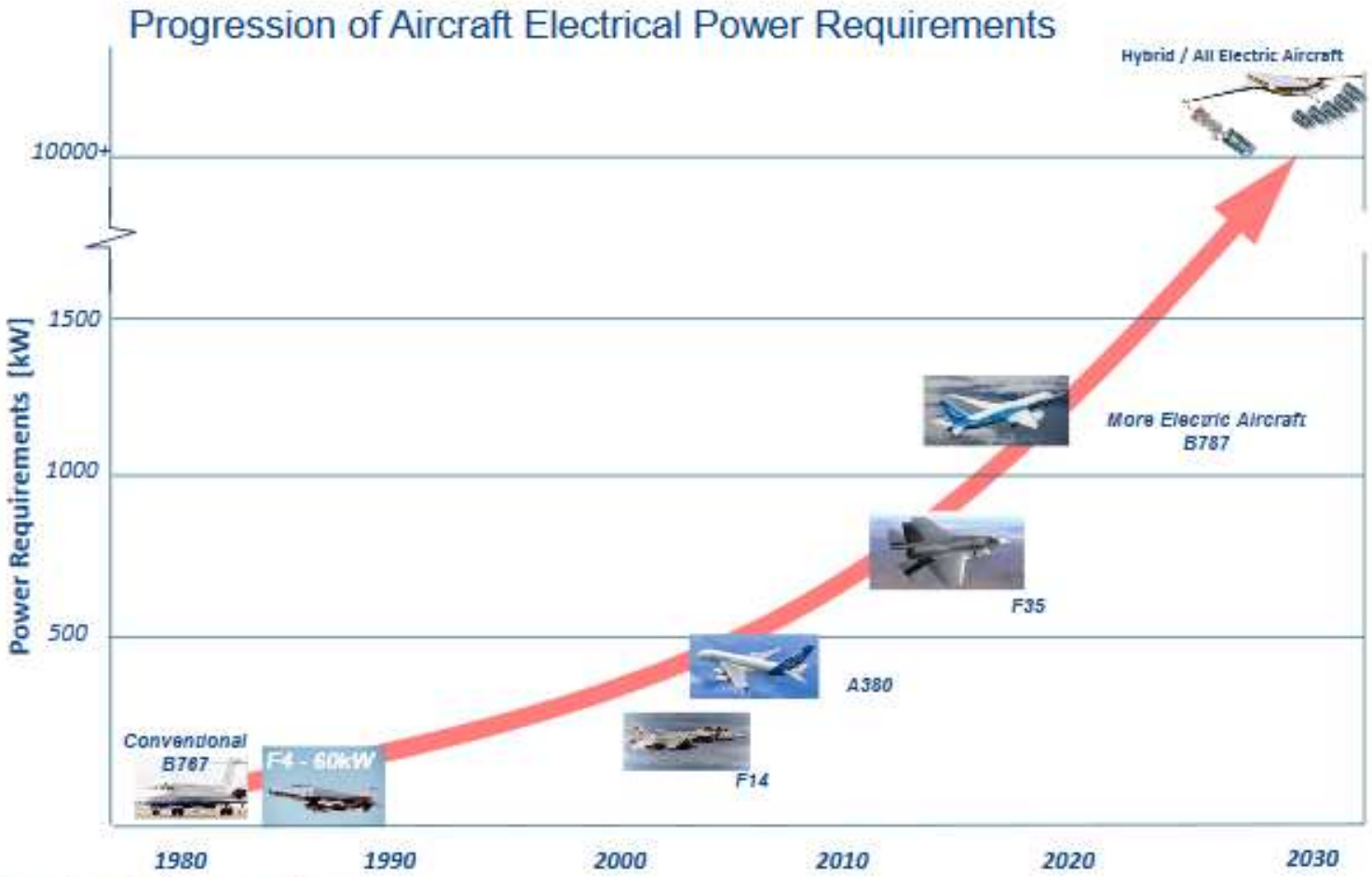
## Avions mono/bi-place

*Tour du monde pour un Avion solaire : le SOLAR IMPULSE*

*Traversé de la Manche pour l'E-fan d'Airbus*

**Quelques centaines de kW**

# How the More Electric Aircraft has changed the Gas Turbine



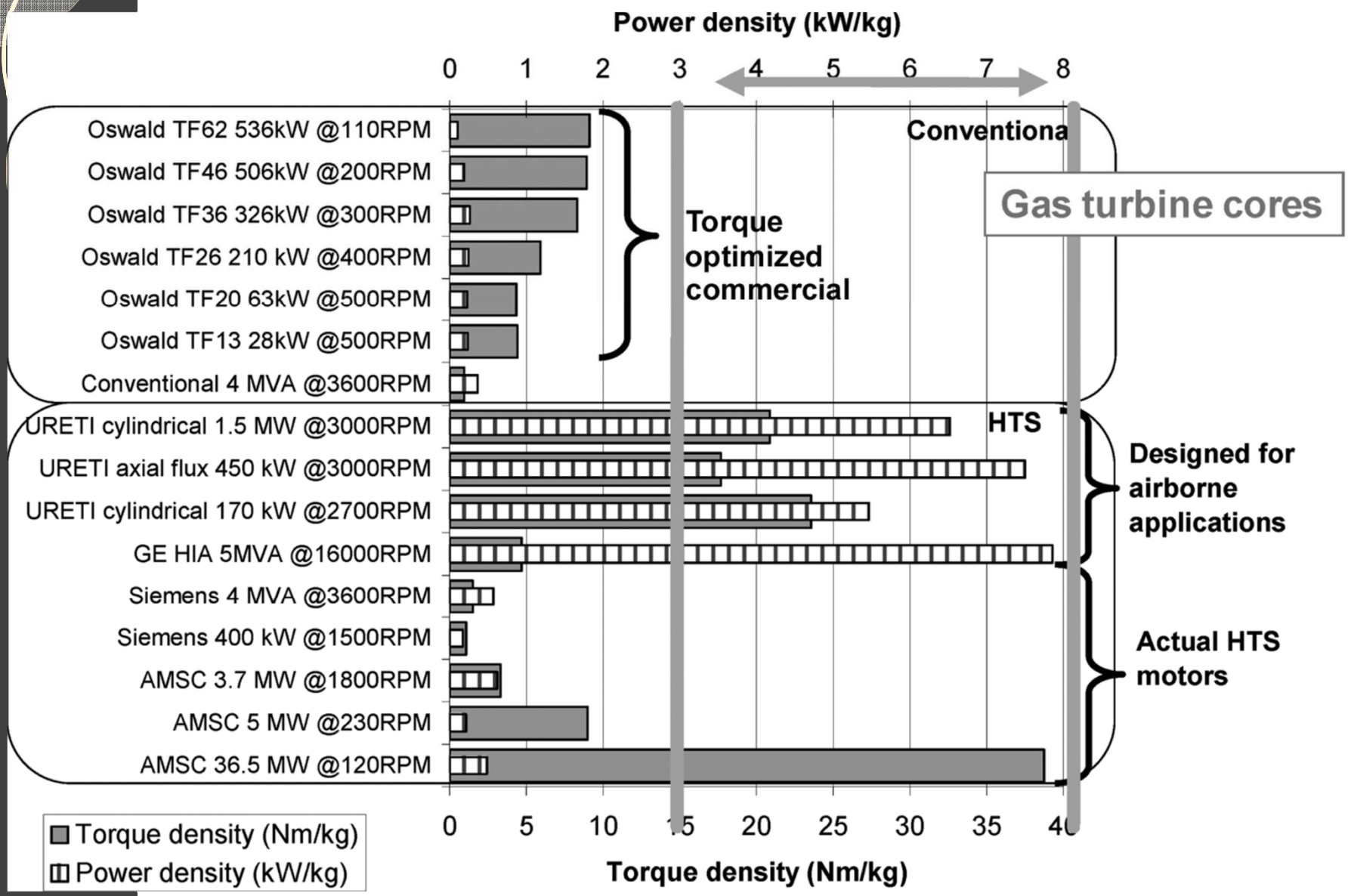

Trusted to deliver excellence

Rolls-Royce

Copyright Rolls-Royce©

LibertyWorks®

# Performance attendues




LUONGO *et al.*: NEXT GEN MORE-ELECTRIC AIRCRAFT: POTENTIAL APPLICATION FOR HTS SUPERCONDUCTORS

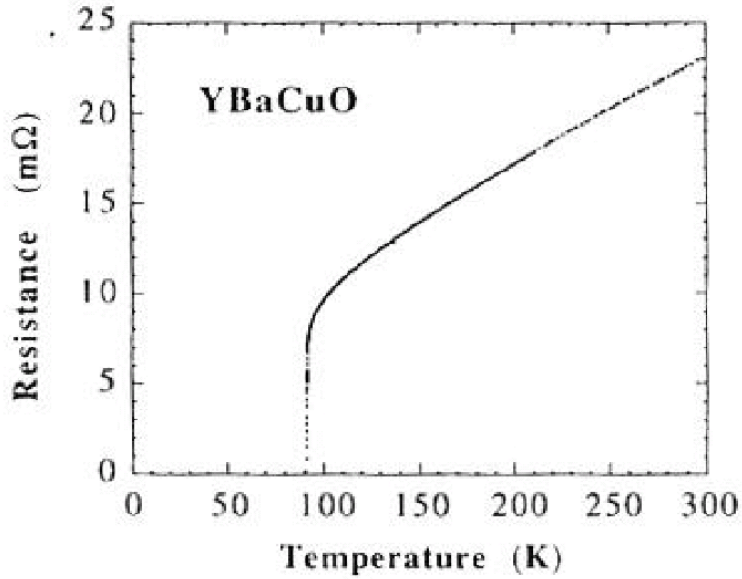
IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 19, NO. 3, JUNE 2009

# Sommaire

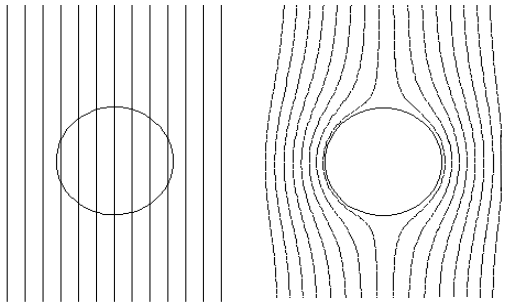
1) Contexte
2) **La supraconductivité et ses applications en GE**
3) Moteur supraconducteur pour l'aéronautique

# SUPRACONDUCTIVITÉ

- **Résistivité nulle** pour **T<Tc**

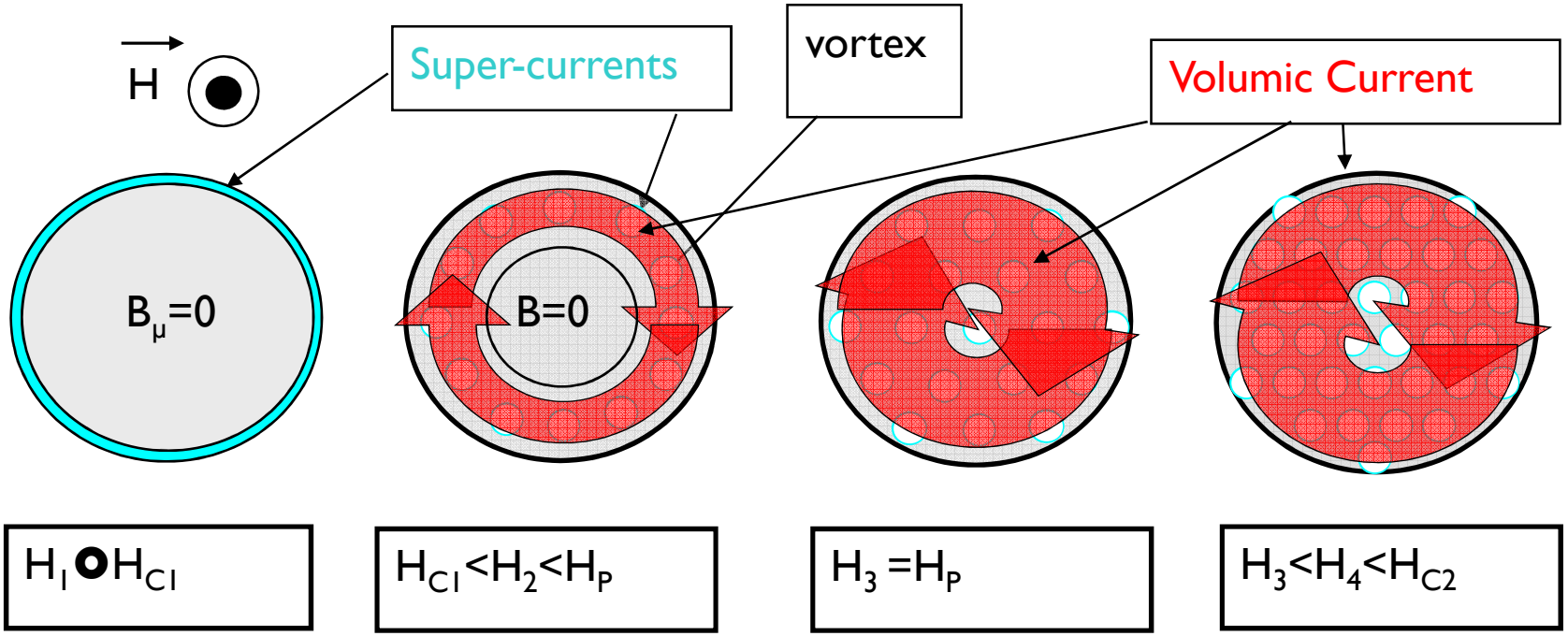



- **Effet Meissner : flux magnétique expulsé pour T<Tc**

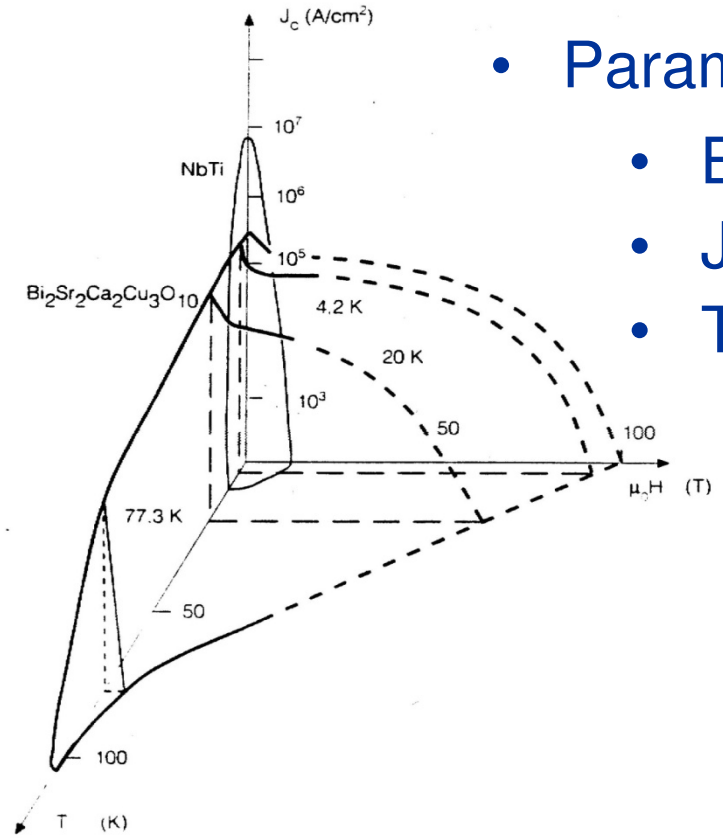


$T>T_C$ $T < T_C$

# - Courant induit dans un cylindre supraconducteur



# Surface Critique

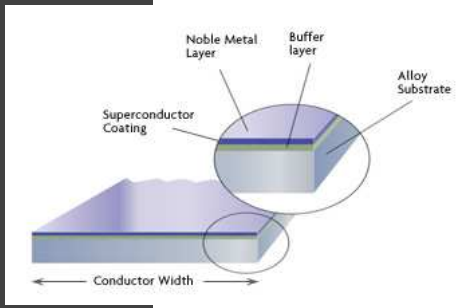



- Paramètres critiques
  - Bc : Champ critique
  - Jc : densité de courant critique
  - Tc Température critique

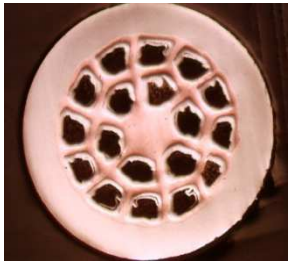
- qq mT<Bc <100T
- Jc<qq kA/mm²
- 9 K <Tc <112 K

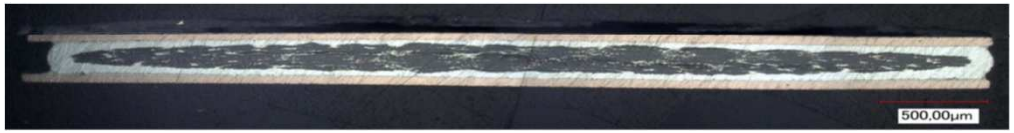
# MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS POUR APPLICATIONS

# Matériaux supraconducteurs en GE




| Matériau | $T_C$ (K) |
|---|---|
| NbTi | 9 |
| $Nb_3Sn$ | 18 |
| $MgB_2$ | 39 |
| $YBa_2Cu_2O_7$ | 90 |
| $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ | 108 |





# Système cryogénique

## - Liquides cryogéniques

| | | $^4He$ | $H_2$ | Ne | $N_2$ | $O_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Boiling point | (K) | 4.2 | 20.4 | 27.1 | 77.3 | 90.2 |
| Freezing point | (K) | | 14 | 24.15 | 63.15 | 54 |
| Volume of gas per liter of liquid | (Liter) | 700 | 790 | 1,355 | 646 | 798 |
| Density of liquid | ($kg/m^3$) | 125 | 71 | 1,210 | 810 | 1,140 |
| Latent heat | (kJ/kg) | 21 | 452 | 88.7 | 199 | 213 |

## - Cryocooler

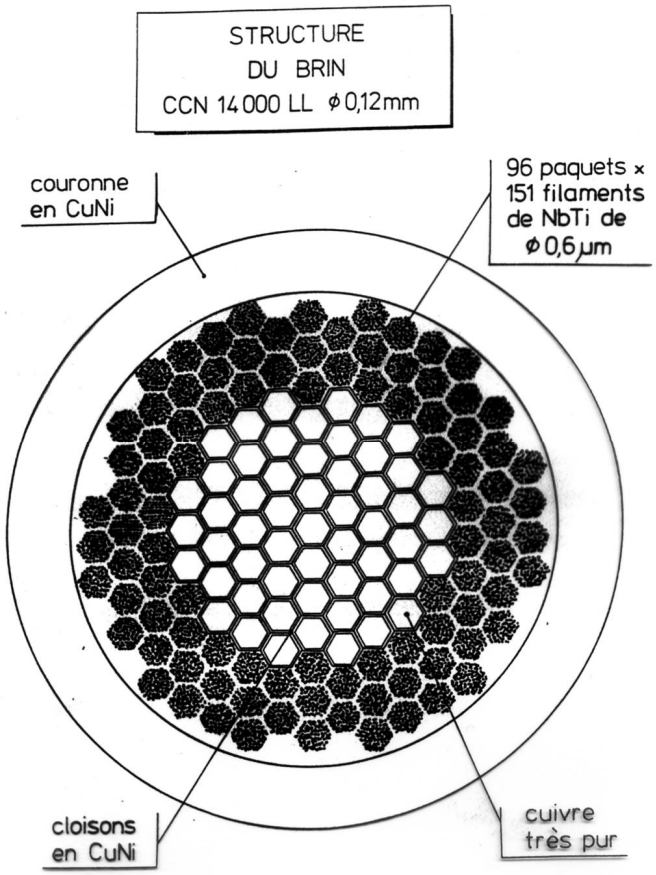
## => réglage de la température

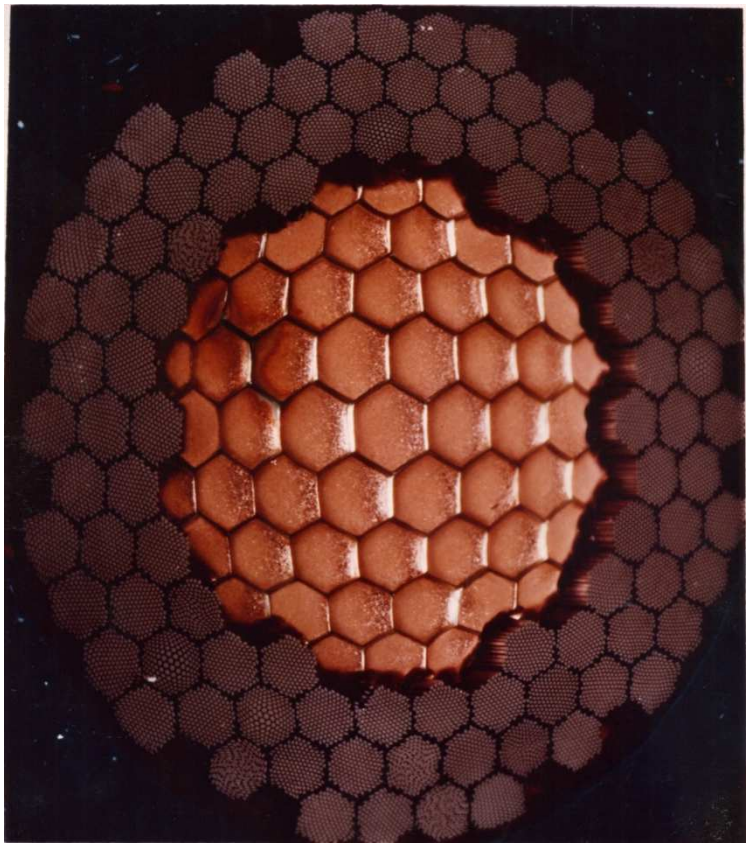
# MATERIAUX A BASSE TEMPÉRATURE CRITIQUE (SBTC)

## Low Temperature Superconductors (LTS) (Tc<20K)

| **Matériau** | $T_C$ (K) | $\mu_0 H_C$ (T) à 4,2K | $J_C$ à 4,2K et 5T (kA/mm²) |
|---|---|---|---|
| $Nb_3Sn$ | 18 | 22 | 15 |
| NbTi | 9 | 12 | 4 |

# Structure d'un fil SBTC



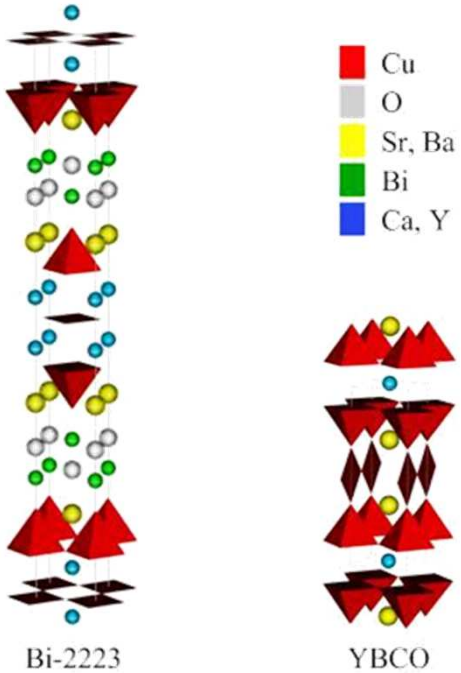



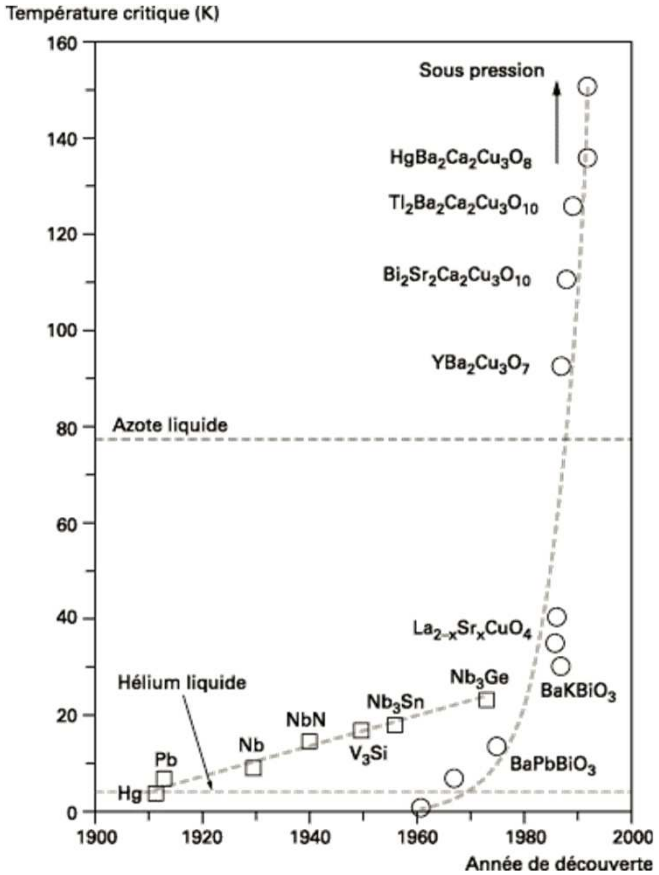
# Matériaux à Haute Température Critique (SHTC)

## "High"Temperature Superconductors (HTS)

**(Tc<120K)**

**=céramique, anisotrope**



# Deux matériaux principaux

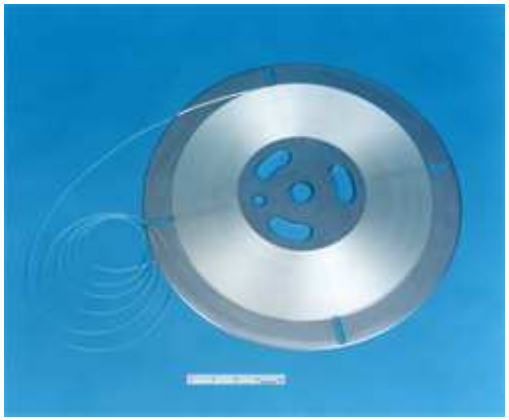
| Matériau | $T_C$ (K) | $\mu_0 H_{C2}$ (T) à 77K |
|---|---|---|
| $YBa_2Cu_2O_7$ | 92 | 70 // <br> 6 ⊥ |
| $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ | 110 | 5// <br> 3 ⊥ |

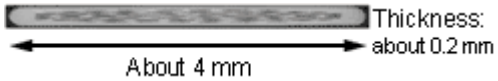
## Deux formes :

- Rubans
- Massifs

# Rubans SHTC

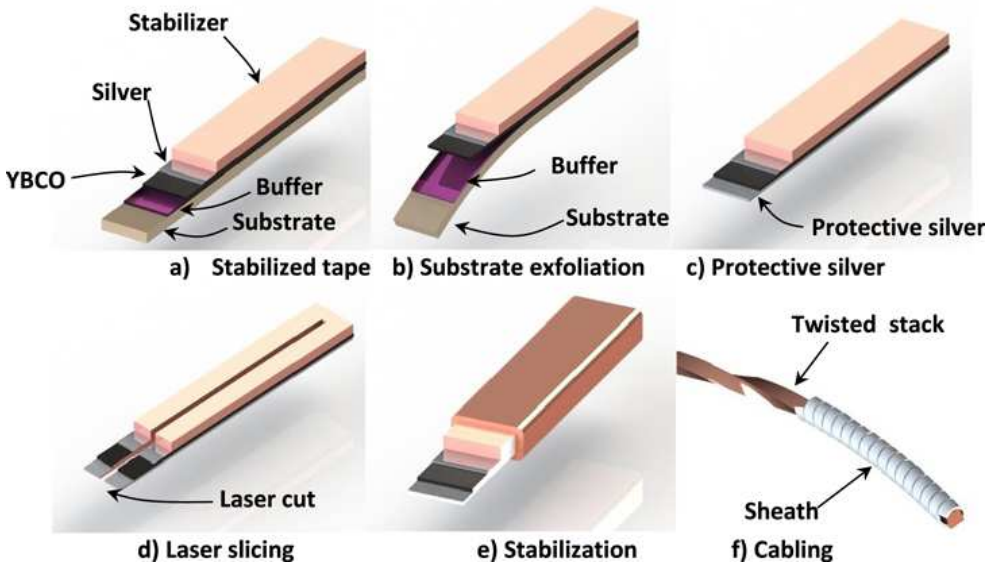
## BiSrCCuO





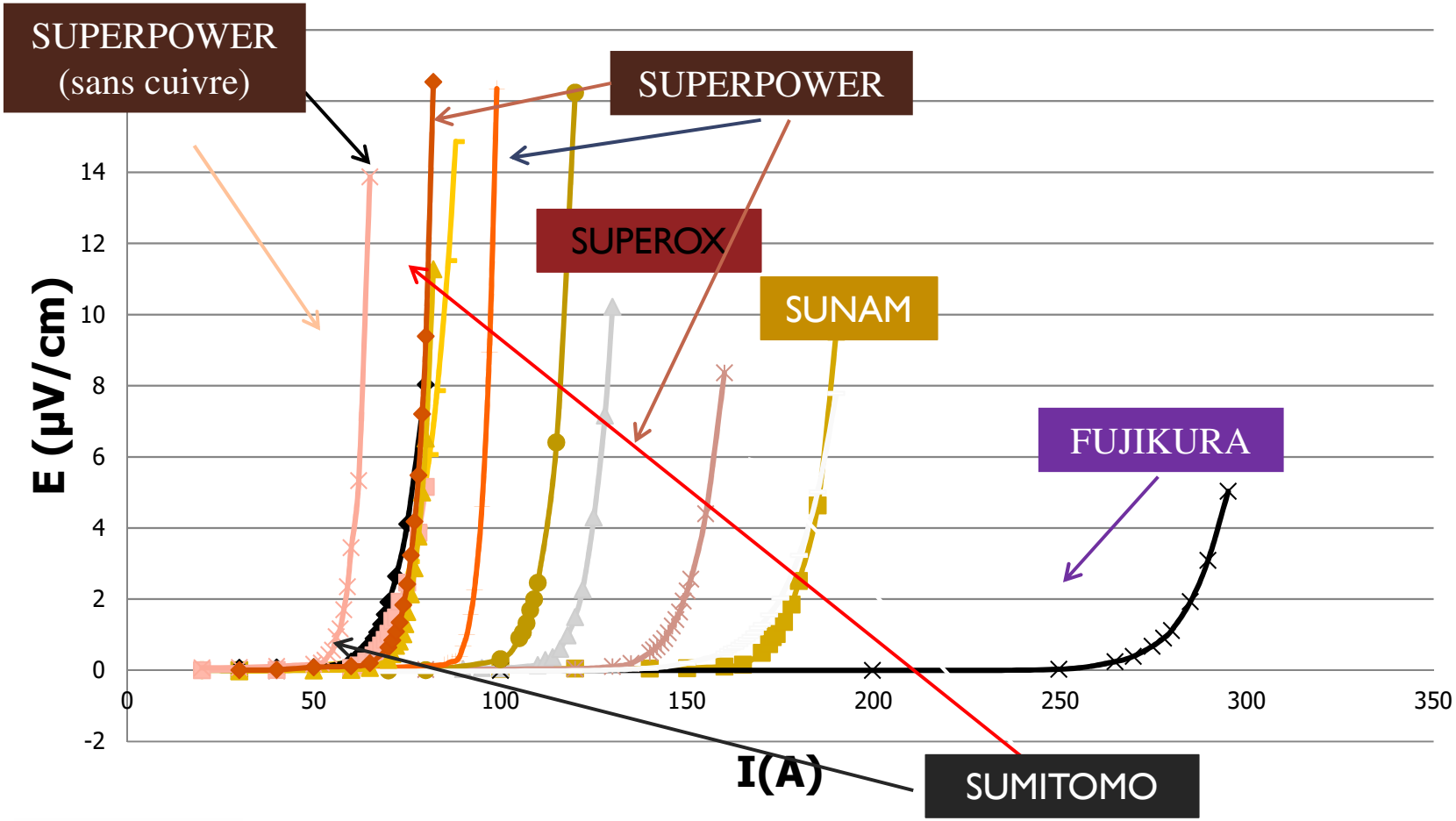

Sumitomo

## YBaCuO




Superox

# PLUSIEURS COMPAGNIES



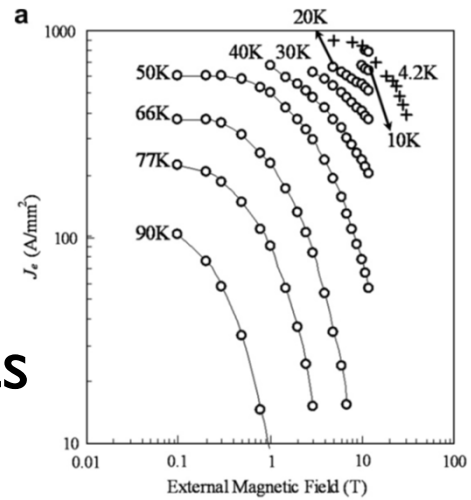
# Coût des matériaux supraconducteurs

- Supraconducteur à Haute température critique
  - BiSCaCuO
    - 100 €/kA/m à 0T et 77K
  - YBaCuO Pas de prix commercial

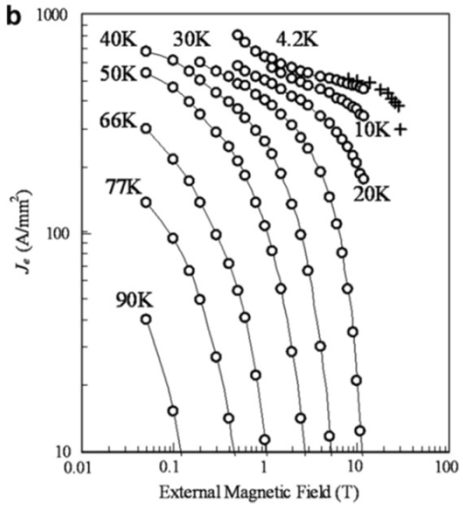
- Supraconducteur à Basse température critique
  - NbTi
    - 4-6 €/kA/m à 8 T et 4.2 K
  - $Nb_3Sn$
    - 15-30 €/kA/m à 12T et 4.2 K
    - 75-150 €/kA/m à 21T et 2 K

# STANDARD IEC TC90

- Méthode 4 points
- IEC 61788-3; -24 et -26

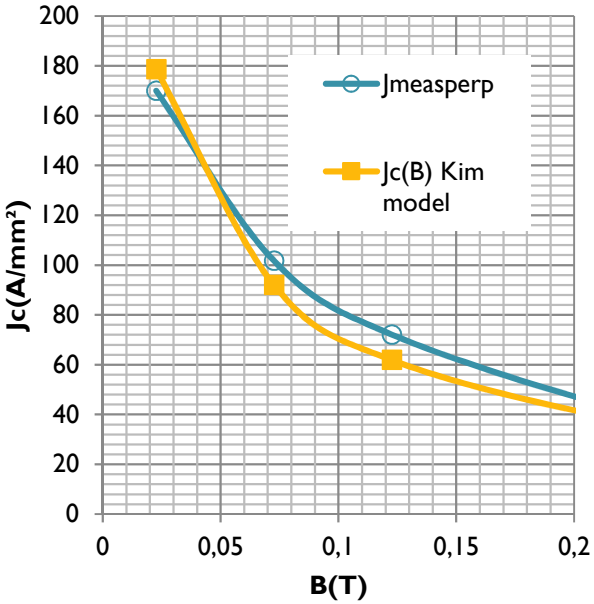


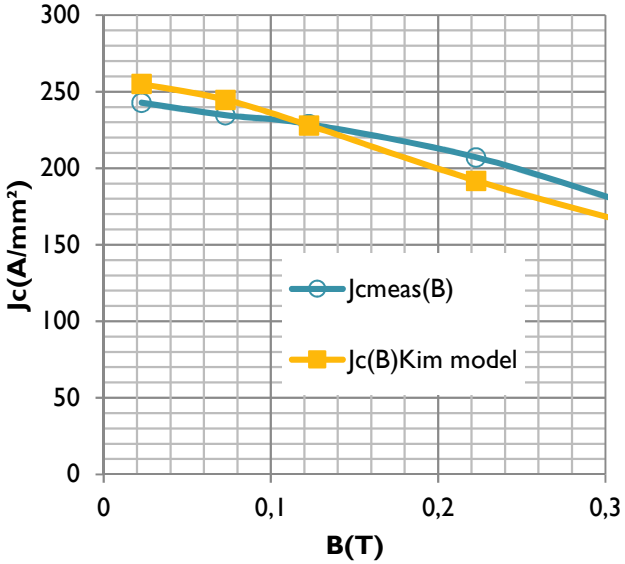

| | Type H high-$J_e$ |
|---|---|
| Width | ~4.2 mm |
| Average thickness | ~0.22 mm |
| $I_c$ (77 K, self-field) | 140–180 A |
| $J_e$ (77 K, self-field) | 15–20 kA/cm$^2$ |




Progress in performance of DI-BSCCO family
N. Ayai a,*, S. Kobayashi a, M. Kikuchi a, T. Ishida a, J. Fujikami a, K. Yamazaki a, S. Yamade a, K. Tatamidani a,
K. Hayashi a, K. Sato a, H. Kitaguchi b, H. Kumakura b, K. Osamura c, J. Shimoyama d, H. Kamijyo e, Y. Fukumoto e
Physica C 468 (2008) 1747–1752

# ANISOTROPIE ET DEPENDANCE EN CHAMP MAGNÉTIQUE




$$Jc(B) = \frac{J_{c0}}{1 + \sqrt{\frac{B_{para}}{B_{0para}}^2 + \frac{B_{perp}}{B_{0perp}}^2}}$$

# SUPRACONDUCTEURS MASSIFS

BiSrCCuO

**YBaCuO**

**APPLICATIONS :**

- **AMENEES DE COURANT**
- **AIMANTS**
- **ECRANS**

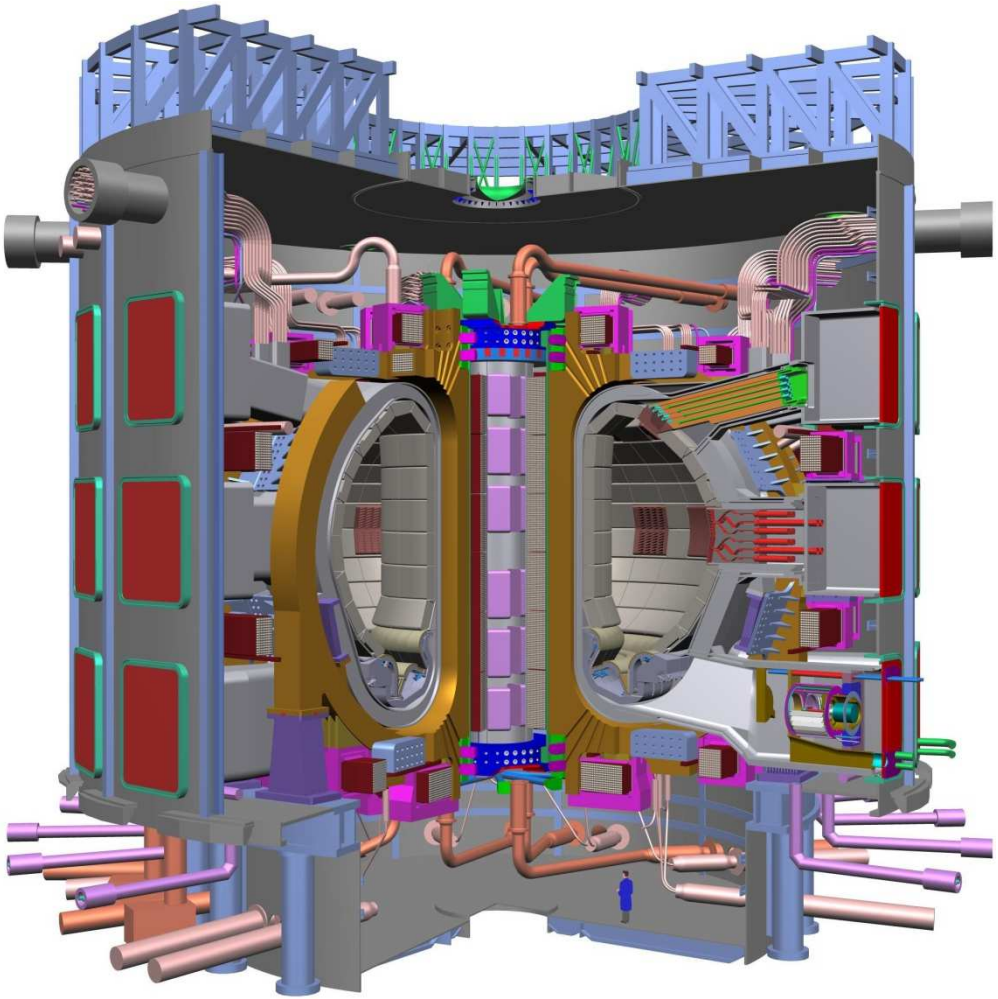
# APPLICATIONS

## PRINCIPALE APPLICATION INDUSTRIELLE : IRM

**MRI**
LTS
Liquid Helium
4,2K

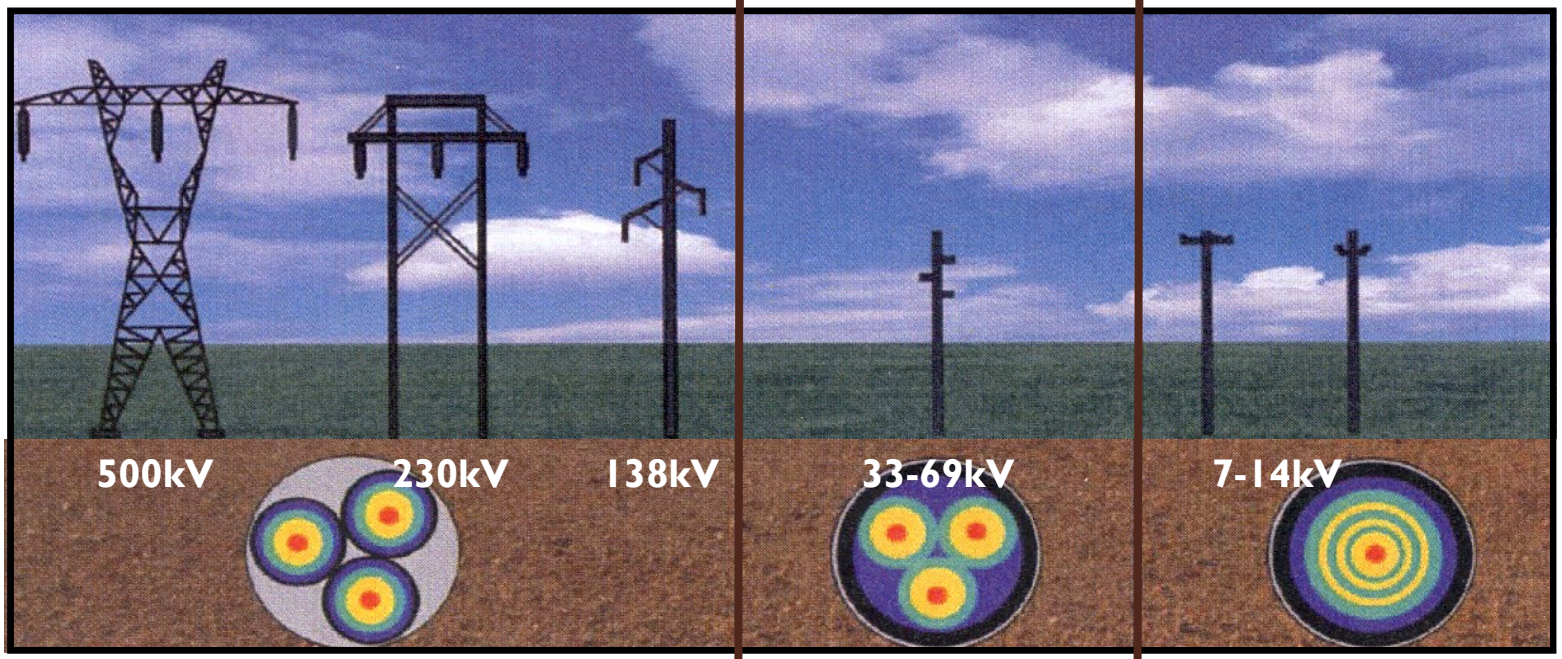
# FUSION

**ITER**
LTS



# TRAIN À LÉVITATION MAGNÉTIQUE (JAPON, SIT)

# Cable SHTC

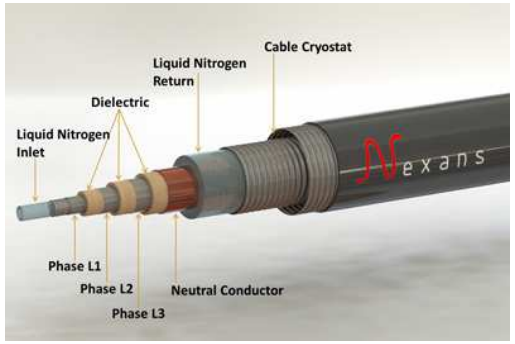



**Long Island Power Cable**
Câble 138kV : New-York long-Island

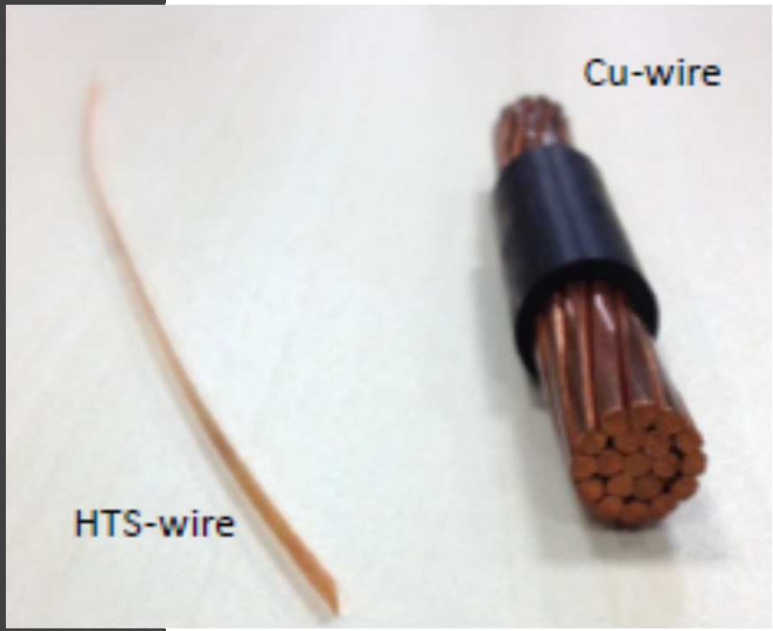
**Albany Power Cable**
Câble 34.5kV

**Columbus Power Cable**
Câble 13.2kV

## Cable triphasé coaxial Nexans



# Cables supraconducteurs développés par SUPEROX pour l'aéronautique



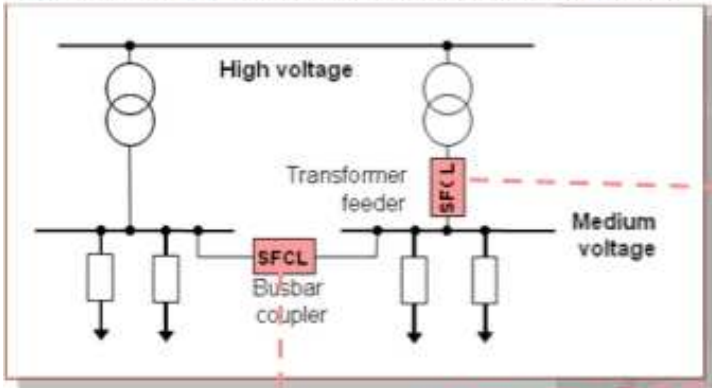

SuperOx

With the courtesy of Superox

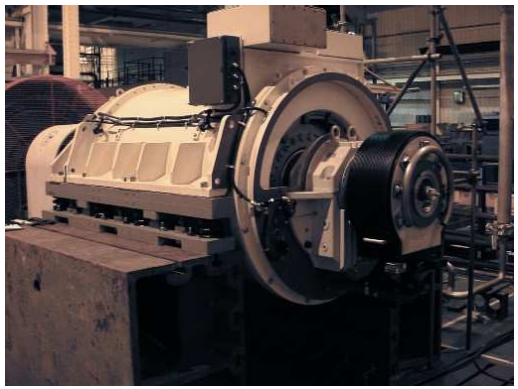
# LIMITEUR DE COURANT SUPRACONDUCTEUR

## Projet européen ECCOLOW (Nexans)

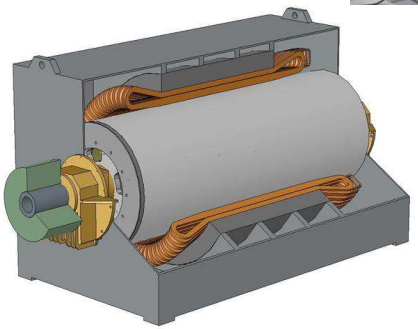
*Development and Field Test of an Efficient YBCO Coated Conductor based Fault Current Limiter for Operation in Electricity Networks*



# MOTEURS SUPRACONDUCTEURS



LTS



American Superconductor's SuperMachines™ Business Unit

# INTERETS

Augmentation de l'efficacité, de la puissance massique et volumique

Moteur > MW

Bateaux, sous-marins et maintenant aéronautique

# PROJET ULCOMAP 2007-2011 (GREEN)

250 kW – 150 tr/mn – 50 Hz
400 V – 360 A

Superconducting inductor
BI 2223 - 676 m
30 K – 56 A/mm2 ( Ic=48 A)

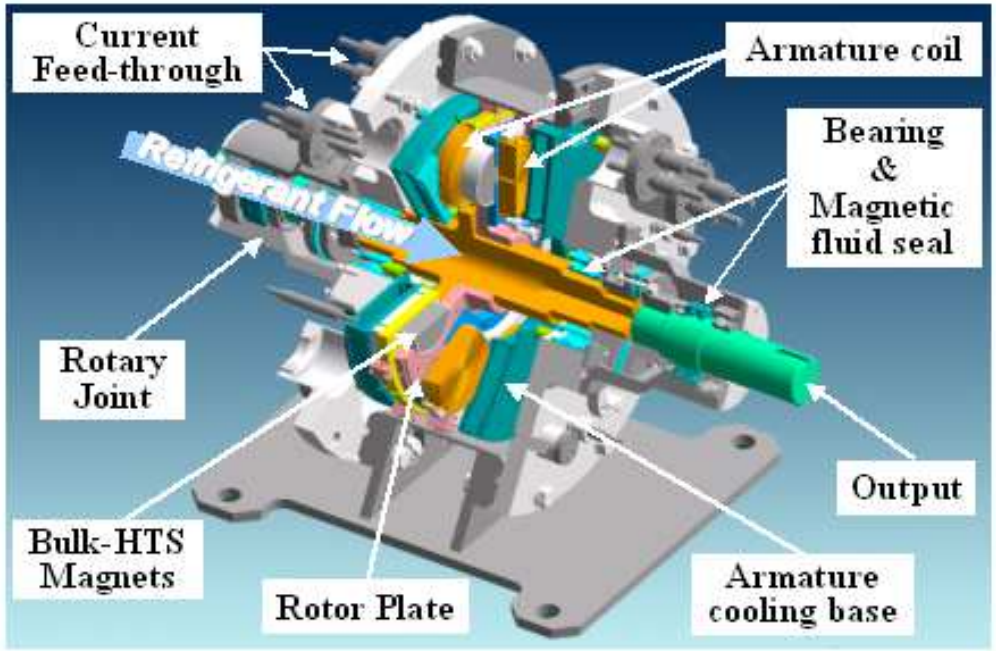
Xd = 0.22 pu – Xq = 0.1 pu

- Trithor GmbH
- Werkstoffzentrum Rheinbach GmbH
- Futura composite
- Alstom moteur (Converteam now GE)
- University of Silésie
- GREEN

# PROJET REIMS (GREEN+JEUMONT ELECTRIC)

# Machine synchrone à aimants supraconducteurs (Japon)

**Design of bulk-HTS synchronous motor**




H. Matsuzaki et al., « HTS Bulk Pole-Field Magnets Motor With a Multiple Rotor Cooled by Liquid Nitrogen », *IEEE Trans. Applied Superconductivity* 147 (2), pp. 1553-1556, 2007.

# Projet Européen Ecoswing (Jeumont electric)

3.6 MW wind turbine with 128 m diameter of blades,

# HTS devices developed in MAI (2015 г.)

400 kW HTS motor

**Rotor of 25 kW HTS motor**

1 MW HTS generator

960 kVA HTS generator

# Sommaire

1) Contexte
2) La supraconductivité et ses applications en GE
3) **Moteurs supraconducteurs pour l'aéronautique**

# Moteurs supraconducteurs pour l'aéronautique

# MOTEUR SUPRACONDUCTEUR POUR L'AÉRONAUTIQUE GREEN-SAFRAN

Alexandre Colle Thierry Lubin Jean Lévêque Olivier Gosselin Sabrina Ayat

# Objectifs du projet

- Un moteur de puissance > 50 kW
- Un moteur refroidi par cryocooler
- Construction analogue à un moteur en usage réel

- Inducteur supraconducteur induit cuivre

| | |
|---|---|
| **Puissance nominale** | 50 kW |
| **Vitesse de rotation** | 5.000 tr/min |
| **Couple nominal** | 95 N.m |
| **Densité de courant cuivre** | 10 A/mm² |
| **Température d'utilisation** | 30 K |
| **Rendement minimum** | > 95% |
| **Couple massique** | > 5kW/kg |

# Composants de la machine

Topologie proposée :

**Inducteur (rotor)**

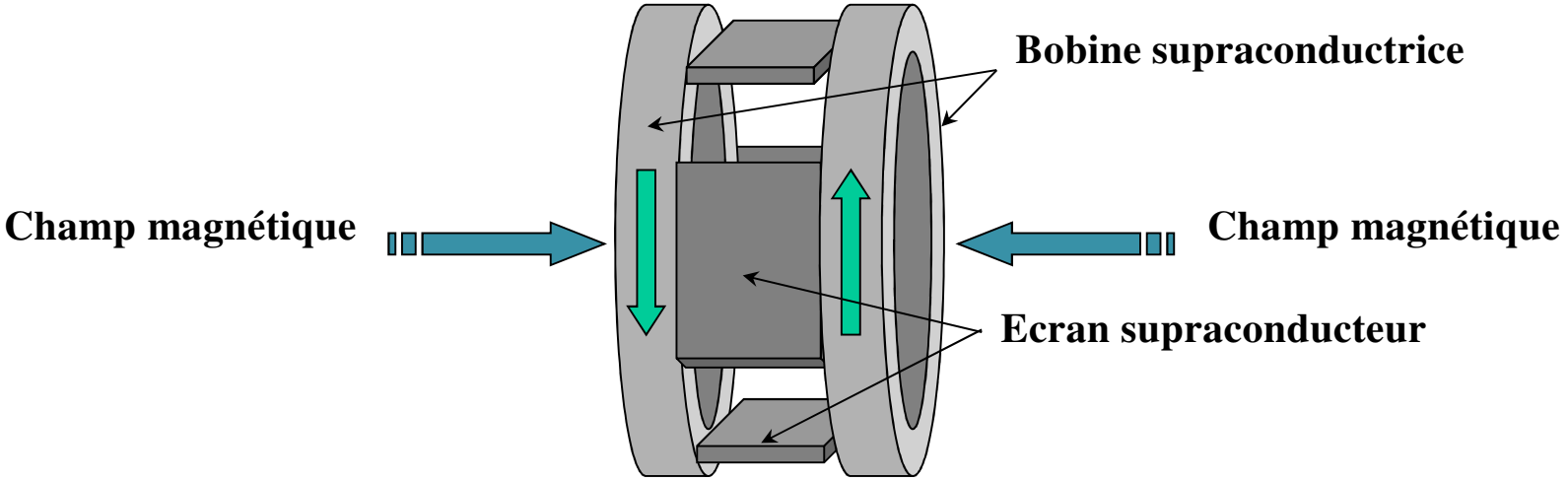
Bobine supraconductrice (BSSCO) + Pastilles YBCO = MACHINE SUPRACONDUCTRICE A MODULATION DE FLUX

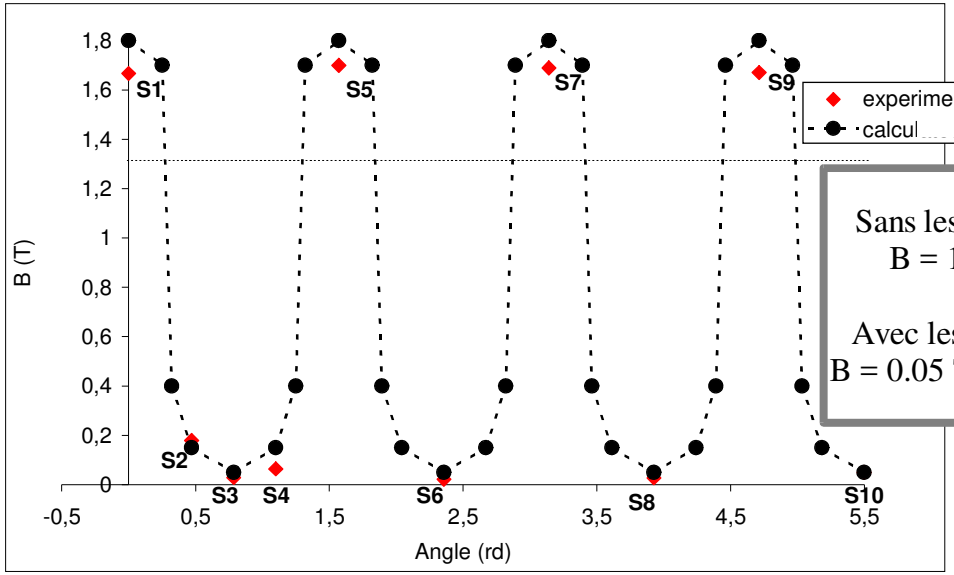
**Induit (stator)**

Bobines cuivre → **Machine à « moitié » supraconductrice**

**[1]** M Feddersen *et al* 2017 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **279** 012026

# Principe de l'inducteur
## (Thèse de P. Masson)



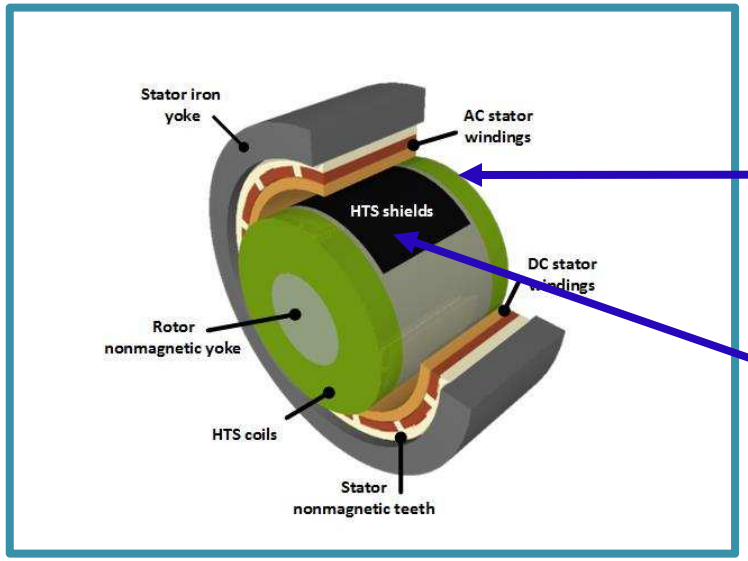



Sans les écrans :
B = 1.27 T

Avec les écrans :
B = 0.05 T → 1.7 T

# Flux radial versus flux axial

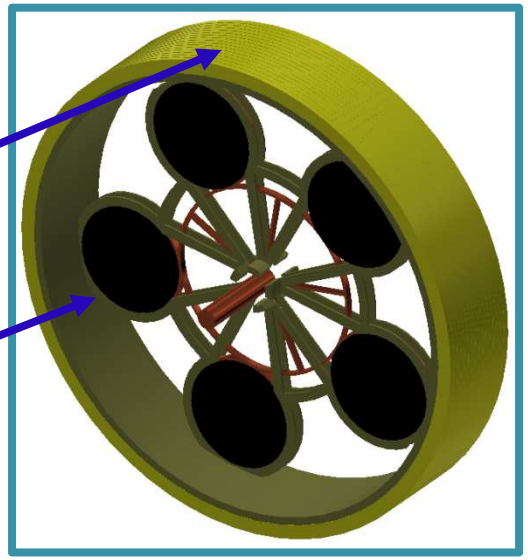
## Flux radial

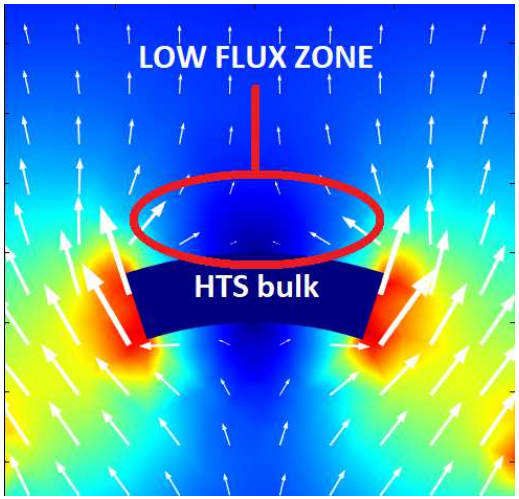


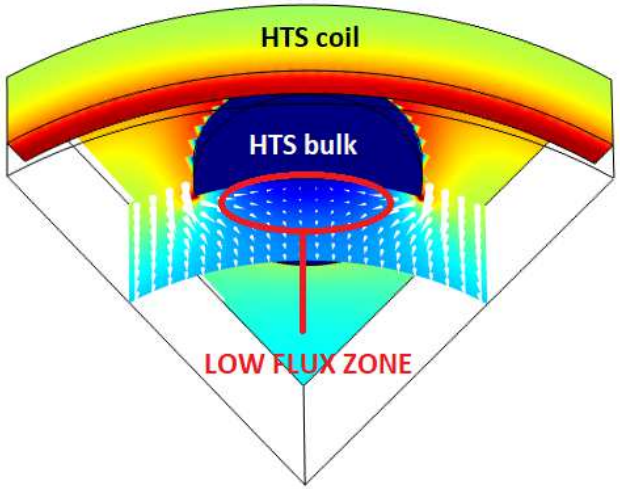

Génération du champ Magnétique (Bobine HTS)

Modulation du champ Magnétique (Ecrans)

## Flux axial

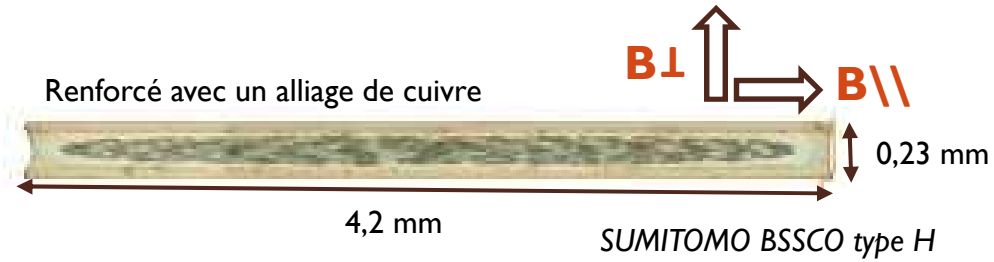




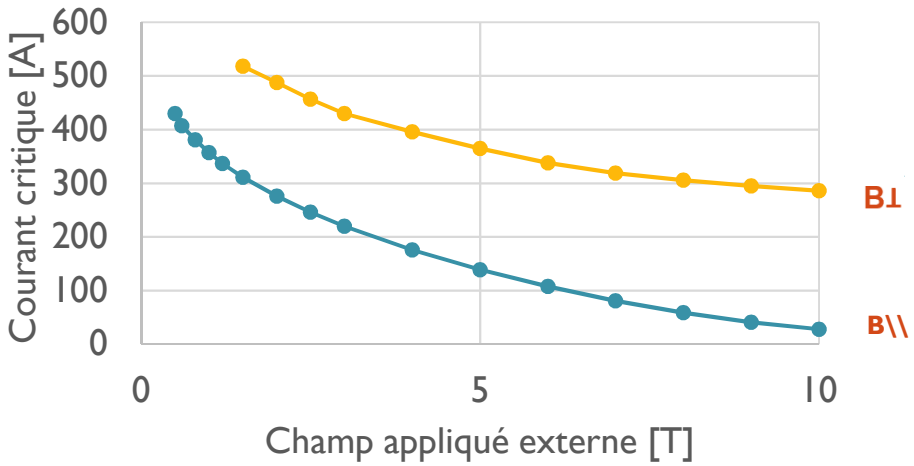



# Axiale = topologie optimale

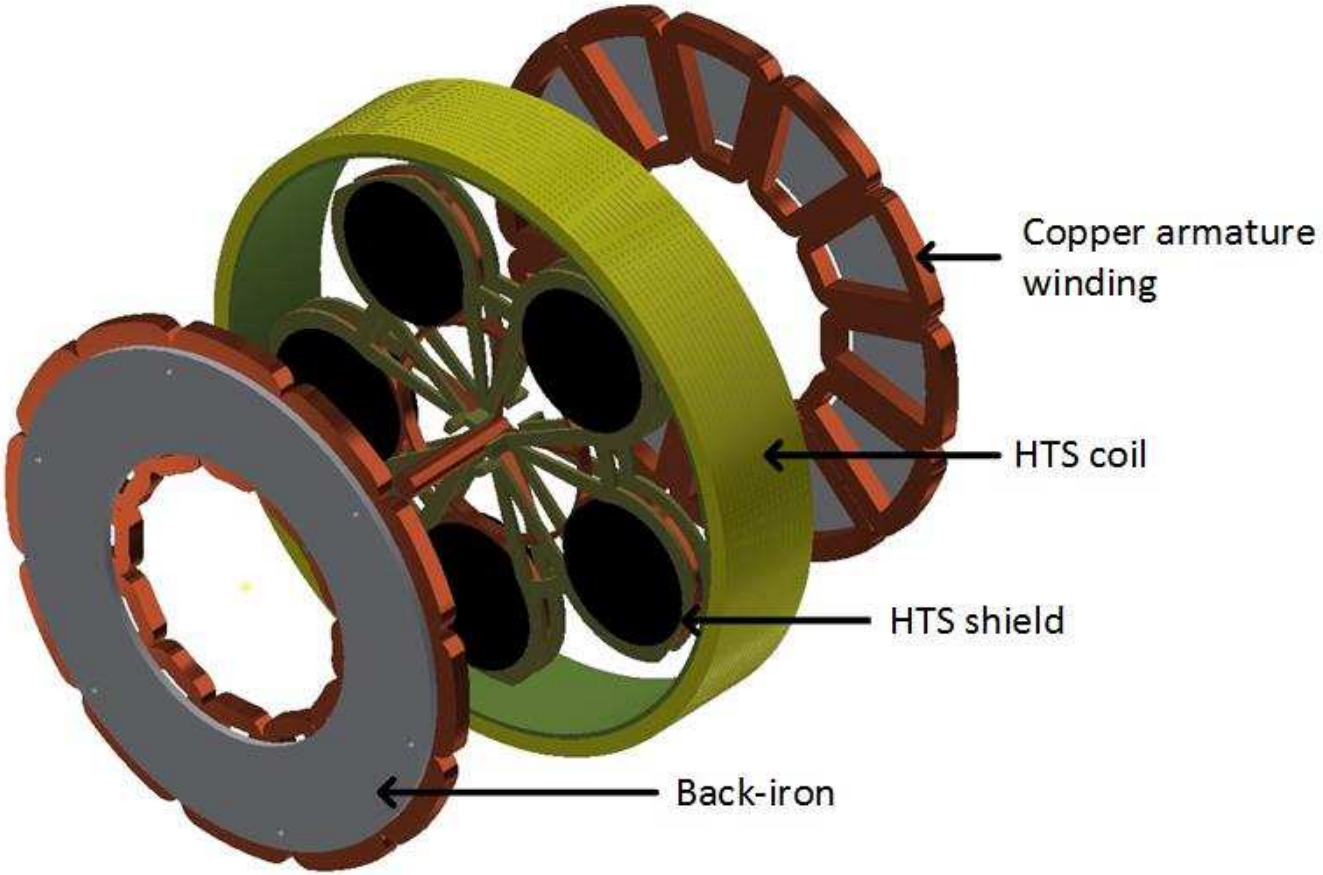
Le comportement anisotrope des ruban HTC sous champ magnétique favorise la machine électrique axiale




Exemple pour un fil BSSCO de SUMITOMO refroidis à 30K



# Structure de la machine

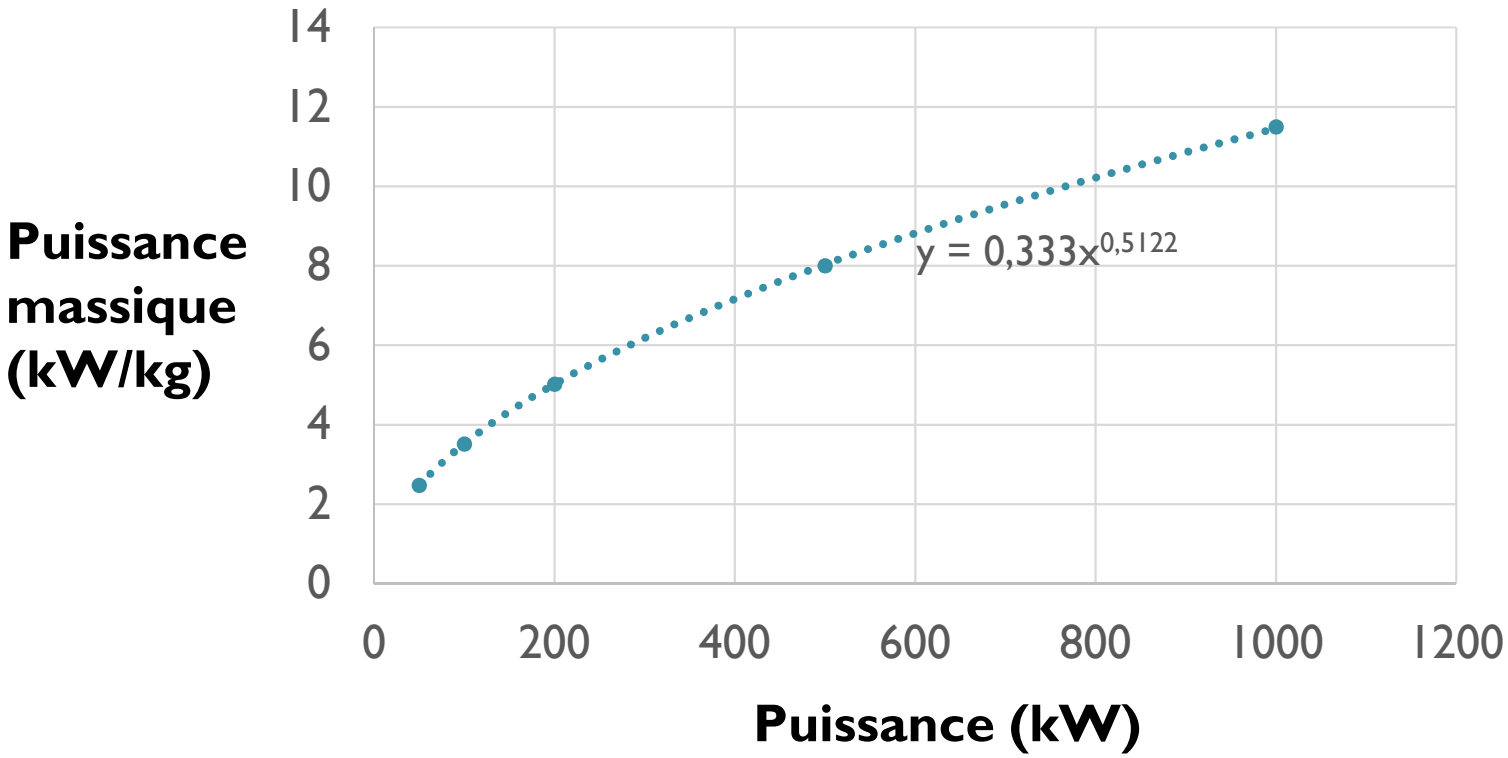



## Choix des matériaux

- **Bobine supraconductrice : Fil BSCCO**
- **Ecrans supraconducteur YBCO & MgB2**
- **Induits : fil de Litz**
- **Culasse : tôles FeSi feuilletées**

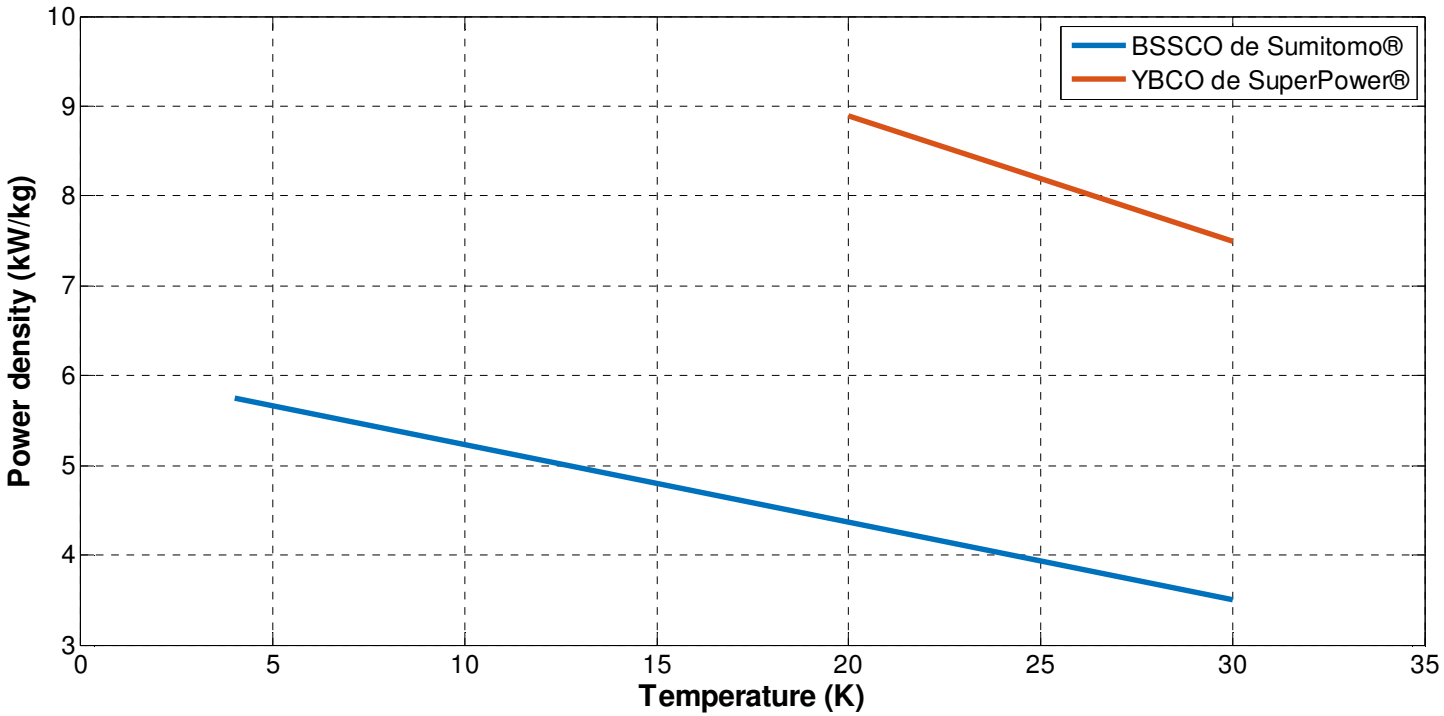
# Puissance massique vs P

- Avec fil BSSCO et écrans YBCO :




- Avec fil YBCO et écrans YBCO : >16kW/kg pour 1MW

# Puissance massique vs T

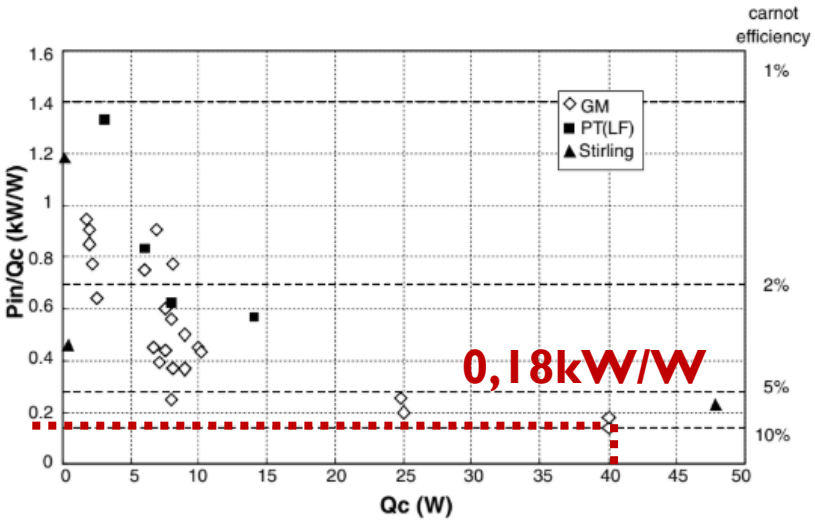



**Sans compter le système de refroidissement, la puissance massique augmente nettement en diminuant la température d'utilisation**

# Système de refroidissement

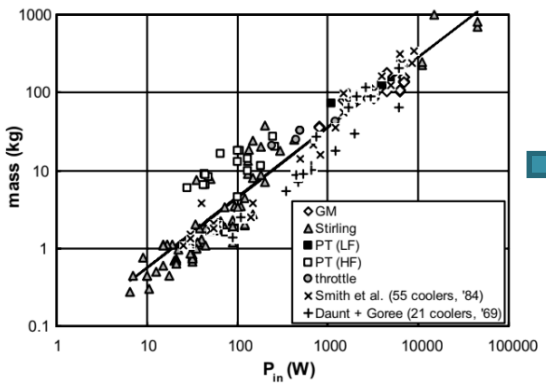
- Le poids du système de refroidissement dépends des pertes thermiques

**Estimation à 40W à 30W pour un prototype de 50kW**




Pin=7,2kW

[1]



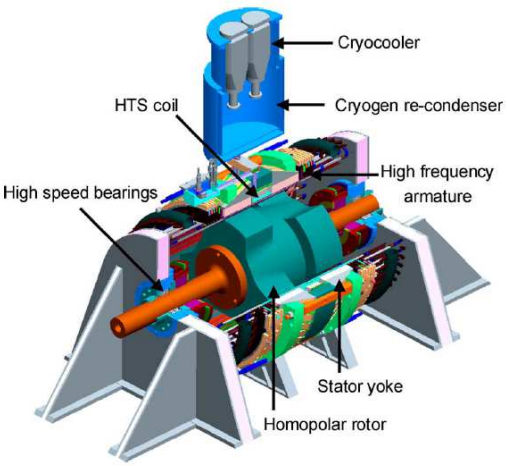

M≈100kg

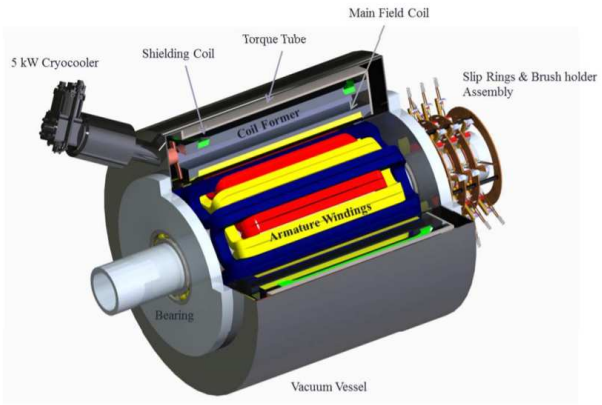
**CONSTAT : MASSE DU SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT AUGMENTE PEU AVEC LA PUISSANCE DE LA MACHINE**

**Pertes essentiellement dues aux amenées de courant (230A)**

**Court-circuité la bobine**

# Autres Projets récents




**GE**
Machine à griffes
1,3 MW
10000 tr/min
1 bobine BSSCO
Pas de bague balais
Ecoulement de Néon
8kW/kg

**NASA, Université Illinois**
Machine synchrone
10 MW
6000 tr/min
Nb3Sn
Conduction
25kW/kg

**Oswald**
Airbus
Cambridge
Rolls-Royce
KIT
Superox
Air liquide

# Conclusion

- Les projets d'applications de la supraconductivité en aéronautique existent

- Cout du matériau HTS ↘

- Technologie à basse température
=> principale difficulté

- le gain de poids ne se fait pas que sur le matériau supraconducteur

UNIVERSITÉ DE LORRAINE | GREEN

# Merci pour votre attention