

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



# **Les aimants supraconducteurs : applications et technologies**

**Lionel QUETTIER**



**Séminaire SFP – 13 janvier 2022**

# COMMENT CRÉER UN CHAMP MAGNÉTIQUE ?

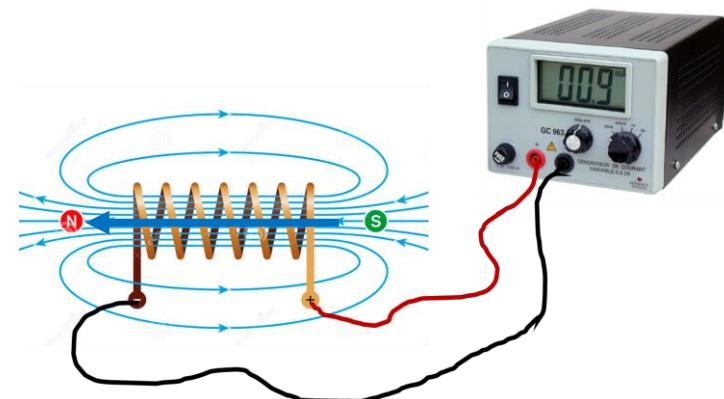
## Le tout premier aimant



**0,5 Gauss /  $5 \cdot 10^{-5}$  T**



**Aimant permanent  
(NdFeB, 0.5T)**

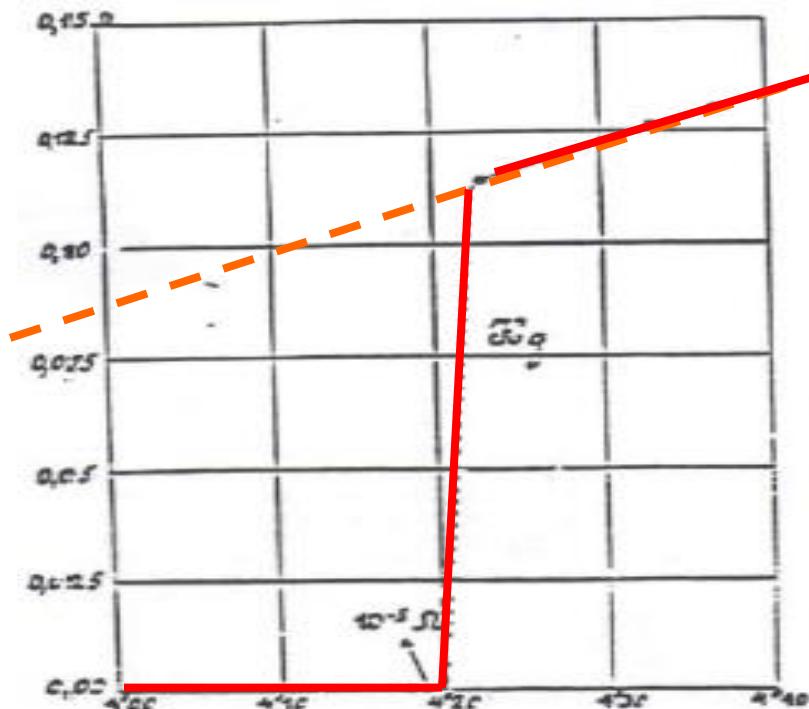


**Circulation d'un courant dans une spire**

# LA SUPRACONDUTTIVITÉ



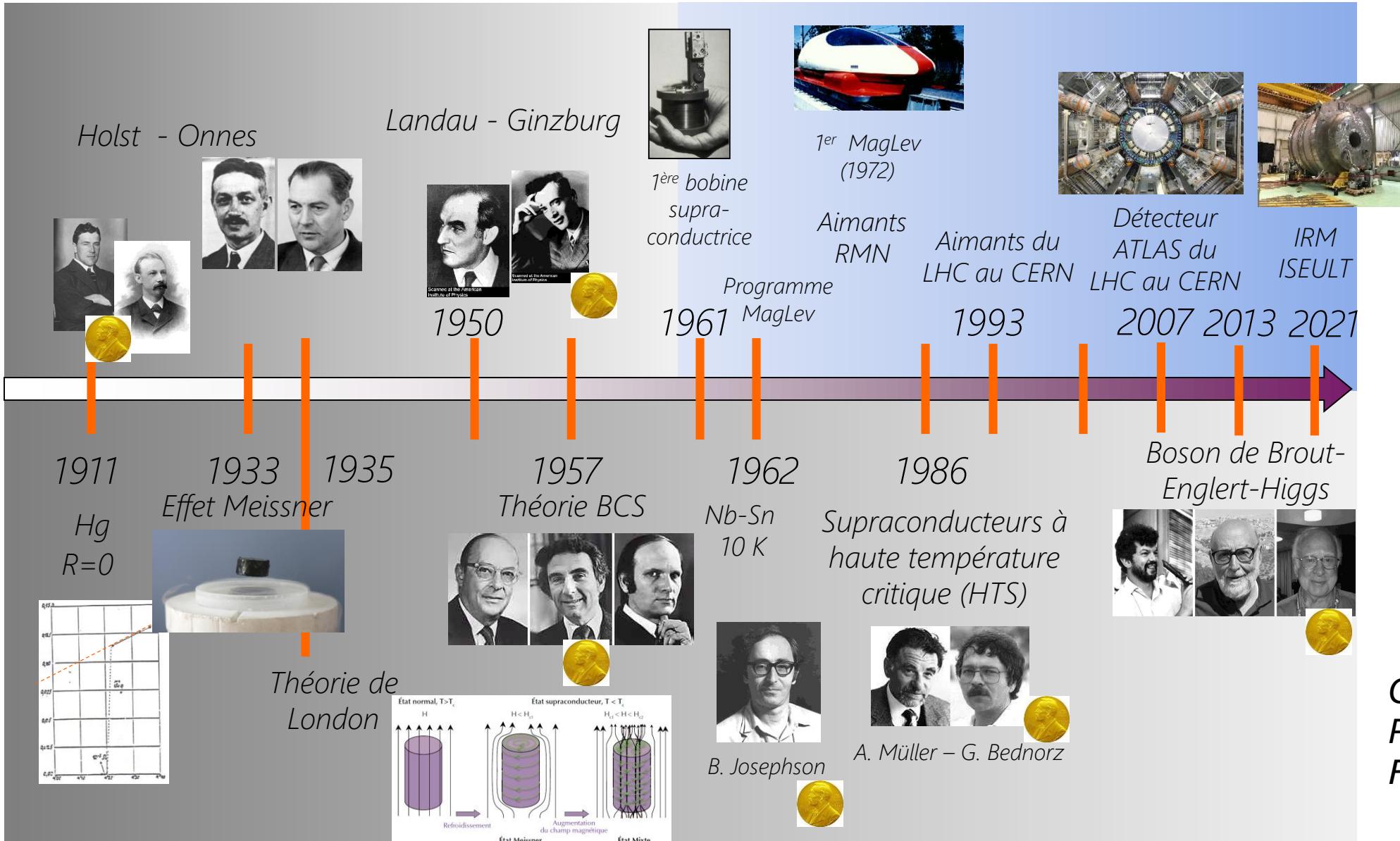
**Gilles Holst**, étudiant de Kamerlingh Onnes publie une courte note à l'académie royale des Pays-Bas le **8 Avril 1911** : "Sous toute réserve, la résistivité du mercure disparait en dessous de 4 K".



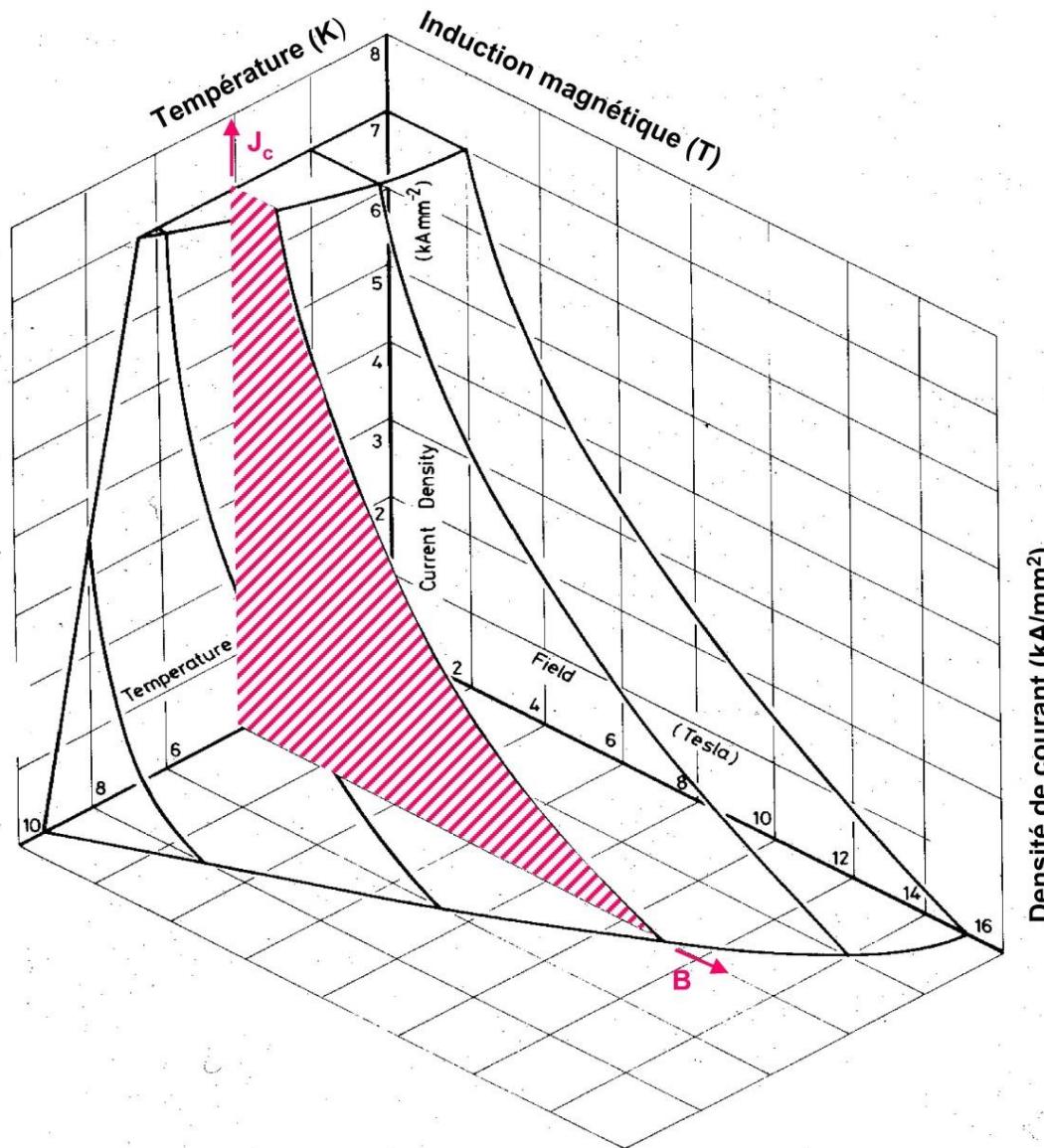
**La loi d'Ohm n'est plus une contrainte!**

- Consommation électrique minimum (essentiellement pour le refroidissement cryogénique)
- Fortes densités de courant
- Bobinage compact permettant d'obtenir des champs magnétiques intenses dans de grands volumes

# 110 ANS DE SUPRACONDUTIVITÉ... PLUSIEURS DÉCOUVERTES ET PLUSIEURS PRIX NOBEL!



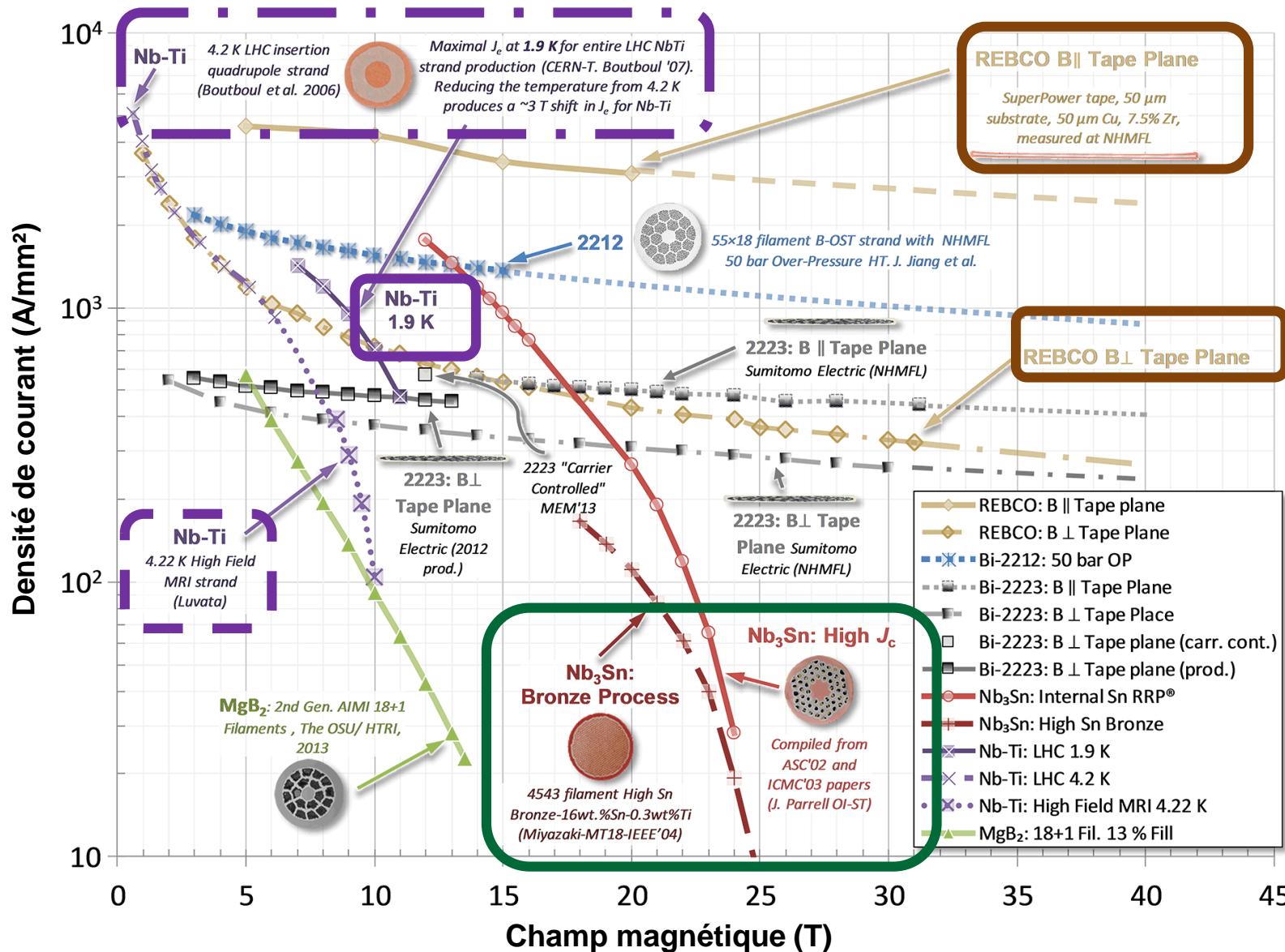
# SUPRACONDUTTIVITÉ VS. SURFACE CRITIQUE



L'état supraconducteur n'existe que dans un **domaine limité de température, de champ magnétique et de densité de courant**.

Pour certains matériaux, le courant critique dépend aussi des **contraintes mécaniques**, ou de **l'orientation du champ magnétique externe**

# CAPACITÉ DE TRANSPORT DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS (4.2K / 1.9K)

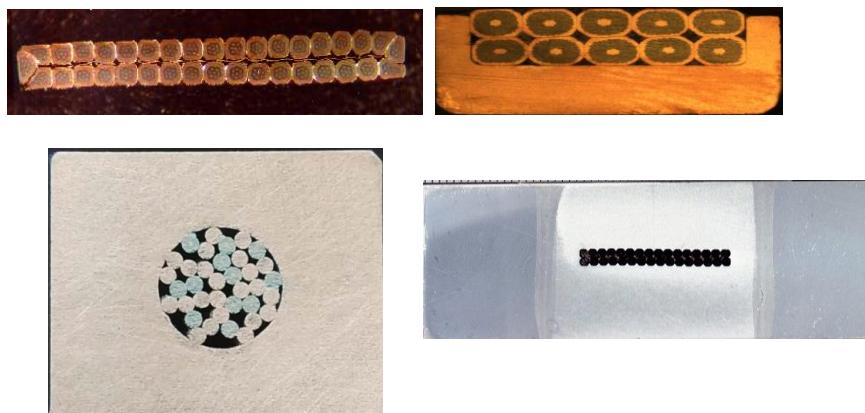
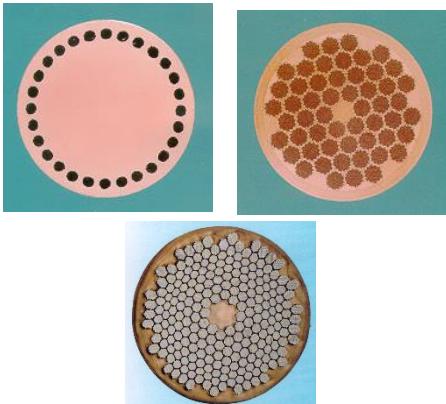


## Température critique

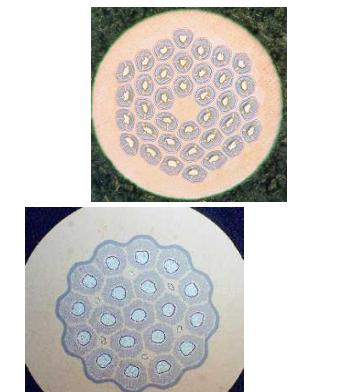
- NbTi = 10K
- Nb<sub>3</sub>Sn= 18K
- MgB<sub>2</sub> =39K
- HTS >70K

# DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS DISPONIBLES SOUS DIFFERENTES FORMES

NbTi



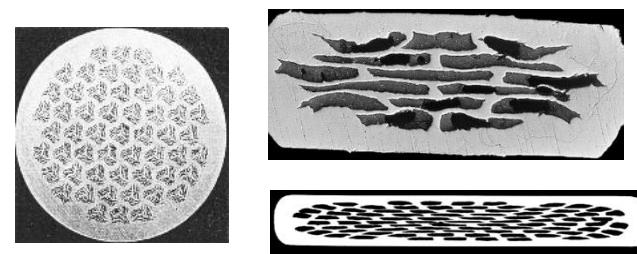
$\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Al}$



ReBCO



BSCCO

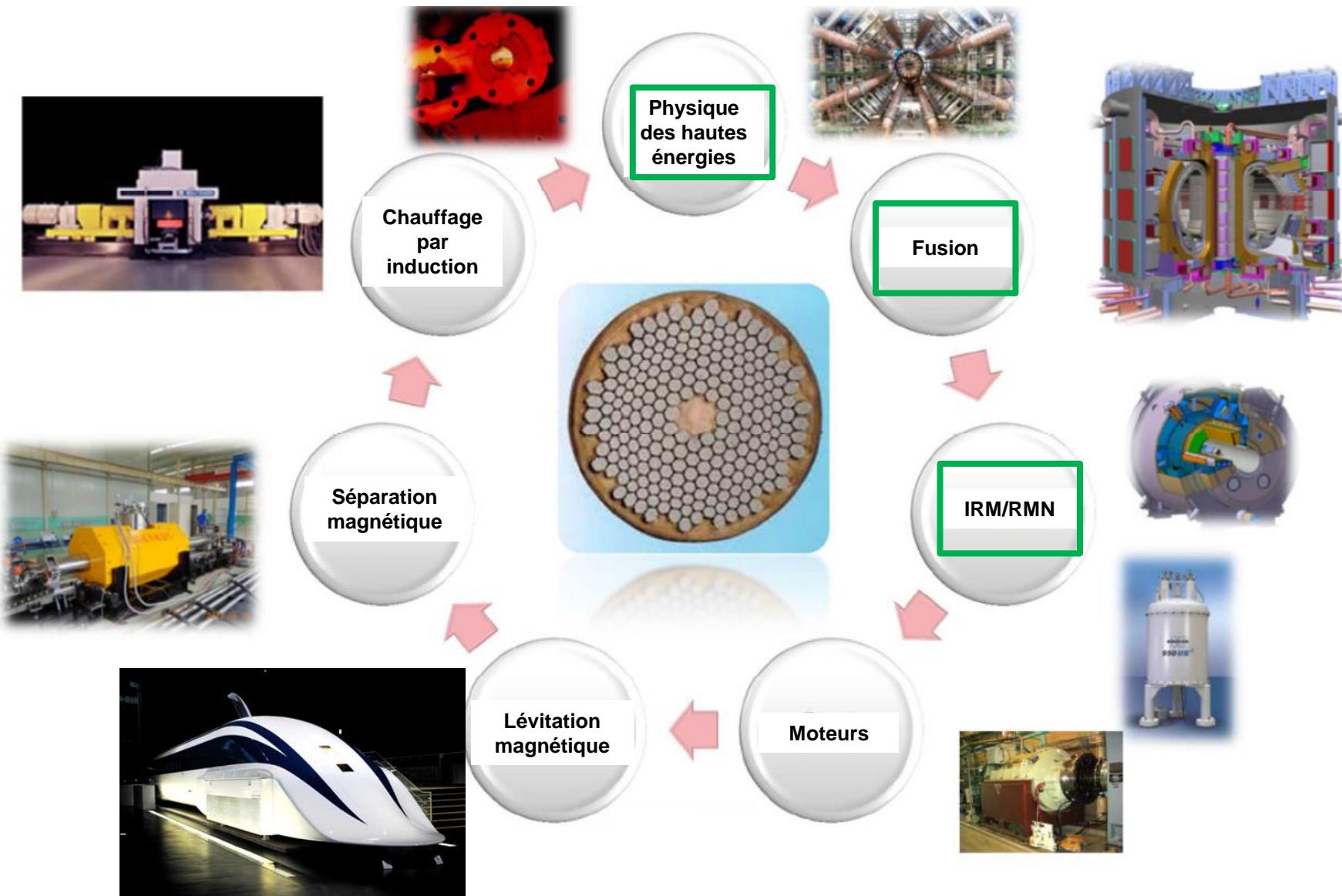


$\text{MgB}_2$

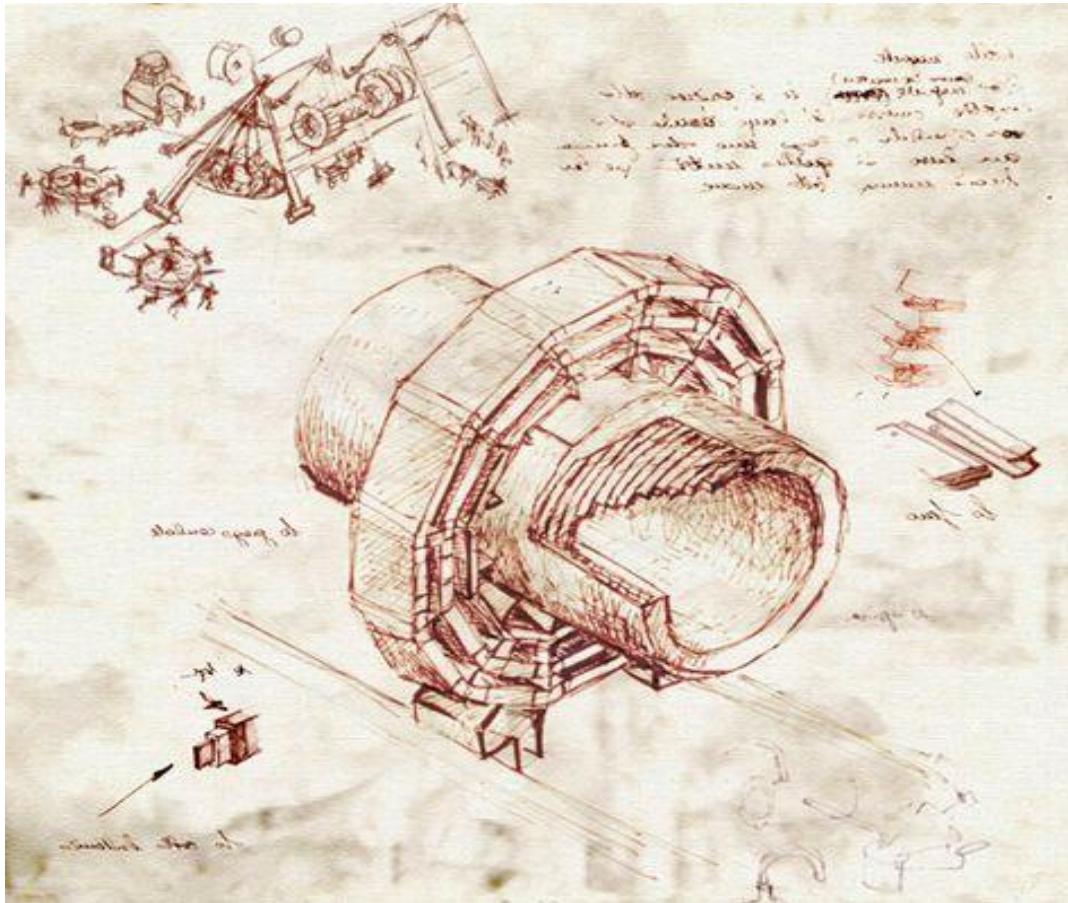


Pastilles/ brins/rubans/cables

# DE TRES NOMBREUSES APPLICATIONS



# POUR COMMENCER, FABRIQUER UN AIMANT SUPRACONDUCTEUR N'EST JAMAIS SIMPLE...



Comment les physiciens décrivaient CMS...



Comment les ingénieurs l'ont construit!

## Les paramètres importants

- Le champ central (en général le plus élevé possible...)
- L'ouverture et la zone utile (en général les plus grandes possibles...)
- Les dimensions extérieures (en général les plus faibles possibles...)
- La qualité/forme du champ magnétique (homogénéité, gradient, intégrale de champ...)
- Le champ de fuite (en général le plus faible possible, surtout juste à l'extérieur du cryostat)
- La température de fonctionnement et le mode de refroidissement (hélium, azote, cryocoolers, liquéfacteur...)
- Le type de fonctionnement (AC/DC)

**Très forts champs magnétiques, très forts courants, énergie stockée très élevée, très fortes contraintes mécaniques...**

**La supraconductivité nécessite des très basses températures**

**Protection en cas de « quench » (transition de l'état supraconducteur vers l'état résistif)**

**Et souvent le plus difficile: gestion des très fortes contraintes mécaniques et des déplacements dans le bobinage**

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

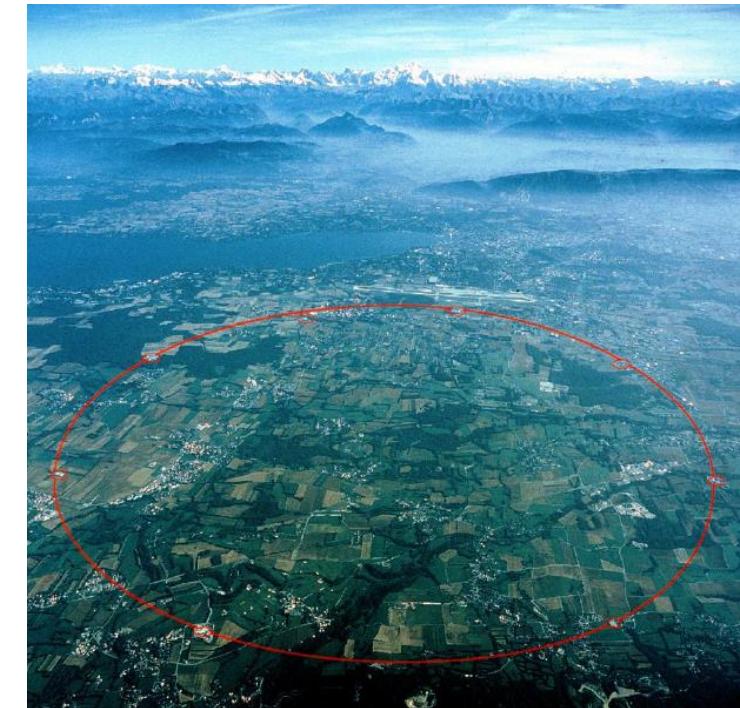


## Quelques exemples...

- **LA PHYSIQUE DES PARTICULES**
- LA FUSION
- LES AIMANTS IRM/RMN

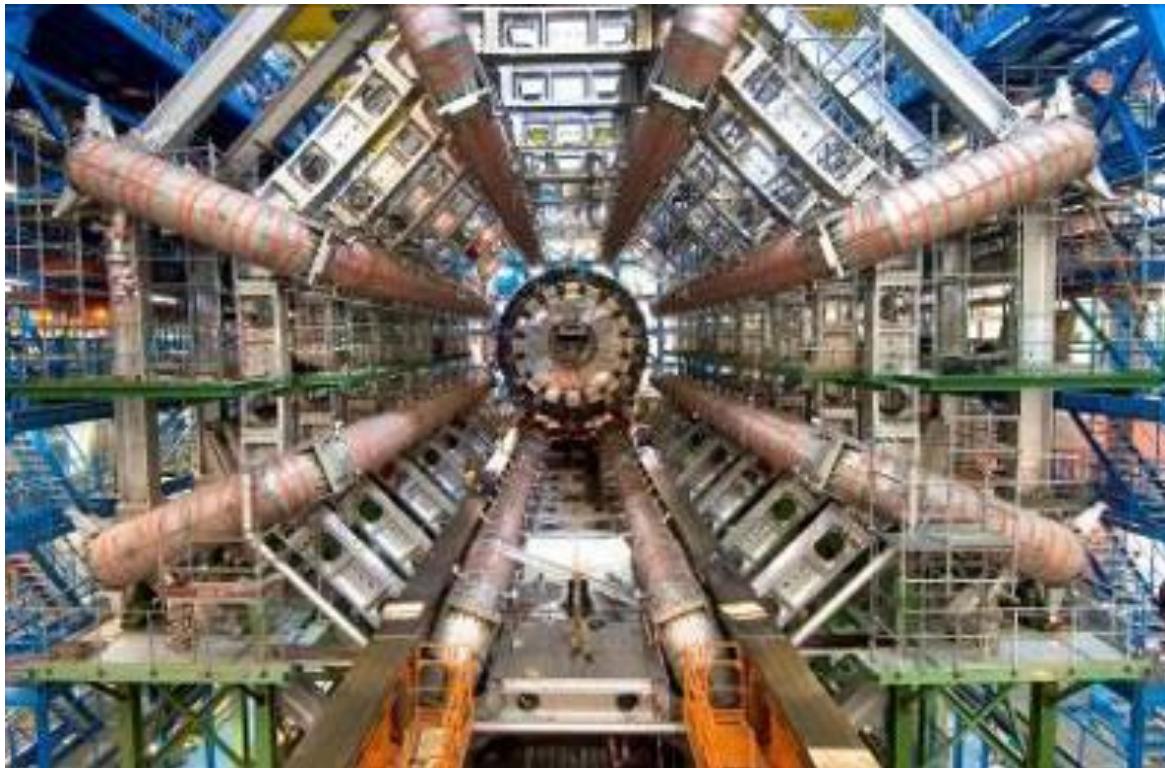
# LES AIMANTS SUPRACONDUCTEURS DU LHC

- Collisionneur à protons de 14 TeV
- Machine exploitée depuis 2008
- 27 km de circonférence
- 1706 aimants en NbTi, refroidis à 1.9K (hélium superfluide)
- Champ dipôle de 8.3T

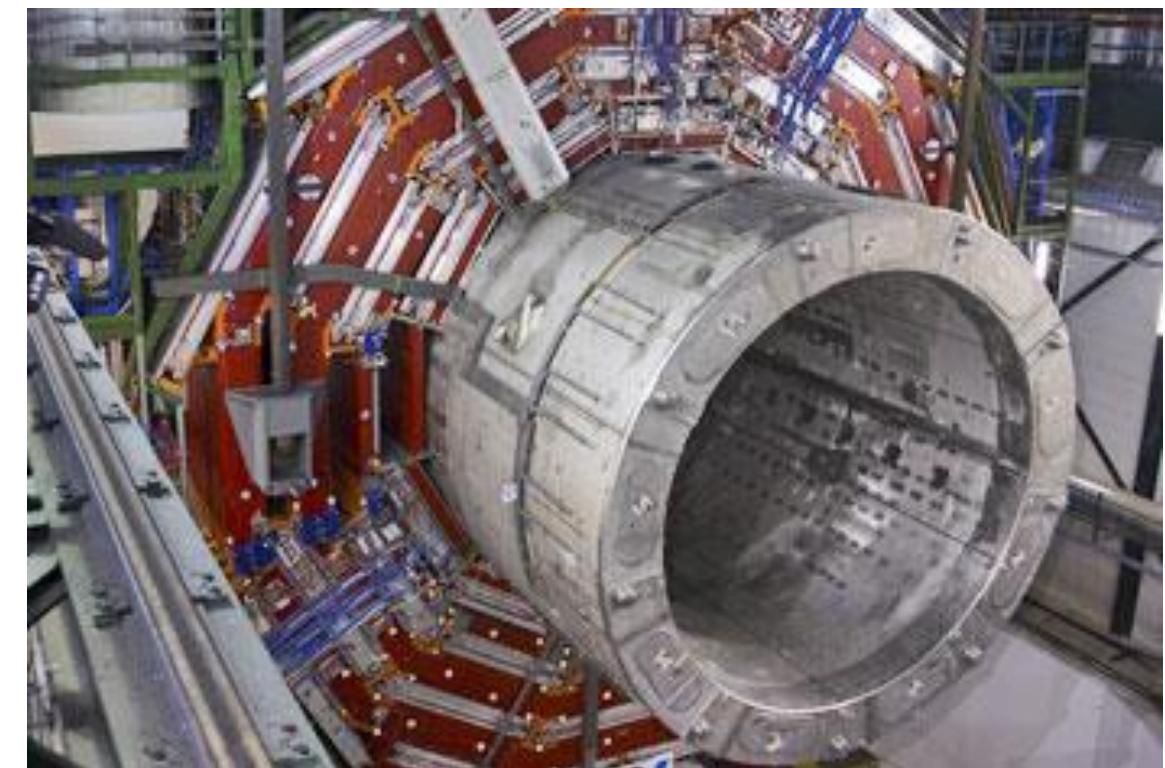


# LES AIMANTS SUPRACONDUCTEURS DU LHC

- Deux grands aimants de détecteur (NbTi)



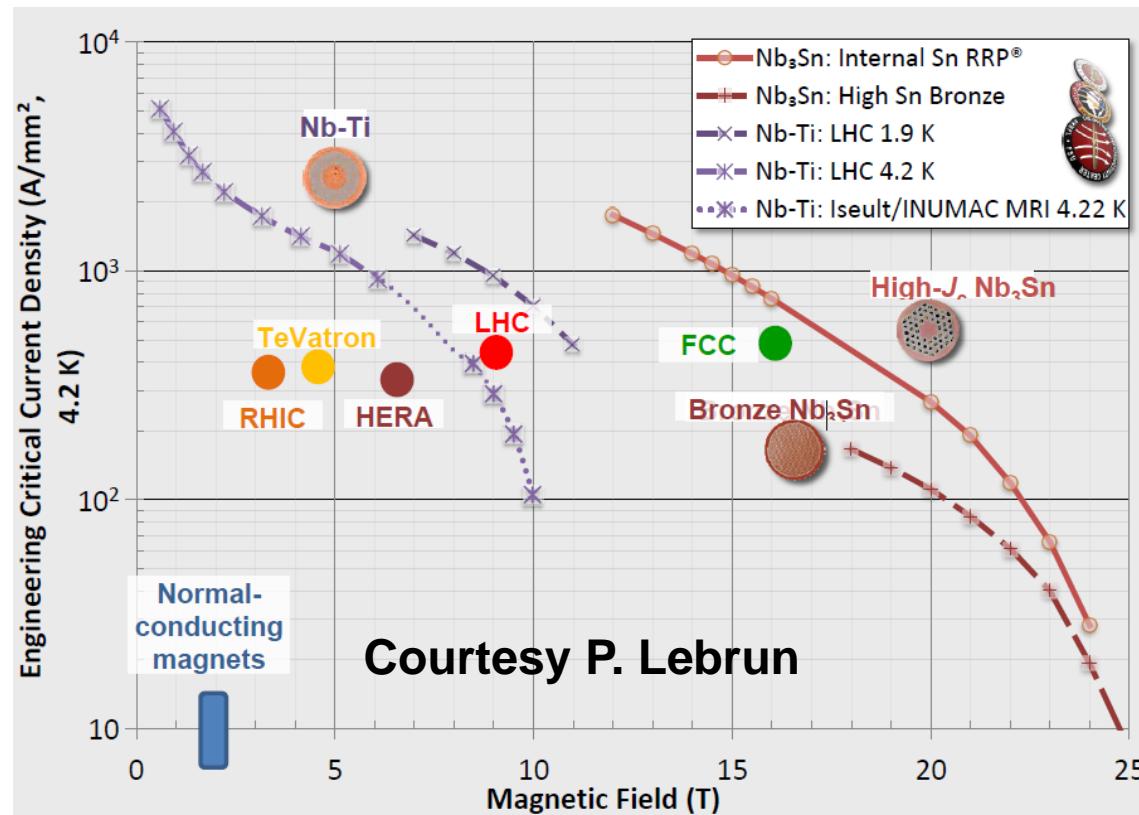
**ATLAS Barrel Toroid**



**CMS solenoid**

# UN BESOIN DE CHAMPS MAGNETIQUES TOUJOURS PLUS ELEVES POUR LES FUTURES MACHINES

- La technologie NbTi est parfaitement maîtrisée
- Mais limitation à environ 8T
- Besoin d'un autre matériau supraconducteur pour monter en champ et en énergie



$$E (\text{TeV}) = 0,3 \times B (\text{T}) \times r (\text{km})$$

Energie du  
faisceau

Champ  
magnétique Rayon de  
courbure

→ Utilisation du Nb<sub>3</sub>Sn ?

# LES FUTURES MACHINES

## Large Hadron Collider

2013 Nobel Prize with the discovery of the Higgs Boson

Reliable operation at 6.5 TeV  
(13 TeV c.o.m)  
Dipole Bore field: 7.7 T

Target 7 TeV (14 TeV c.o.m)  
Dipole 8.33 T

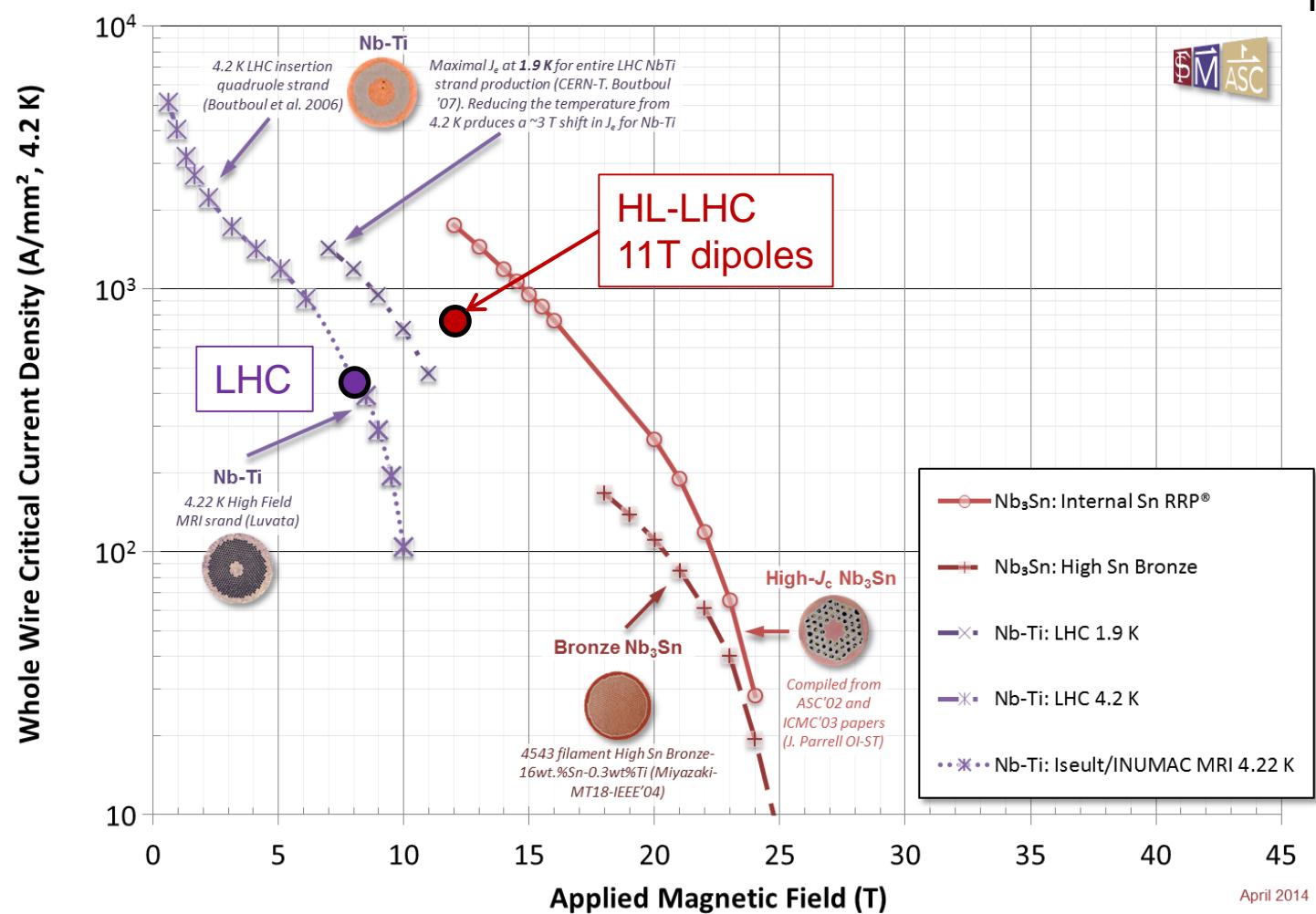


## HL-LHC : High Luminosity LHC

- **Focusing triplet:** Gradient of 132.6 T/m in a 150 mm bore
- **11 T Bending dipoles**



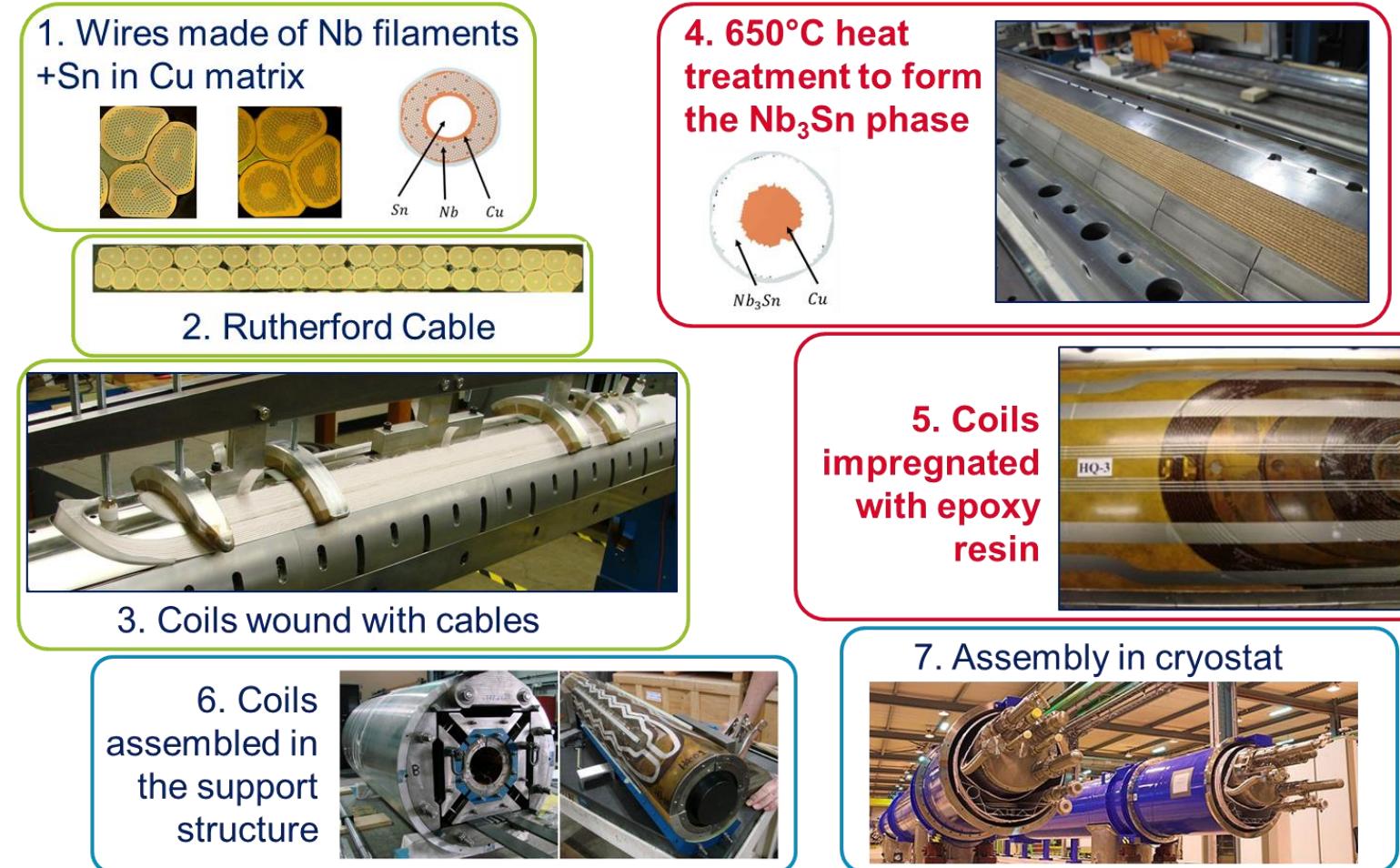
## PROGRAMME HL-LHC:

PREMIERS AIMANTS D'ACCÉLÉRATEUR EN  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 

# LES AIMANTS D'ACCÉLÉRATEUR EN $Nb_3Sn$

## Les défis des aimants $Nb_3Sn$ :

- Performances sensibles au contraintes mécaniques
- Nécessité d'un traitement thermique ( $650^\circ C$ ): changement dimensionnel du conducteur
- Conducteur fragile
- Structure mécanique pour reprendre les forces magnétiques très élevées
- Atteindre des tolérances de fabrication des bobines (homogénéité)

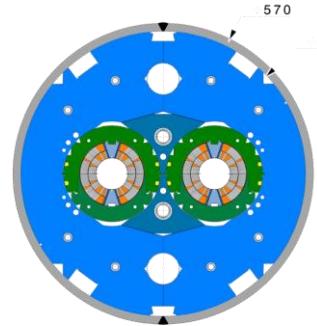


*Les grandes étapes de fabrication d'un aimant d'accélérateur  $Nb_3Sn$*

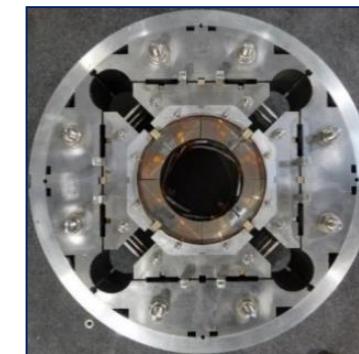
# PROGRAMME HL-LHC: PREMIERS AIMANTS D'ACCÉLÉRATEUR EN $\text{Nb}_3\text{Sn}$

**11T projet: remplacer un dipôle 8T (15m de long) par 2 dipoles 11T (6m de long)**

- 4 aimants fabriqués (collaboration CERN / GE, Belfort)
- Champ nominal atteint une première fois, mais dégradation des performances sur les cycles suivants
- Décision de ne pas les installer dans le tunnel (LS2)



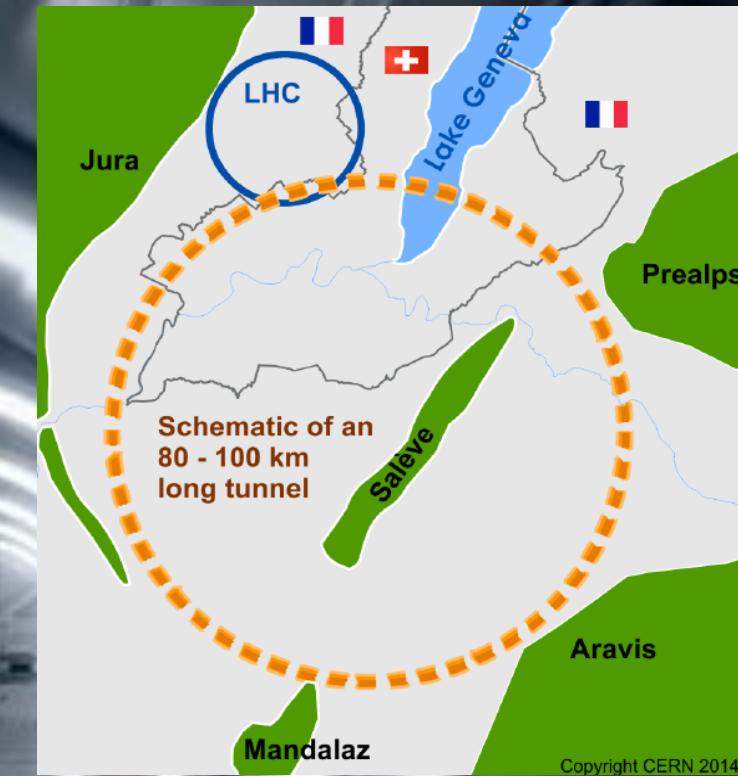
**MQXF project: install high gradient/high aperture quadrupoles (132.6 T/m in a 150 mm bore) in the insertion regions**



- **3 aimants courts 4m (USA) / 3 aimants longs 8m (CERN)**
- Tests en cours
- Installation prévue en 2024-2025 (LS3)

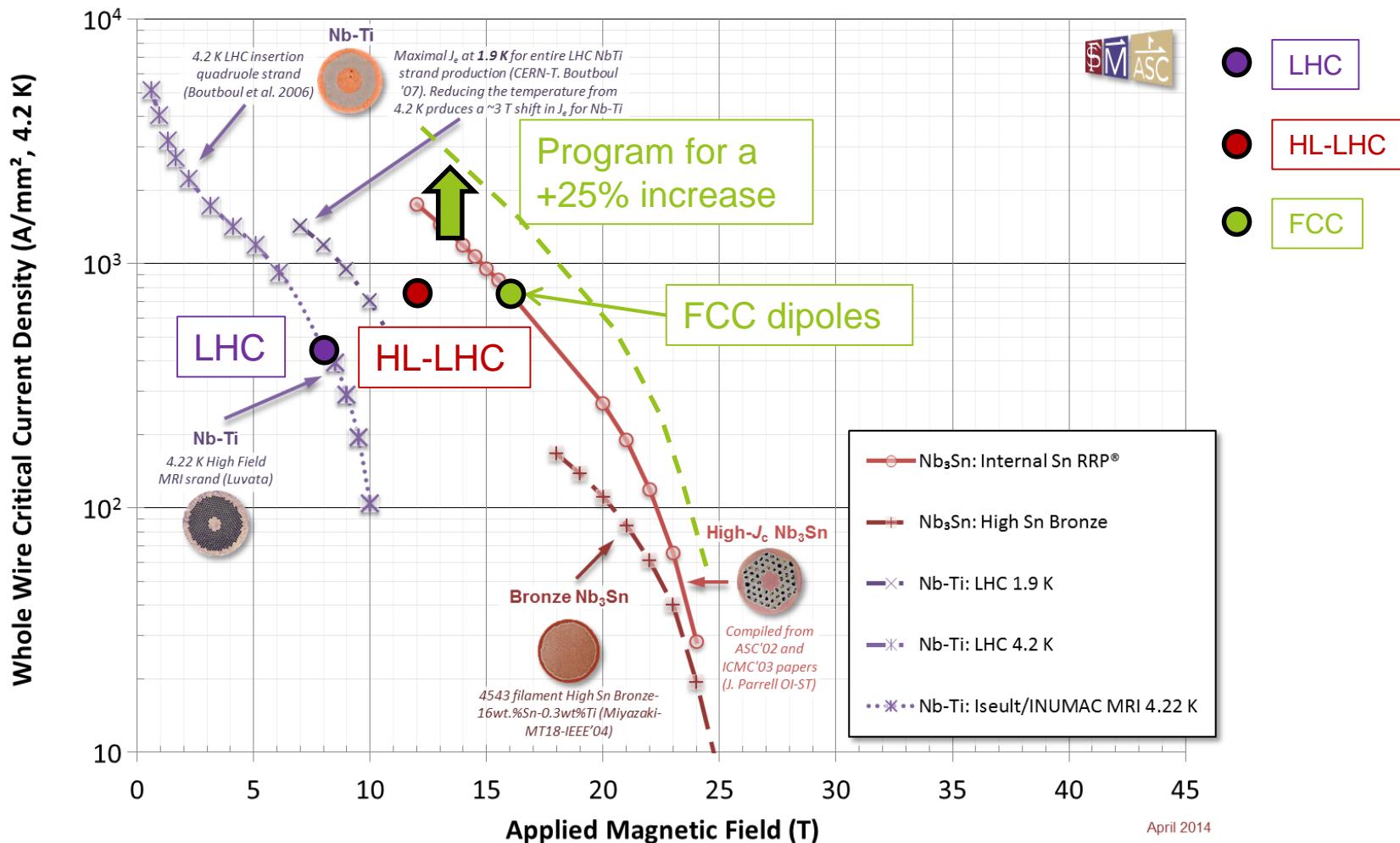
# LE PROJET FCC

**FCC-hh**  
**Future Circular Collider**  
**100 km - 16 T**  
**100 TeV (c.o.m)**



*Courtesy of CERN*

# LES AIMANTS $\text{Nb}_3\text{Sn}$ POUR FCC



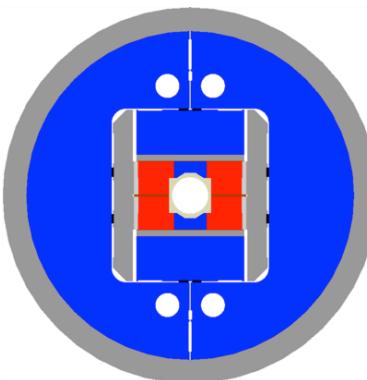
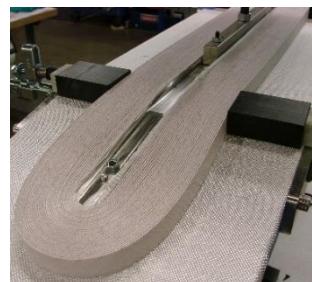
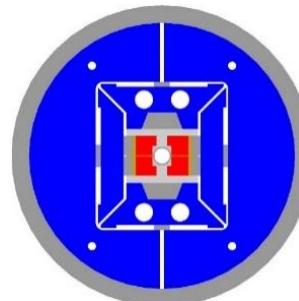
# DES PROGRES IMPORTANTS AU COURS DES DERNIERES ANNEES

- **HD2 (LBNL)**

R&D magnet

$\Phi$  43mm

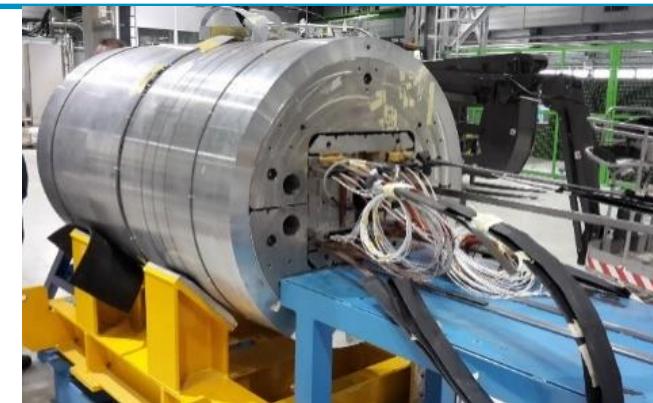
→ **13,8 T** in 2008



- **FRESCA2 (CERN/CEA)**

test station magnet → **14,6 T** in 2018

$\Phi$  100 mm

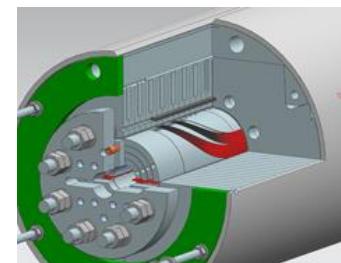


- **Fermilab 15T dipole**

R&D magnet,

→ **14,5 T** in 2020

$\Phi$  60 mm

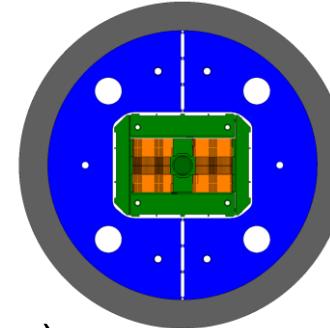


# PLUSIEURS PROJETS EN COURS POUR UN DESIGN FCC

## **CERN R&D: RMM**

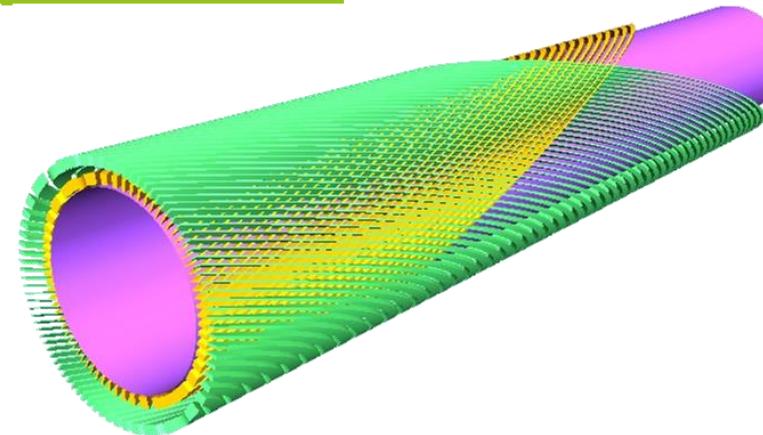
- Racetrack Model Magnet
- 16 T, bobines plates
- Fabrication en cours

$\Phi$  50 mm (FFC spécification)

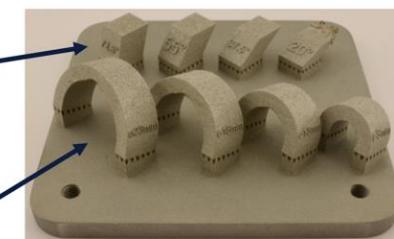


## The Canted Cosine Theta (CCT) concept – LBNL (USA)

- New technology
- Short models
- Tests ongoing



R&D en cours (PSI, Suisse)



SLM with stainless steel (CL 20ES)

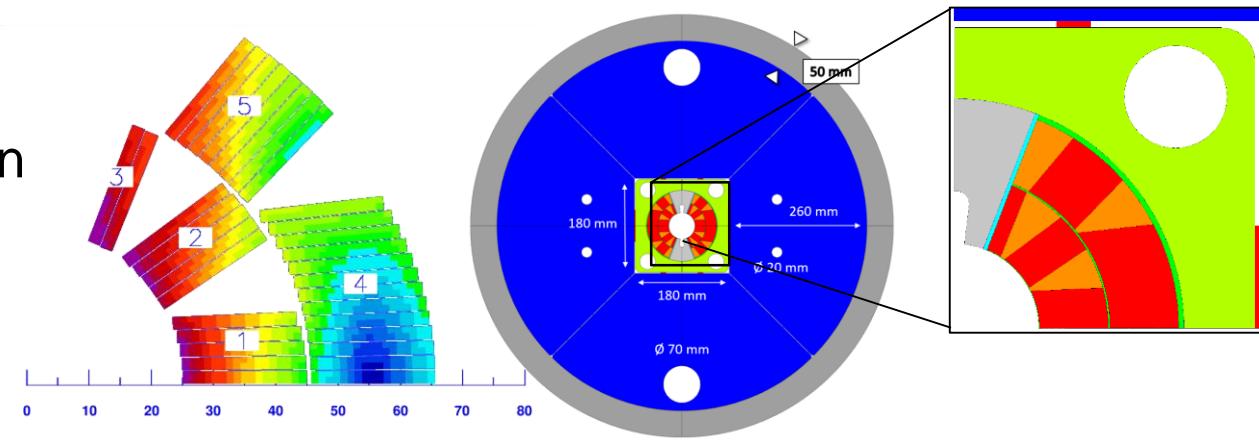


Courtesy E. Rochepault

# PLUSIEURS PROJETS EN COURS POUR UN DESIGN FCC

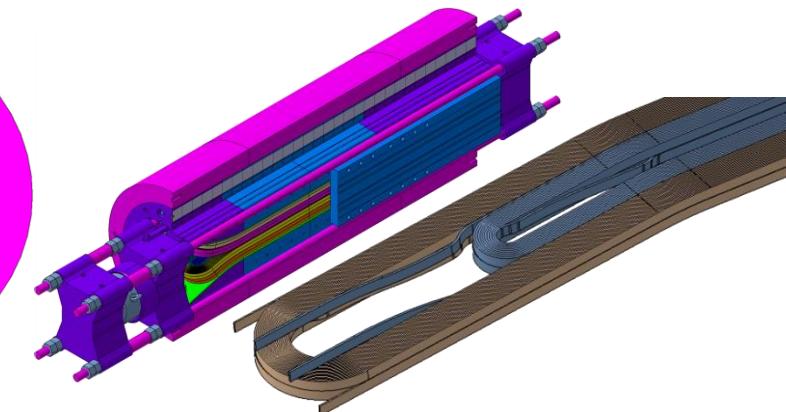
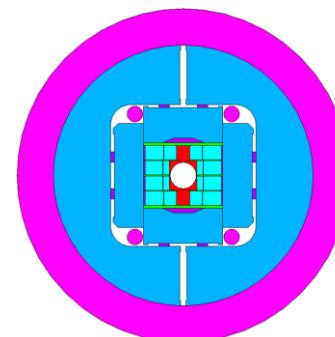
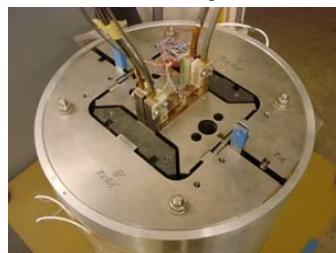
## Falcon: CERN/INFN model

- 14 T demonstrator, conceptual design
- 16 T concept for FCC



## F2D2: CERN/CEA model

- 15 T demonstrator, engineering design+mockups
- 16 T concept for FCC



Courtesy E. Rocheapault

→ Mais il reste encore un gros effort de R&D pour maîtriser la technologie, et pouvoir assurer la production en série d'aimants  $\text{Nb}_3\text{Sn}$

# QUID DE L'OPTION HTS?

$$E \text{ (TeV)} = 0,3 \times B \text{ (T)} \times r \text{ (km)}$$

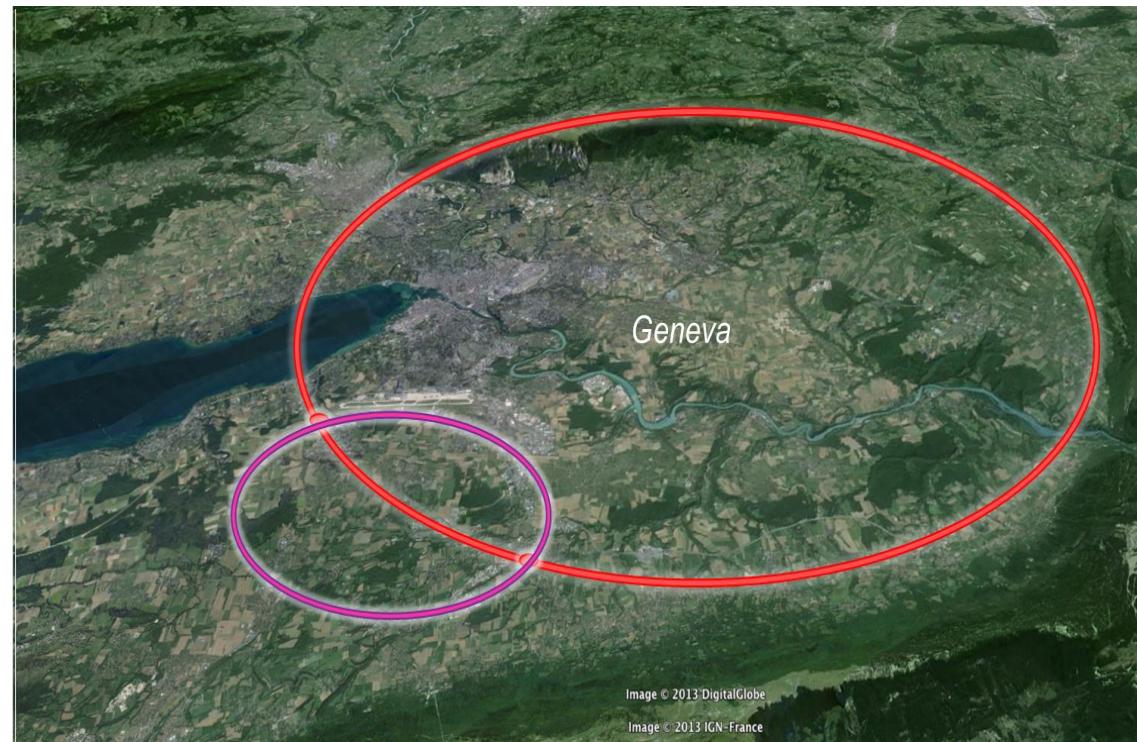
Energie du  
faisceau

Champ  
magnétique

Rayon de  
courbure

**LHC**  
**14 TeV**  
**27 km,**  
**NbTi, 8,33 T**

**HE-LHC**  
**33 TeV**  
**27 km,**  
**HTS, 20 T**



**HE-LHC**  
**33 TeV**  
**65 km,**  
**NbTi, 8,33 T**

# LES AIMANTS HTS

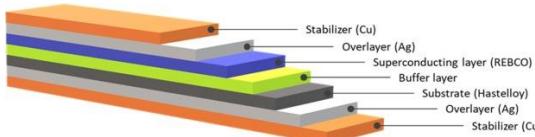
## Les défis des aimants HTS:

- Conducteurs très fragiles
- Anisotropie des propriétés mécaniques et électriques
- Structure mécanique innovante pour reprendre les forces magnétiques très élevées
- Protection:
  - Très grande stabilité thermique
  - Propagation lente des quenches dans la bobine
  - Détection plus difficile, donc risque d'échauffement local et de dégradation
- Assurer l'homogénéité/la stabilité temporelle du champ magnétique:
  - Tolérances de fabrication des bobines
  - Maîtrise des changements dimensionnels à froid et sous chargement magnétique
  - Courants d'écrantage dans le ruban supraconducteur

# QUELS DIPÔLES HTS POUR UN ACCÉLÉRATEUR?

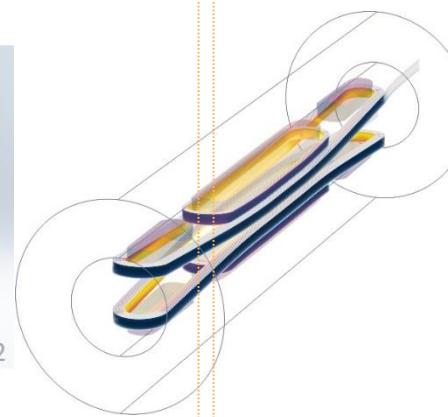
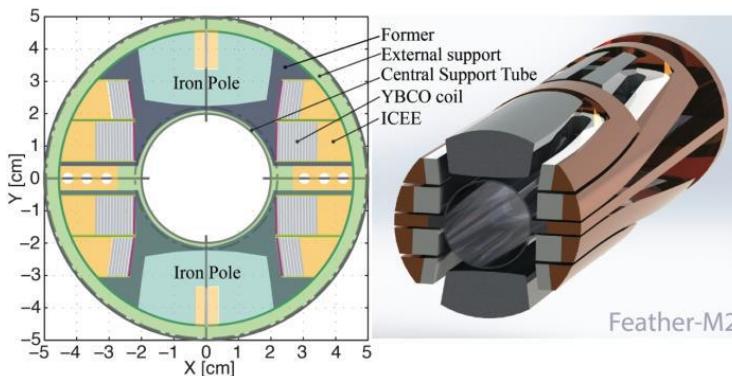
## YBCO ( $R_{are}EarthBCO$ )

Yttrium  
Barium  
Copper  
Oxide

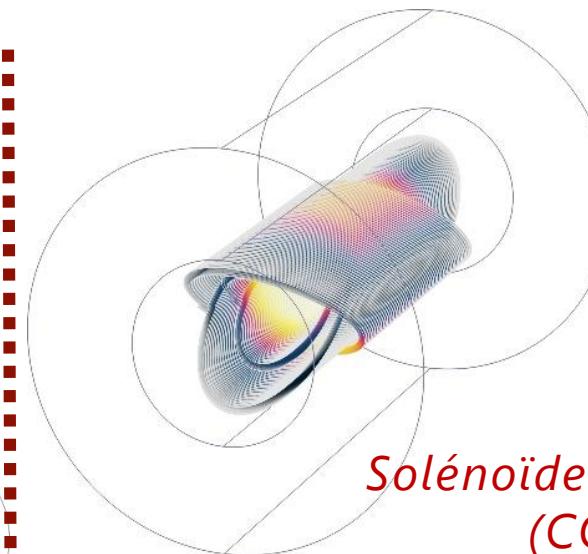
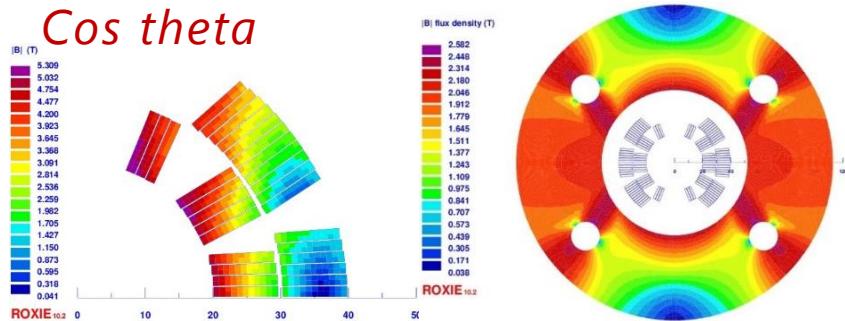


*Câble Roebel*

## Blocks alignés



## $\cos \theta$



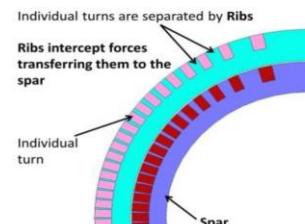
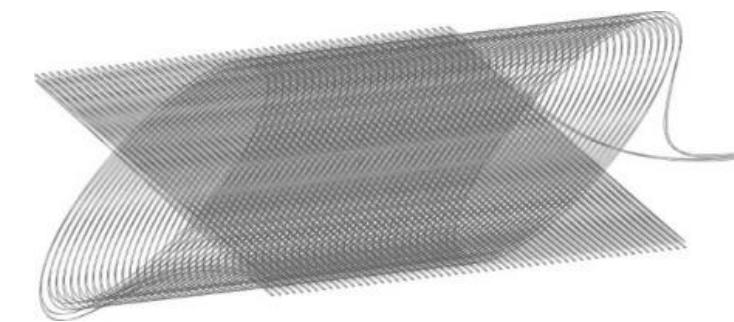
*Solénoïdes inclinés  
(CCT)*

A NEW CONFIGURATION FOR A DIPOLE MAGNET  
FOR USE IN HIGH ENERGY PHYSICS APPLICATIONS\*

D. I. MEYER and R. FLASCK

Physics Department, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48104, U.S.A.

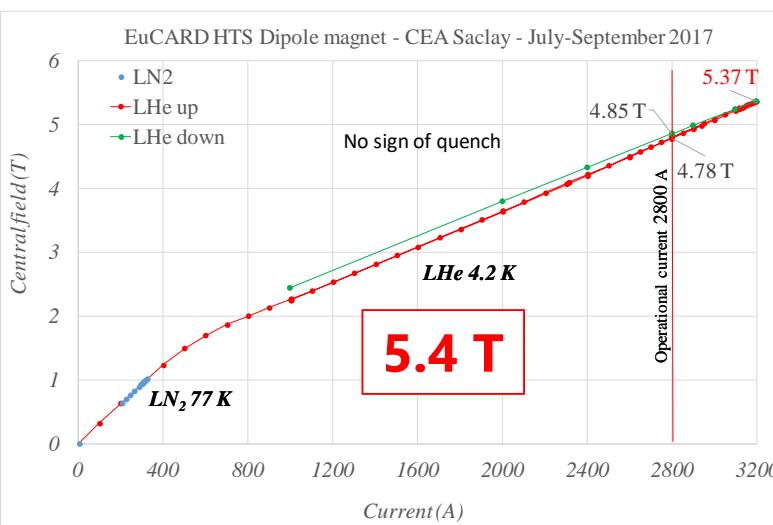
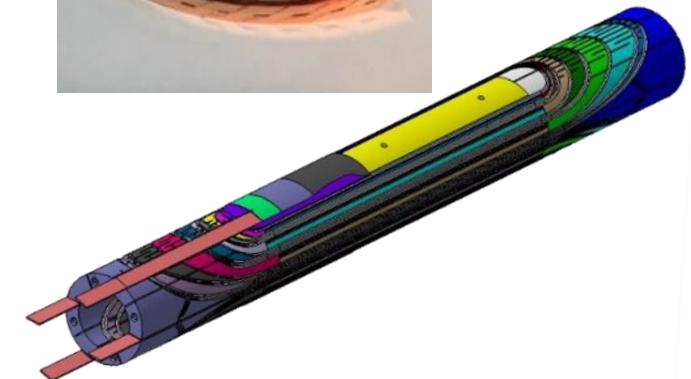
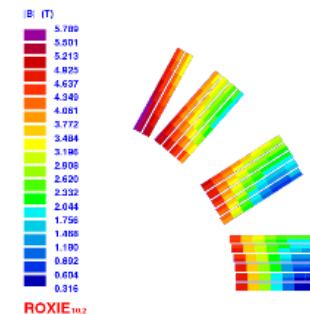
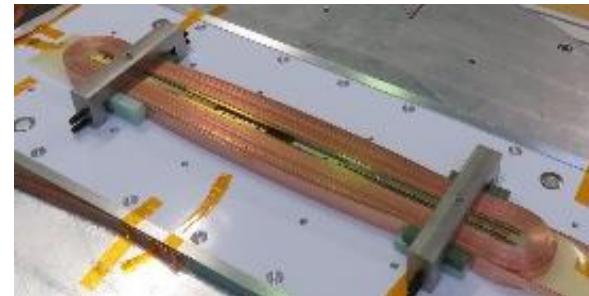
Received 16 December 1969



Courtesy P.Fazilleau

Bismuth  
Strontium  
Calcium  
Copper  
Oxide

# QUELS DIPÔLES HTS POUR UN ACCÉLÉRATEUR?



EuCARD

CEA-CERN

EuCARD2, CEA  
design

5.4 T

Dipole

REBCO, 4 rubans SC  
en //, 4.2 K

2.6 T

Dipole cos theta

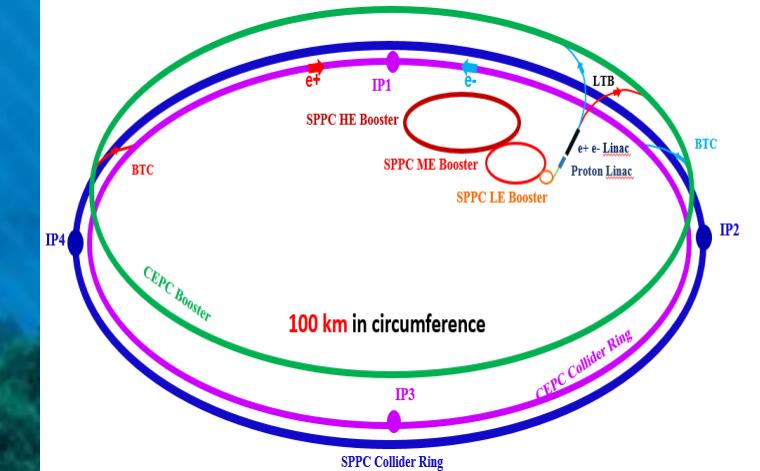
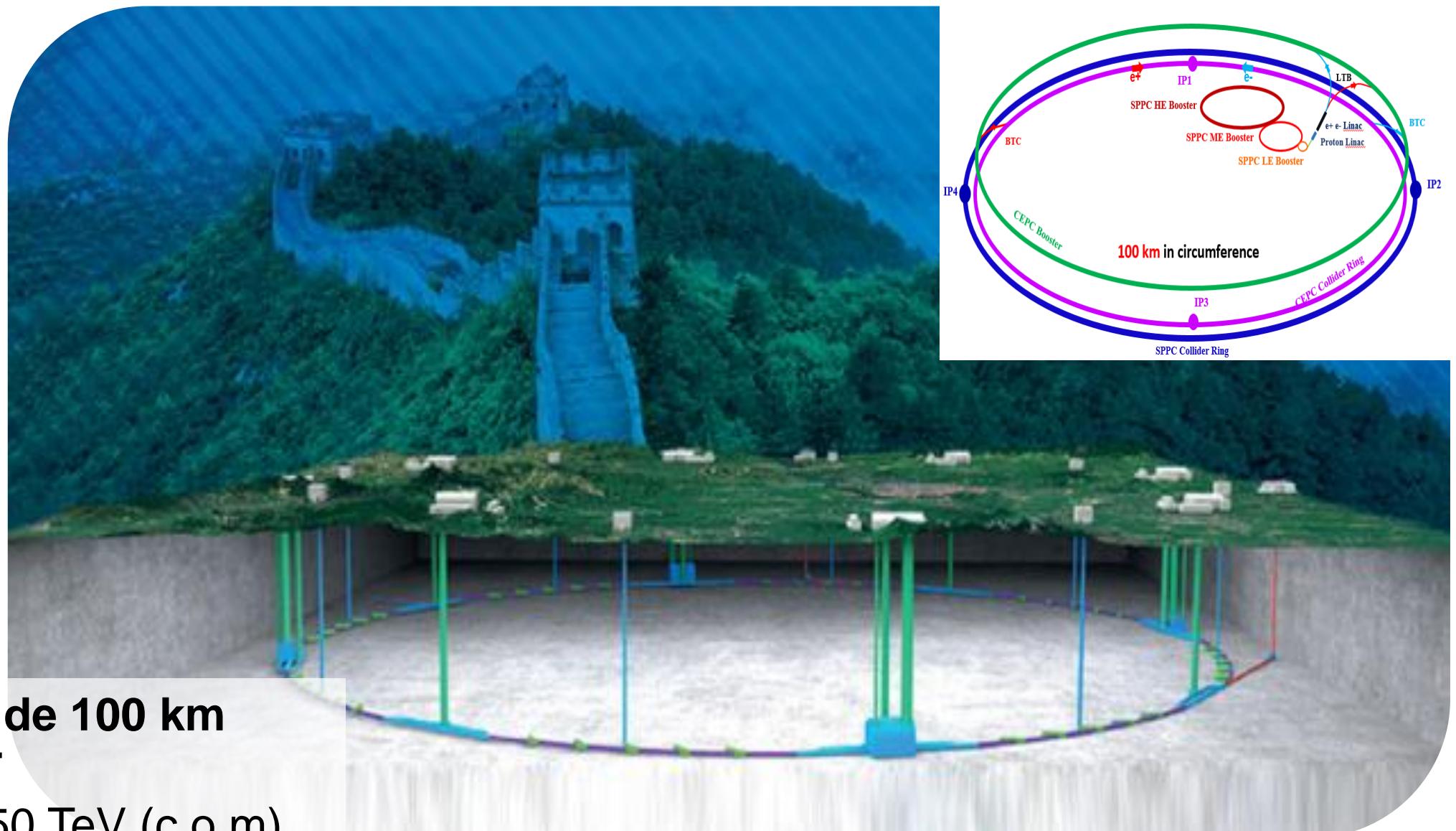
Cable Roebel rubans  
REBCO, 4.2 K



Test de l'aimant seul  
à venir au CERN puis  
dans un champ de 6T

Courtesy M. Durante/T. Lécrevisse

# LE SUPER PROTON-PROTON COLLIDER (SPPC)



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

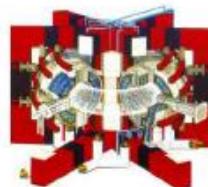


## Quelques exemples...

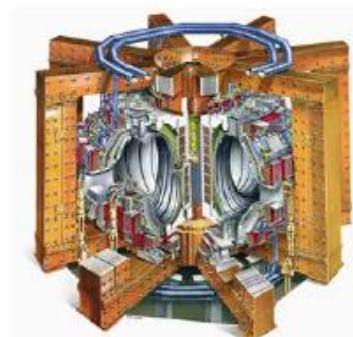
- LA PHYSIQUE DES PARTICULES
- **LA FUSION**
- LES AIMANTS IRM/RMN

# DES MACHINES DE FUSION DE PLUS EN PLUS AMBITIEUSES

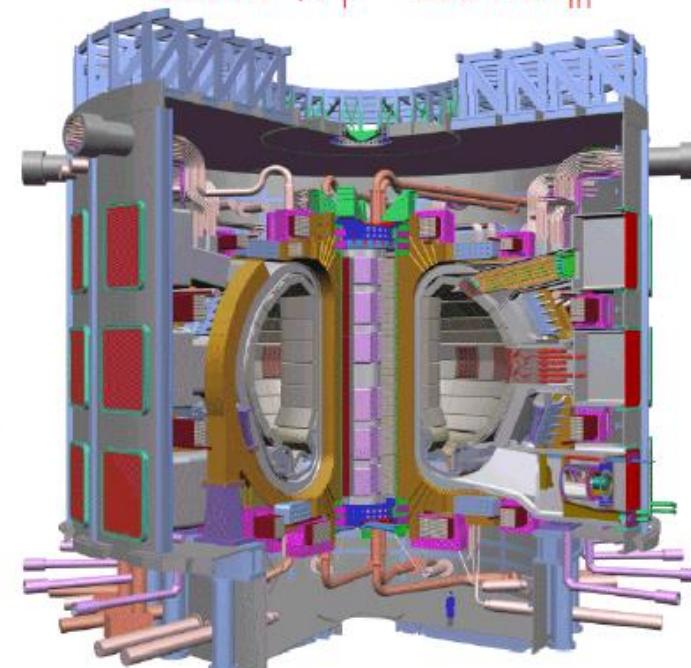
**Tore Supra**  
 $25 \text{ m}^3, P_F = \sim 0 \text{ MW}_{\text{th}}$



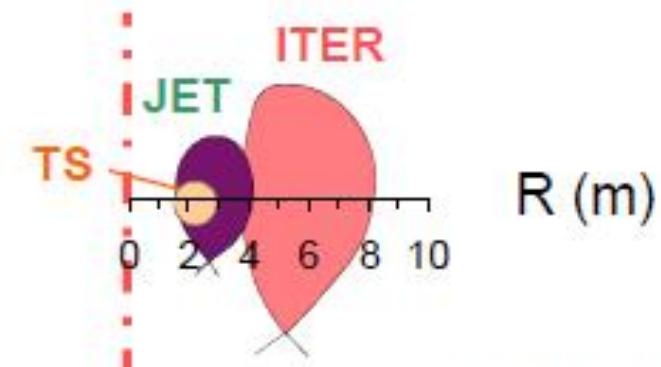
**JET**  
 $80 \text{ m}^3, P_F = \sim 16 \text{ MW}_{\text{th}}$



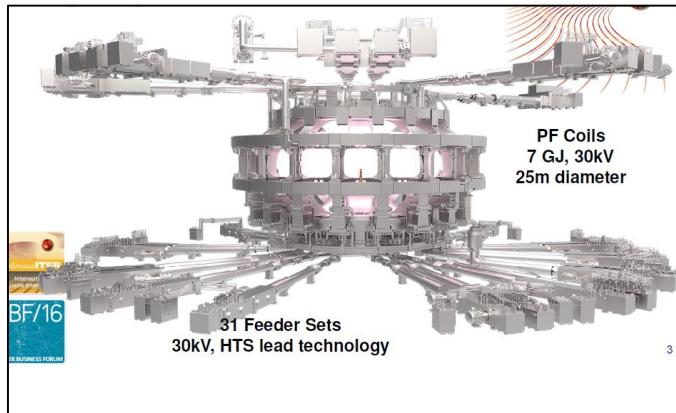
**ITER**  
 $800 \text{ m}^3, P_F = \sim 500 \text{ MW}_{\text{th}}$



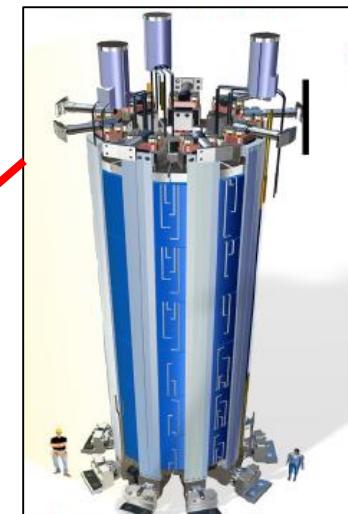
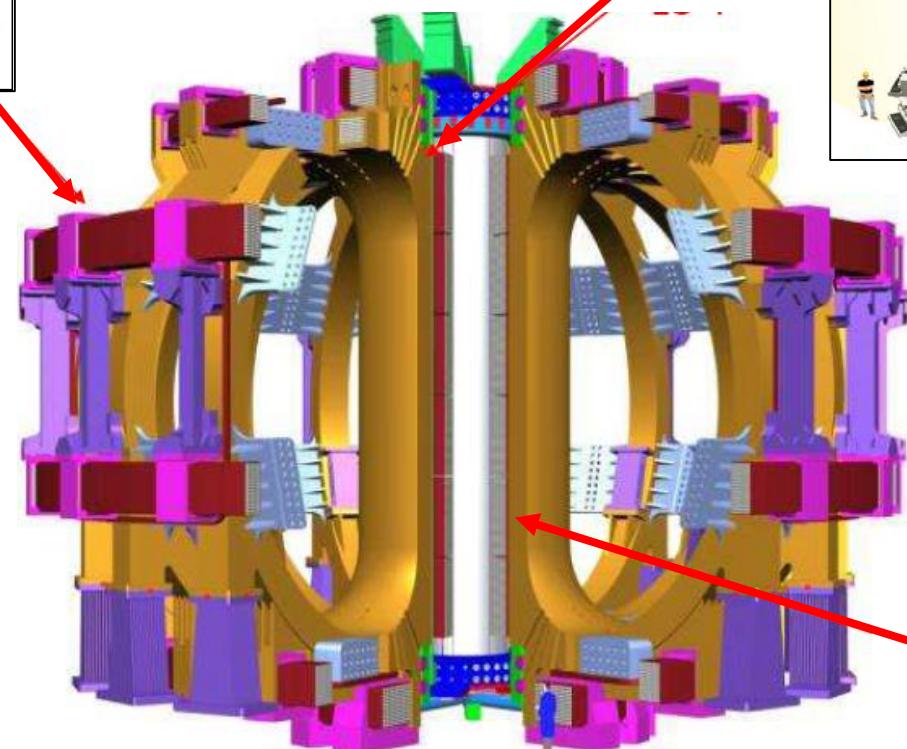
ITER Parameters	
R : Major radius (m)	6,2
a : Minor radius (m)	2,0
Plasma magnetic field $B_t$ (T)	5,3
Plasma Current (MA)	15
Fusion Power $P_F$ (MW)	500
Plasm discharge duration	400 s
Amplification factor(Q)	10
Investment cost	$\sim 13 \text{ G}\text{\euro}$



# LES AIMANTS D'ITER, LES PLUS GRAND AIMANTS SUPRACONDUCTEURS JAMAIS CONSTRUITS



**Bobines poloïdales**  
 $D = 25\text{m}$

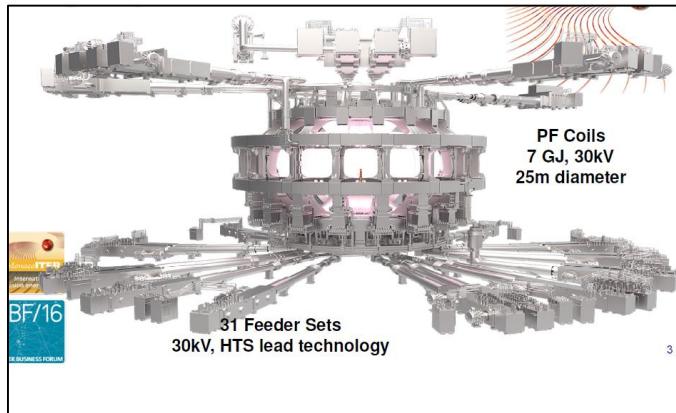


**Solénoïde central**  
 $H=13\text{m}$



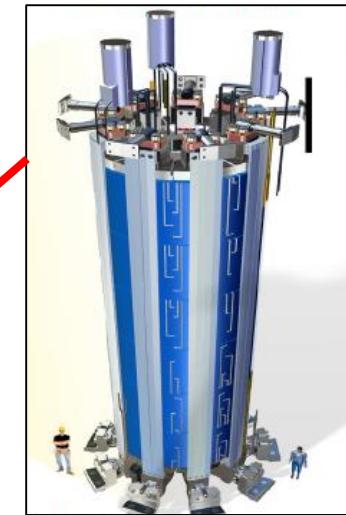
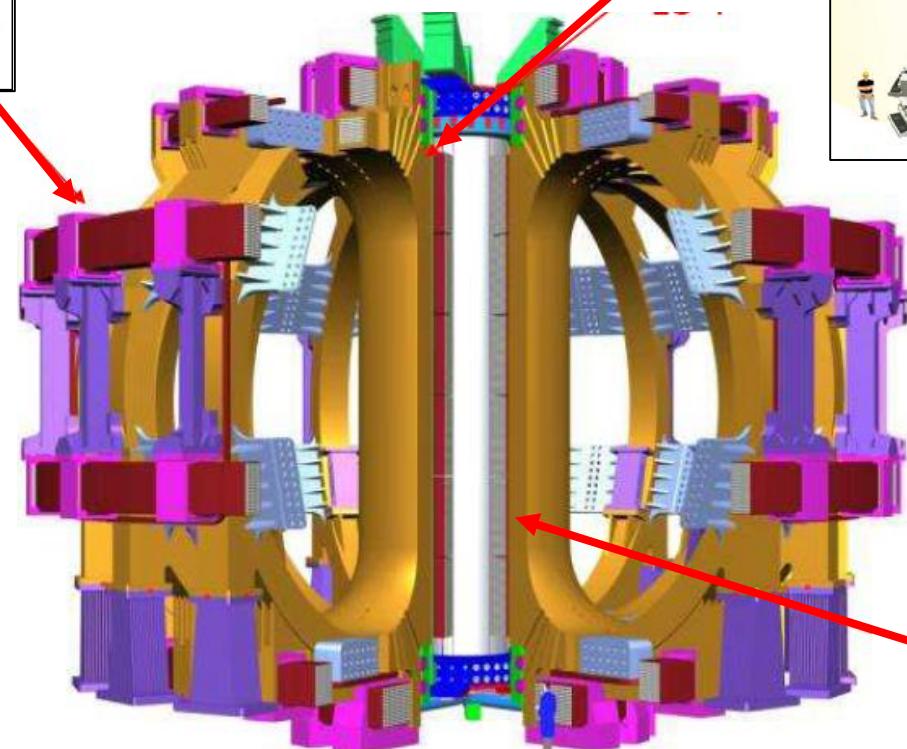
**Bobines  
toroïdales**  
 $R = 6.2 \text{ m}$

# LES AIMANTS D'ITER, LES PLUS GRAND AIMANTS SUPRACONDUCTEURS JAMAIS CONSTRUITS



## Bobines poloïdales

- 4-6T
- NbTi
- 244 tonnes



Et des composants HTS  
(amenées de courant)

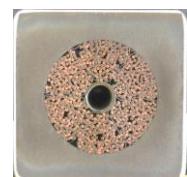
## Solénoïde central

- 13T; 4.5K
- $\text{Nb}_3\text{Sn}$
- 132 tonnes



## Bobines toroïdales

- 11.8 T (peak)
- $\text{Nb}_3\text{Sn}$
- 376 tonnes



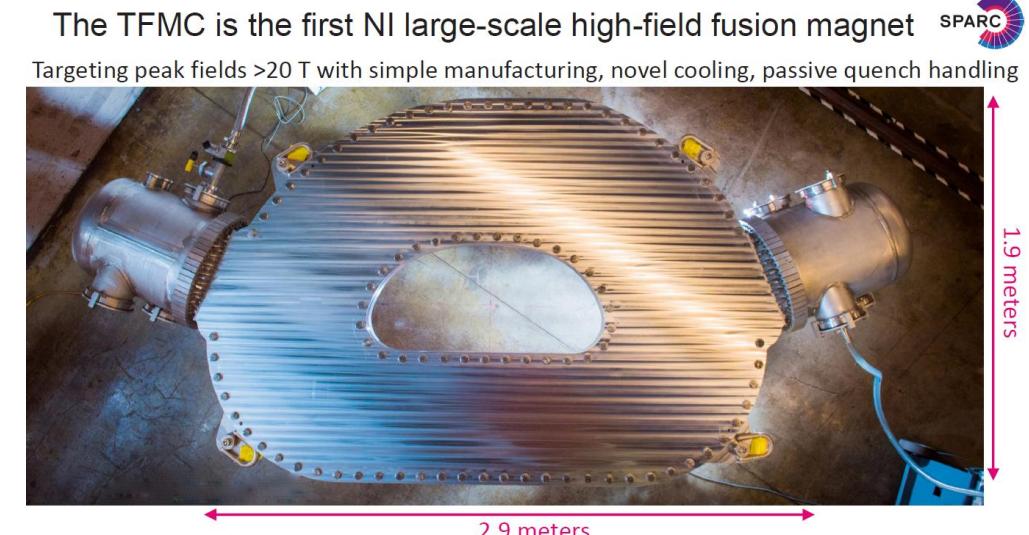
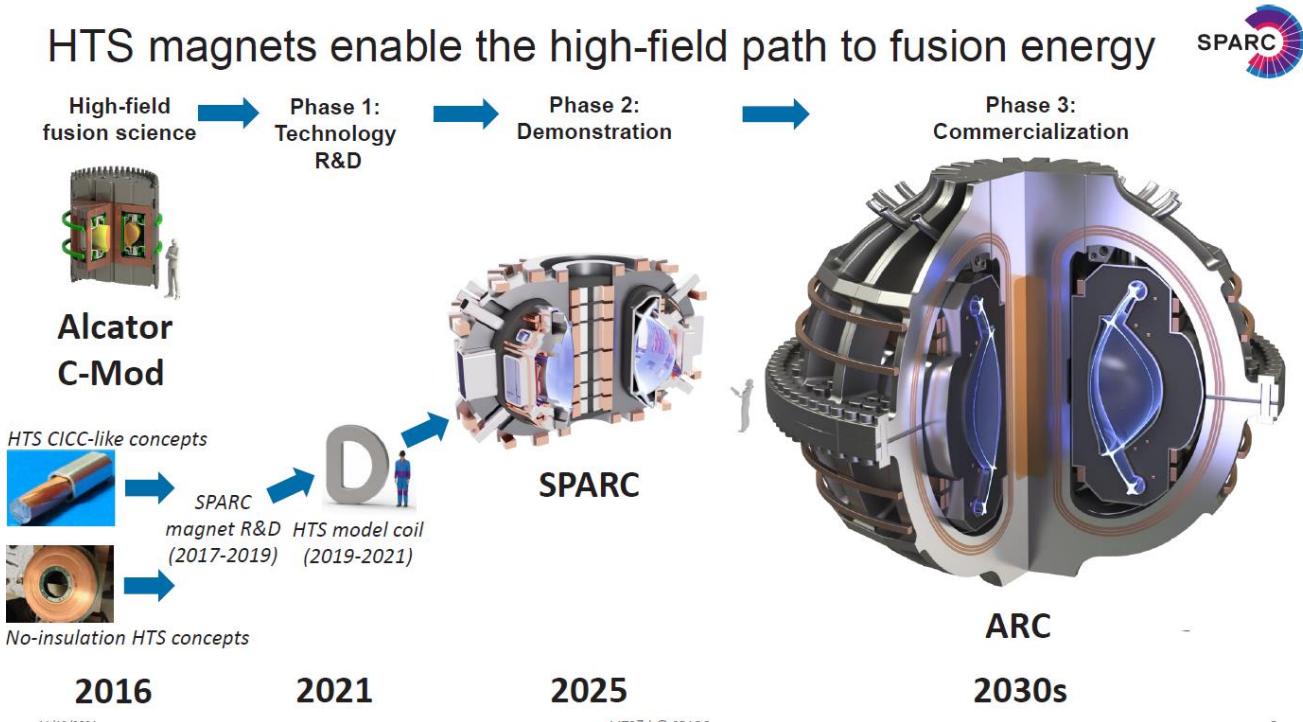
# LES AIMANTS D'ITER, UNE FABRICATION ET DES DÉFIS HORS NORMES



Mais trop longs à détailler dans cette présentation 😞

# LES AIMANTS HTS ET LA FUSION

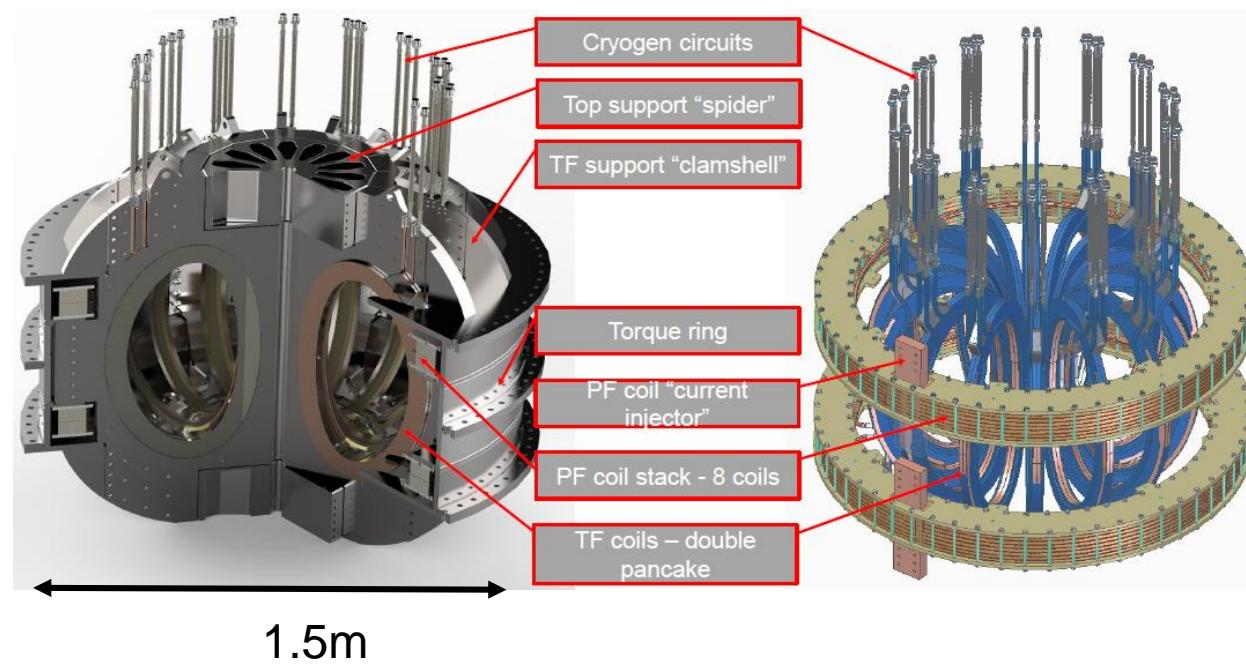
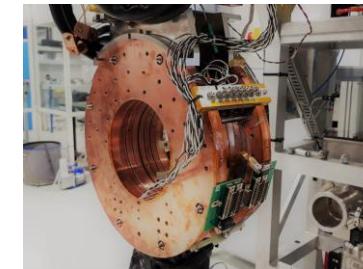
## Le projet SPARC (MIT / Commonwealth Fusion Systems - USA)



- Un premier démonstrateur HTS (ReBCO) a atteint 20T à 20K!
- 267 km de conducteur, soit 10% de la production mondiale

## Tokamak Energy (Grande-Bretagne)

R&D et petits prototypes en cours depuis 2018



Premier prototype attendu vers 2030

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



- LA PHYSIQUE DES PARTICULES
- LA FUSION
- **LES AIMANTS IRM/RMN**

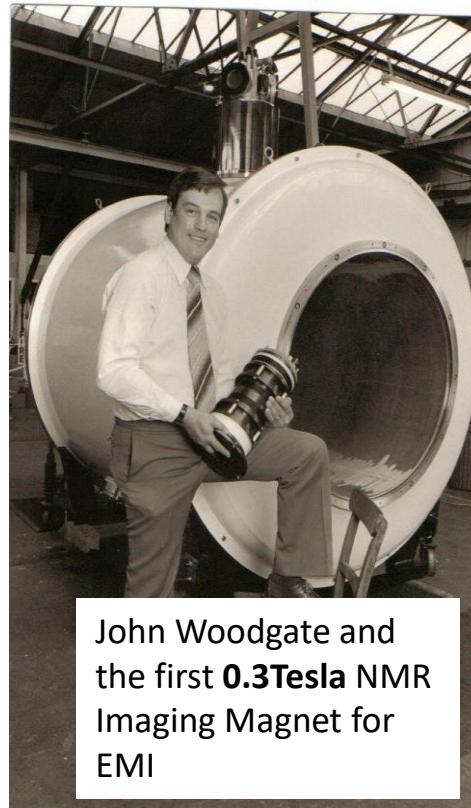
# EARLY NMR MAGNETS 1977 - 1981



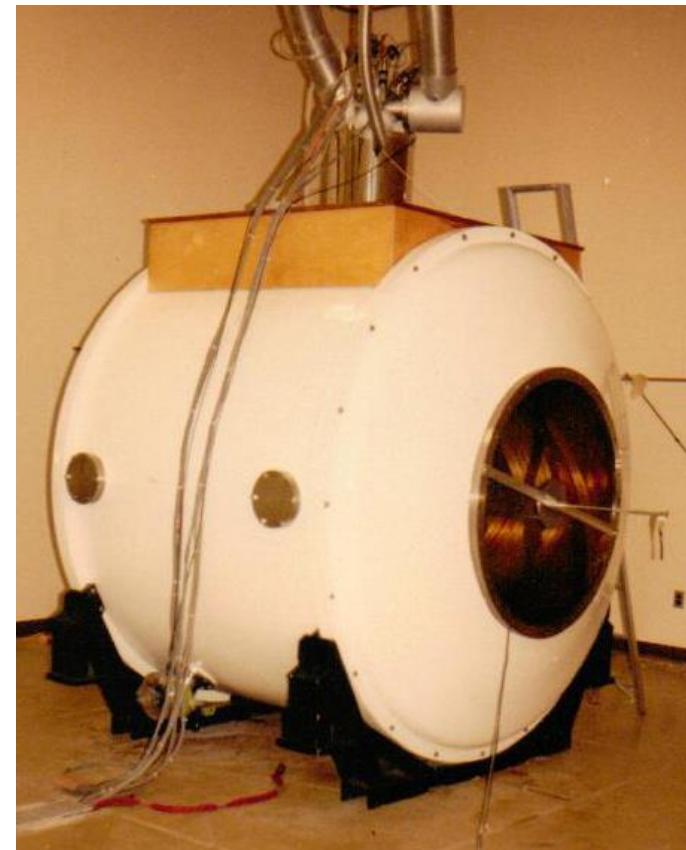
Aberdeen **0.03T** resistive  
magnet - 1977



**0.15T** Resistive  
magnet - 1980



John Woodgate and  
the first **0.3Tesla** NMR  
Imaging Magnet for  
EMI



First **1.5T** magnet (STAR)

Courtesy G. Gilgrass

# 40 ANS PLUS TARD...



- De très nombreux systèmes IRM commerciaux 3T (corps entier)



*Philips Ingenia  
Edition 3.0T X*



*Siemens Skyra*



*GE Discovery 750w*

- Plusieurs systèmes commerciaux 7T (corps entier)



*GE experience, SIGNA 7T*



*Philips Achieva, 7T*



*Siemens, Tera 7T*

- Quelques systèmes commerciaux très haut champ



*Bruker  
9.4T / 200mm  
15.2T / 110mm*

# ET DES DESIGNS DE PLUS EN PLUS INNOVANTS!

**Cylindrical magnets: >99% of superconducting scanners**



**Mobile MRI**



**Systèmes “ouverts”**



*1 T  
Panorama (Philips)*



*0.5 T  
OpenSky MRI (ASG)*

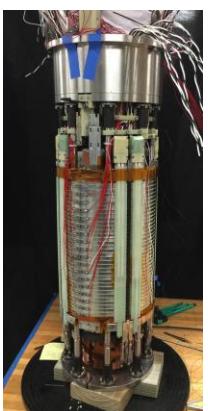


*Extremity scanner  
GE Optima 430s*

# LES MATERIAUX HTS POUR LES SOLENOÏDES À TRÈS HAUT CHAMP

De très nombreux progrès au cours des derniers années

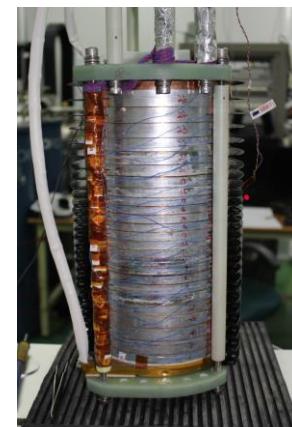
Des petits démonstrateurs...



**32T**  
17T HTS+  
15T LTS  
ID 34mm



**45,5T**  
14,5T HTS+  
31T résistif  
ID 14mm



**26,4T**  
(HTS only)  
ID 35mm



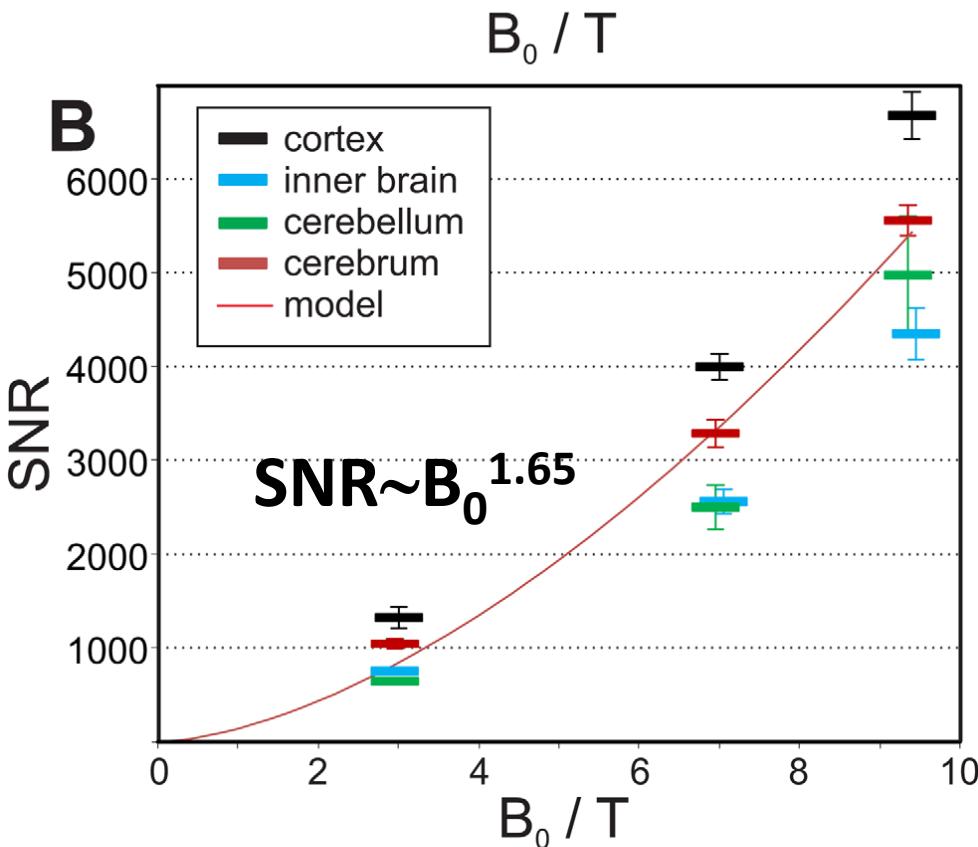
**32,5T: 14,5T HTS+ 18T résistif**  
ID 38mm

Aux aimants commerciaux!



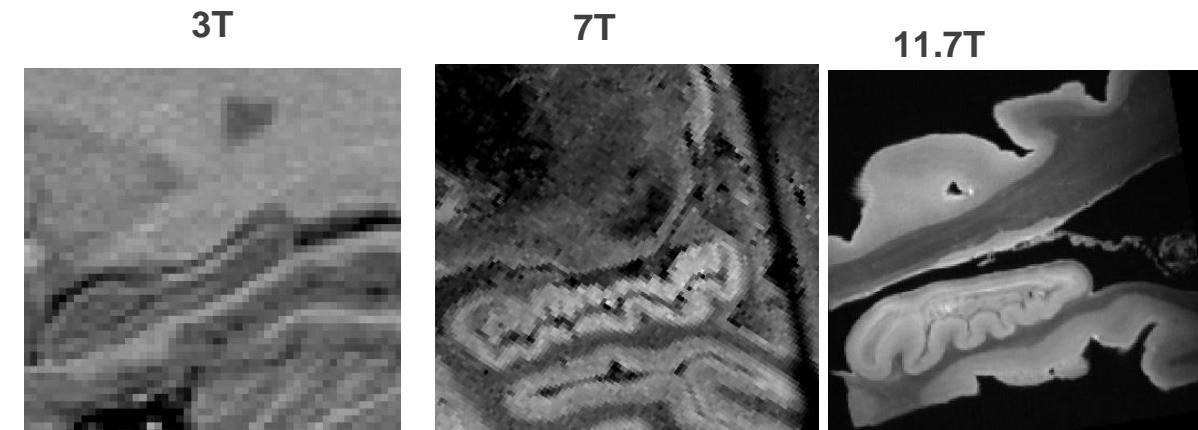
**Bruker ASCEND 1.2 GHz 28.2T**  
(LTS/HTS @ 1,9K)  
54 mm bore  
Strongest commercial NMR

# CHAMP MAGNETIQUE ET RESOLUTION IRM/RMN



Pohmann et al.  
Magn Reson Med 2016;75:801–809

Exemple d'une image d'hippocampe (rat)  
Crédit Neurospin/CEA



Résolution  
de 1 à 2 mm

Résolution  
de 0.1 à 0.2 mm

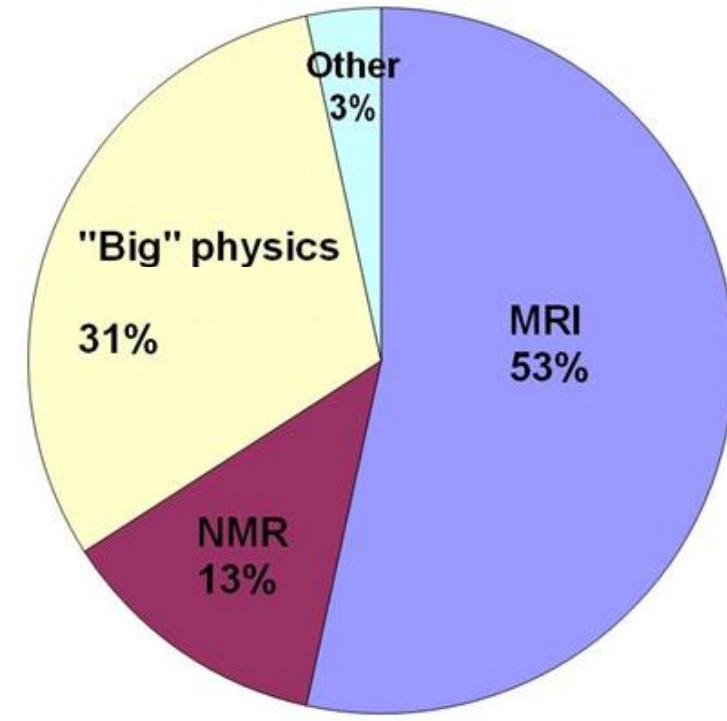
**Meilleure résolution  
spatiale et temporelle**

# LES AIMANTS POUR IRM CORPS ENTIER

Revenons finalement au NbTi...

Il est le matériau supraconducteur:

- le plus utilisé dans le monde (très gros marché IRM/RMN)
- le mieux maîtrisé, le plus simple à mettre en œuvre!



**IRM/MRN**  
**70% des conducteurs NbTi**

# IRM CORPS ENTIER 10.5T

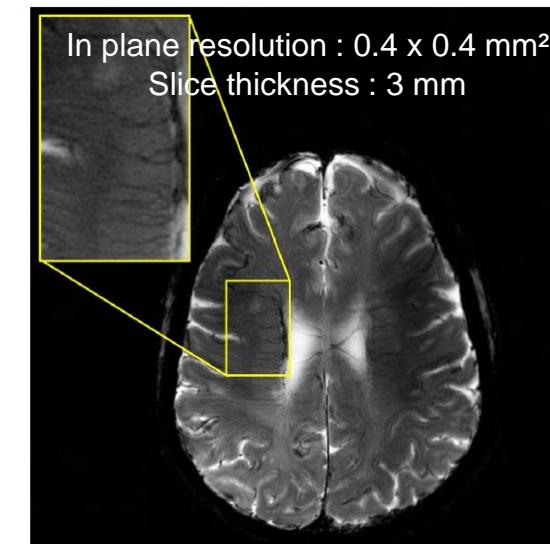
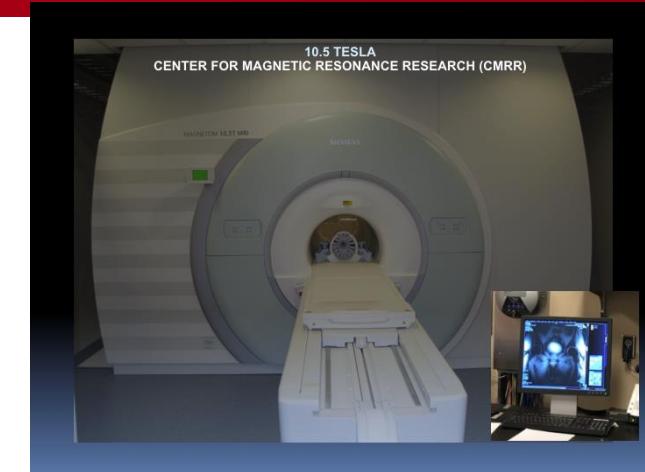
## PREMIERE IMAGE SUR UN CERVEAU HUMAIN EN 2020

Center for Magnetic Resonance Research,  
Department of Radiology, Minneapolis



Mass	110 tons
<b>Central bore diameter</b>	<b>88 cm</b>
Length	4.1m
Width	3.2m
Conductor	NbTi (433km)
Operating temperature	3K

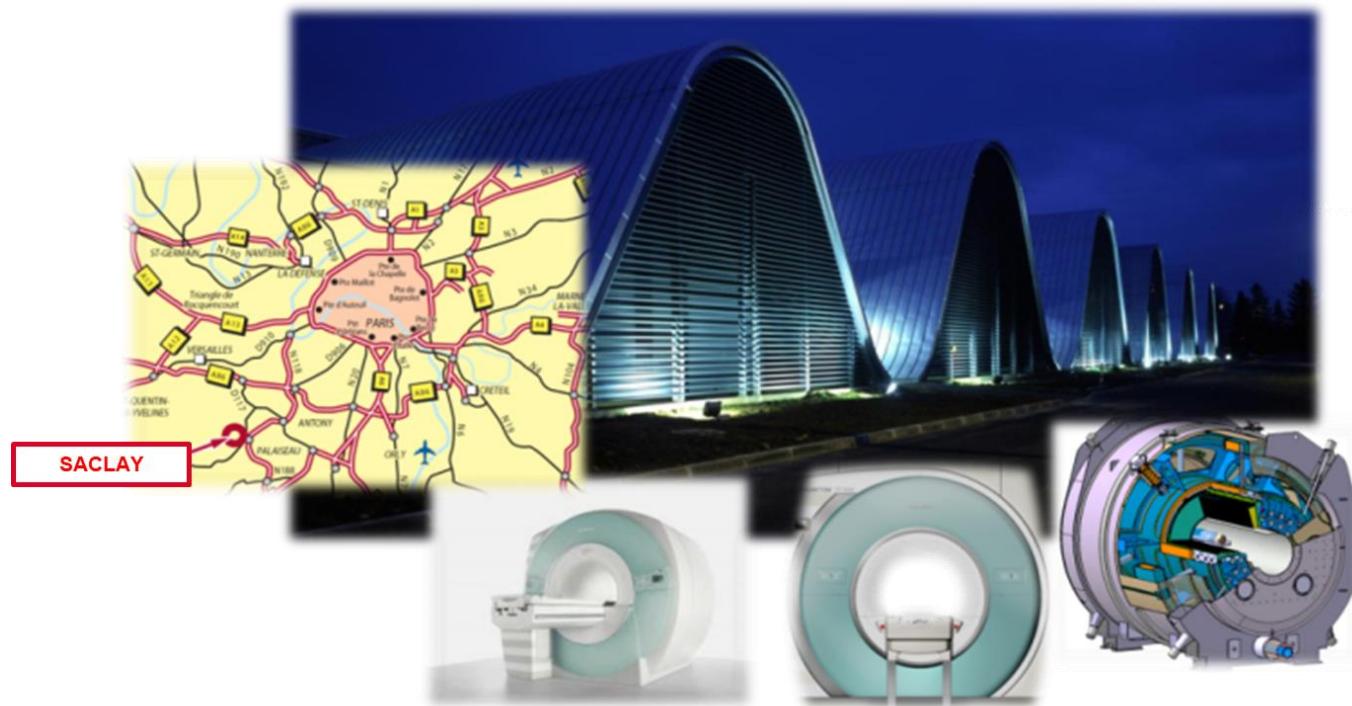
**Passive shielding**



*Magnetic Resonance in Medicine,  
Volume 84, Issue 1, July 2020*

# LE PROJET ISEULT

**Collaboration franco-allemande pour développer l'imagerie moléculaire à ultra-hauts champs magnétiques**



**Neurospin  
CEA Saclay, France**



Les partenaires: CEA(F), GE (F), Guerbet (F), Siemens Healthcare(G), Friburg University(G), Bruker Biospin (G)

# UN AIMANT D'IRM CORPS ENTIER @ 11.7T UNE IDÉE DE 2001...

**Une première spécification très succincte  
mais très ambitieuse!**

- B0 / ouverture            11.7T / 900mm
- Stabilité temporelle    0.05 ppm/h
- Homogénéité            < 0.1 ppm sur Ø10 cm
- Champ de fuite 10 G à l'intérieur de l'arche



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE  
DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE  
DÉPARTEMENT D'ASTROPHYSIQUE DE PHYSIQUE DES PARTICULES  
DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DE L'INSTRUMENTATION ASSOCIÉE

SERVICE ACCELERATEURS ET CYCLOMAGNETISMES  
GROUPE D'ÉTUDE 'AIMANT 500 MHZ CORPS ENTIER'  
G. AUBERT, B. HERVIEU, F.P. JUSTER, C. MEURIS, A. PAYN,  
C. PES, TH. SCHILD, M. SEGRETI

dapnia  
cea  
saclay

Étude d'un Aimant 500 MHz Corps Entier  
Pour le Projet NeuroSpin

Auteurs

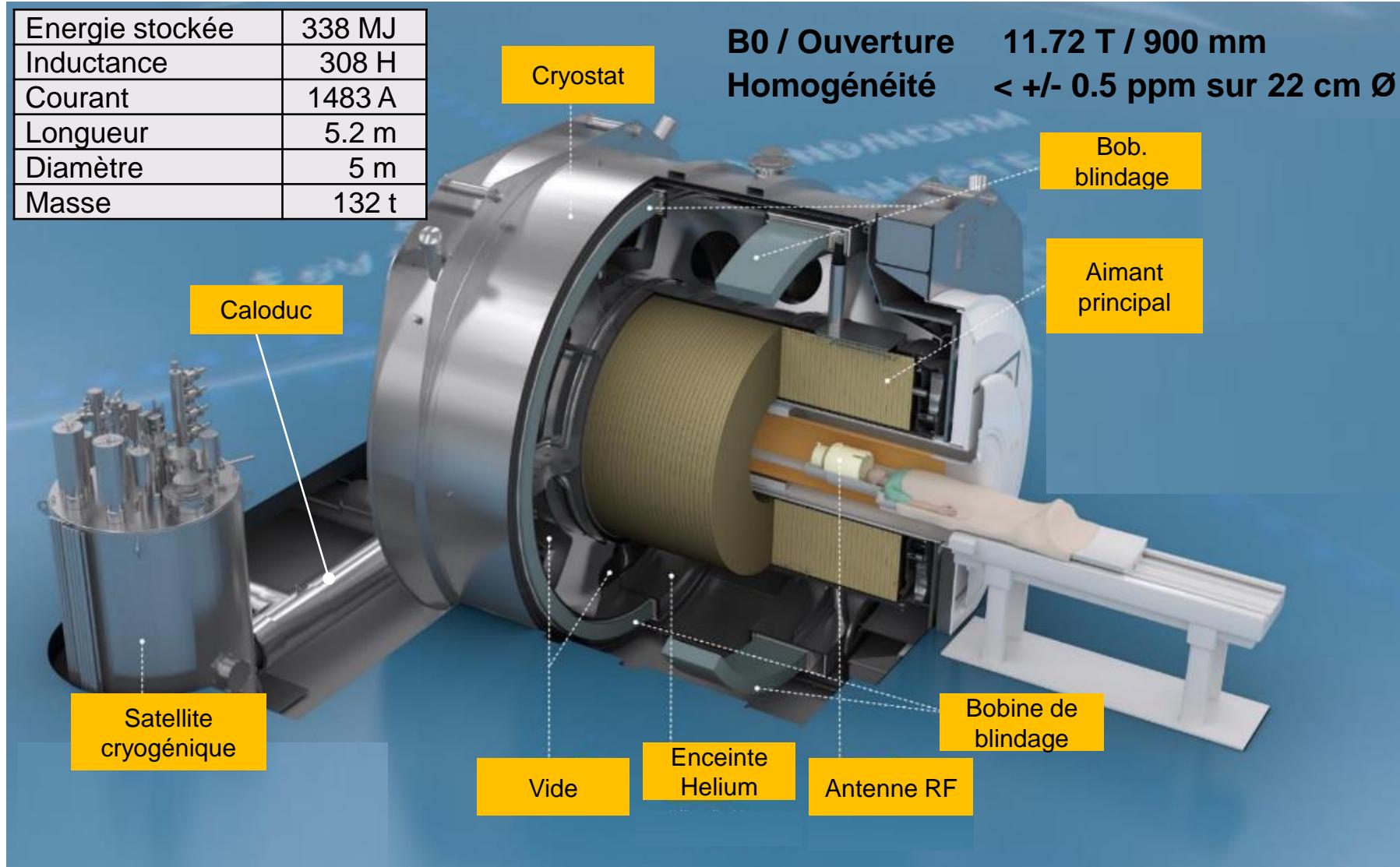
G. Aubert, B. Hervieu, F.P. Juster, A. Payn, C. Pes, Th. Schild, M. Segreti

Document strictement confidentiel - propriété du CEA/DAPNIA - Connaissance antérieure du CEA/DAPNIA au titre du marché de définition CEA/Bruker/Siemens référencé A-CNCIS/04-011-A

ET UN PREMIER AVANT-  
PROJET EN JUILLET 2004

# L'AIMANT DE L'IRM ISEULT

Energie stockée	338 MJ
Inductance	308 H
Courant	1483 A
Longueur	5.2 m
Diamètre	5 m
Masse	132 t



# UN DÉFI TECHNOLOGIQUE !!!

**Des technologies déjà utilisées pour d'autres aimants supraconducteurs (fusion, aimants de détecteur...), mais jamais pour un aimant d'IRM de cette taille**

**Aimant corps entier, à blindage actif, opérant à 11.72T/499MHz :**

- **170 « double-galettes »** dans la bobine principale
- **2 bobines de blindage** pour limiter l'extension du champ magnétique
- Conducteur NbTi @ **1.8K (He II superfluide)**
- Aimant fonctionnant directement sur **alimentation externe**

# 2006 – 2009 : R&D ET AIMANTS PROTOTYPES



**Conducteurs, techniques de bobinage**  
**Etudes magnétiques, mécaniques, cryogéniques, thermohydrauliques**

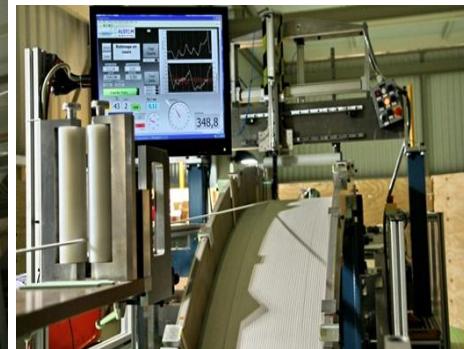
# 2010 – 2017 : FABRICATION DE L'AIMANT À BELFORT



*Bobinage des double-galettes (DG)*



*Fabrication des bobines de blindage*



*Intégration bob. principale / bob. de blindage*



*Empilage des 170 DG*



*Pose de la super-isolation*



*Fermeture enceinte à vide*

# OCT. 2017 - OCT. 2018 : CONNEXION A L'INSTALLATION



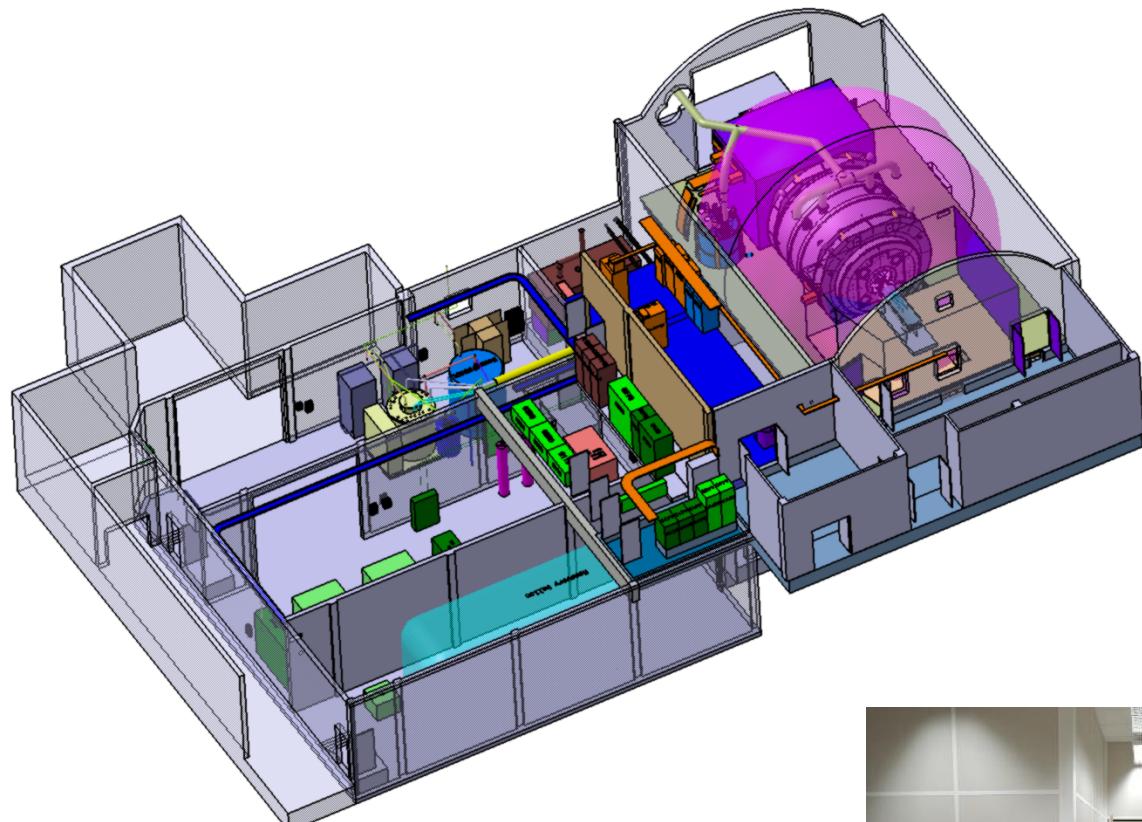
**Alimentations**



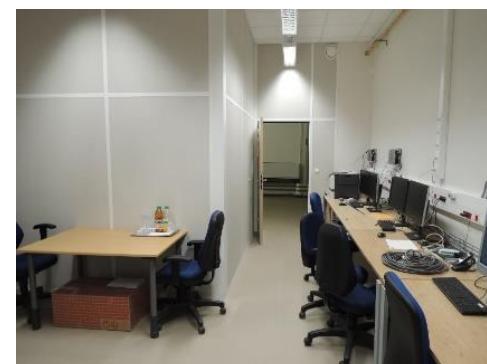
**Boîte froide**



**Batteries 48V**



**Amenées de courant**



**Salle de contrôle**



**Circuit vide**



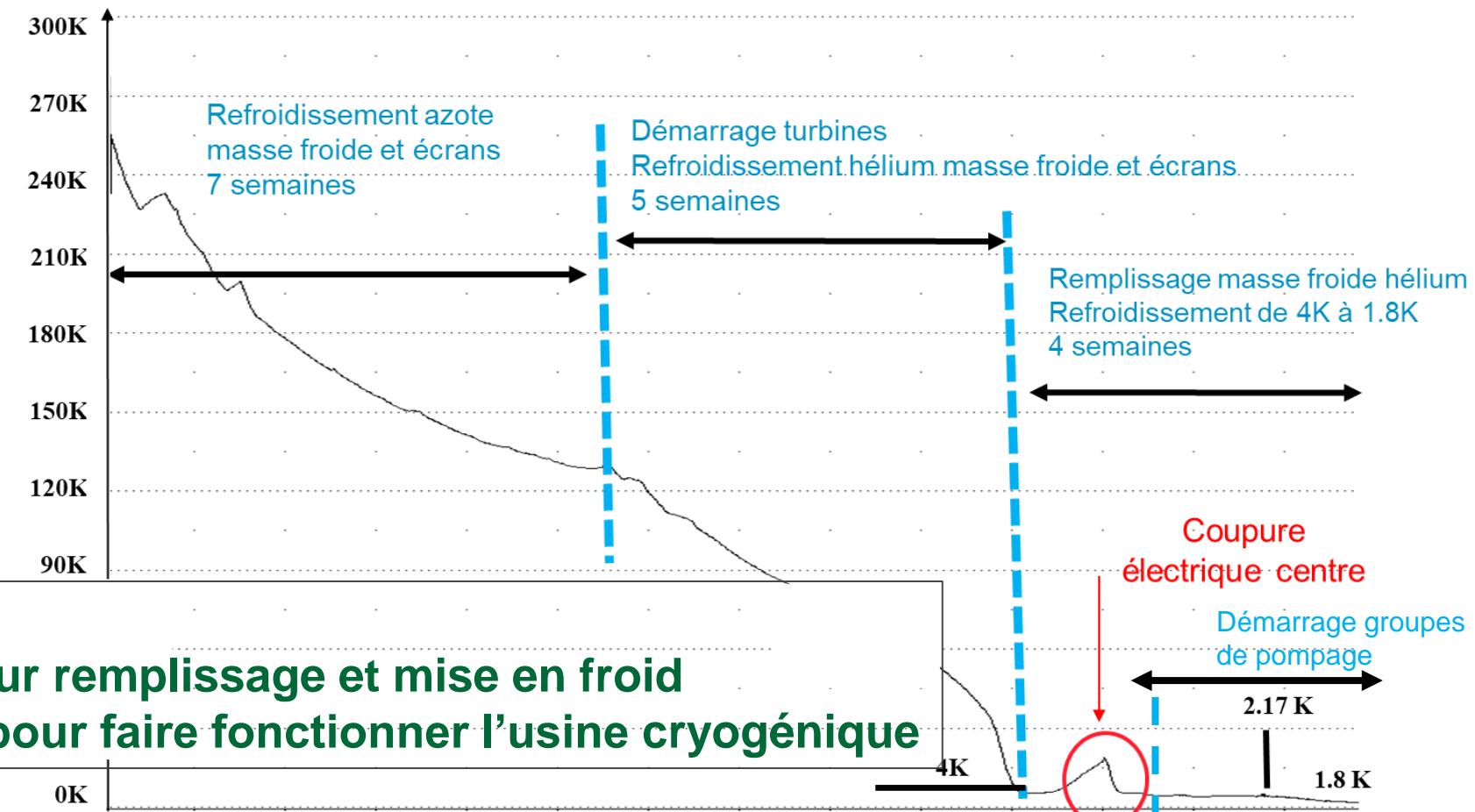
**MCS/MSS/DAQ**



**Résistance de décharge**

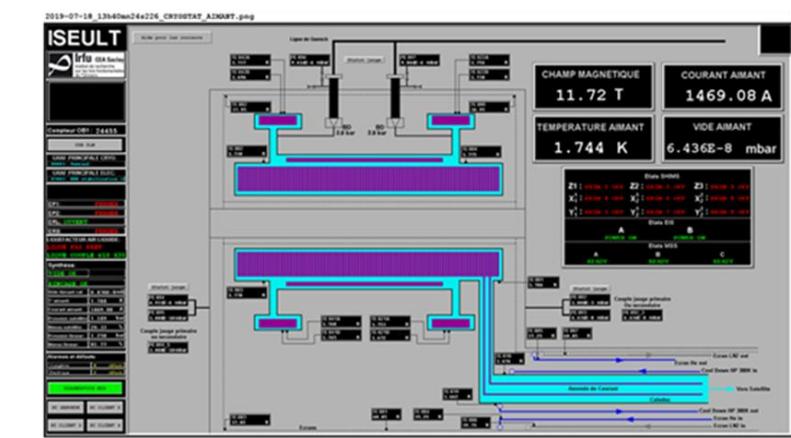
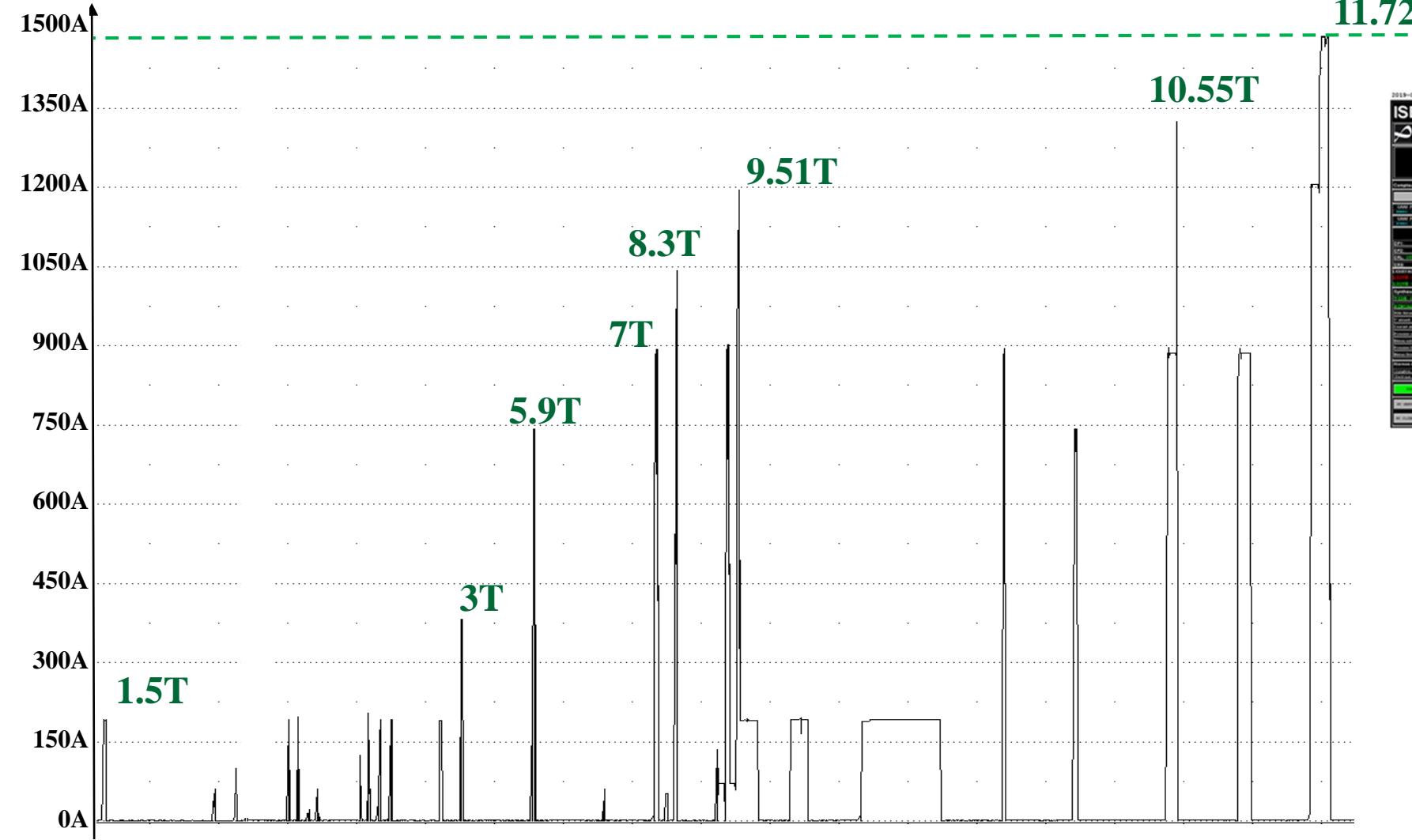
## NOV. 2018 – MARS 2019 : MISE EN FROID

- Lancée le 19 novembre 2018 – arrivée @ 1,8K le 7 mars 2019
- A refroidir: **masse froide (105 tonnes / 1.8K) + écrans (3.4 tonnes / 55K)**
- Vitesse de descente limitée par les gradients de température et l'autonomie sur l'azote (30 000 L / 2 jours)



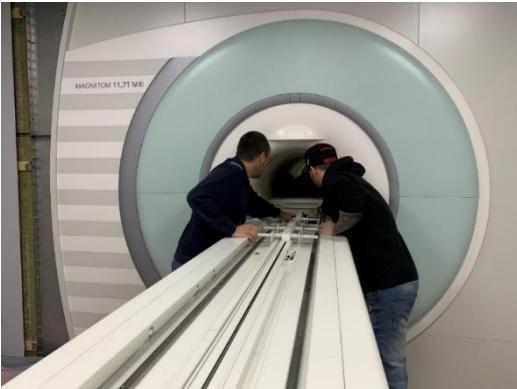
# MONTEES EN COURANT PAR PALIERS

Courant



18 Juillet 2019

# INTEGRATION ET MISE EN SERVICE DES EQUIPEMENTS D'IMAGERIE



*Gradient coil insertion*

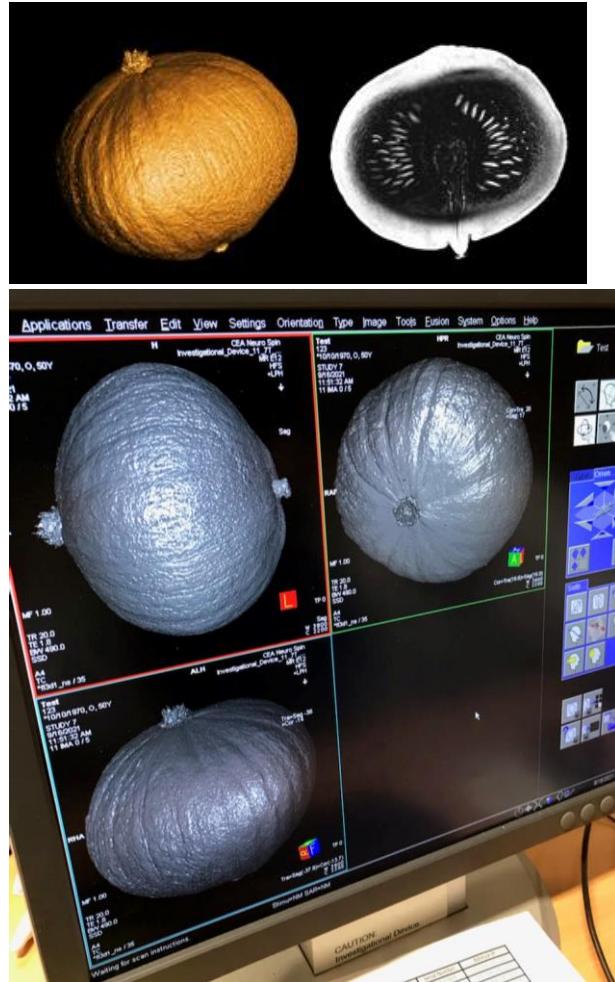
- Mise en service de la haute disponibilité (plus de 1300 tests de défaillance)



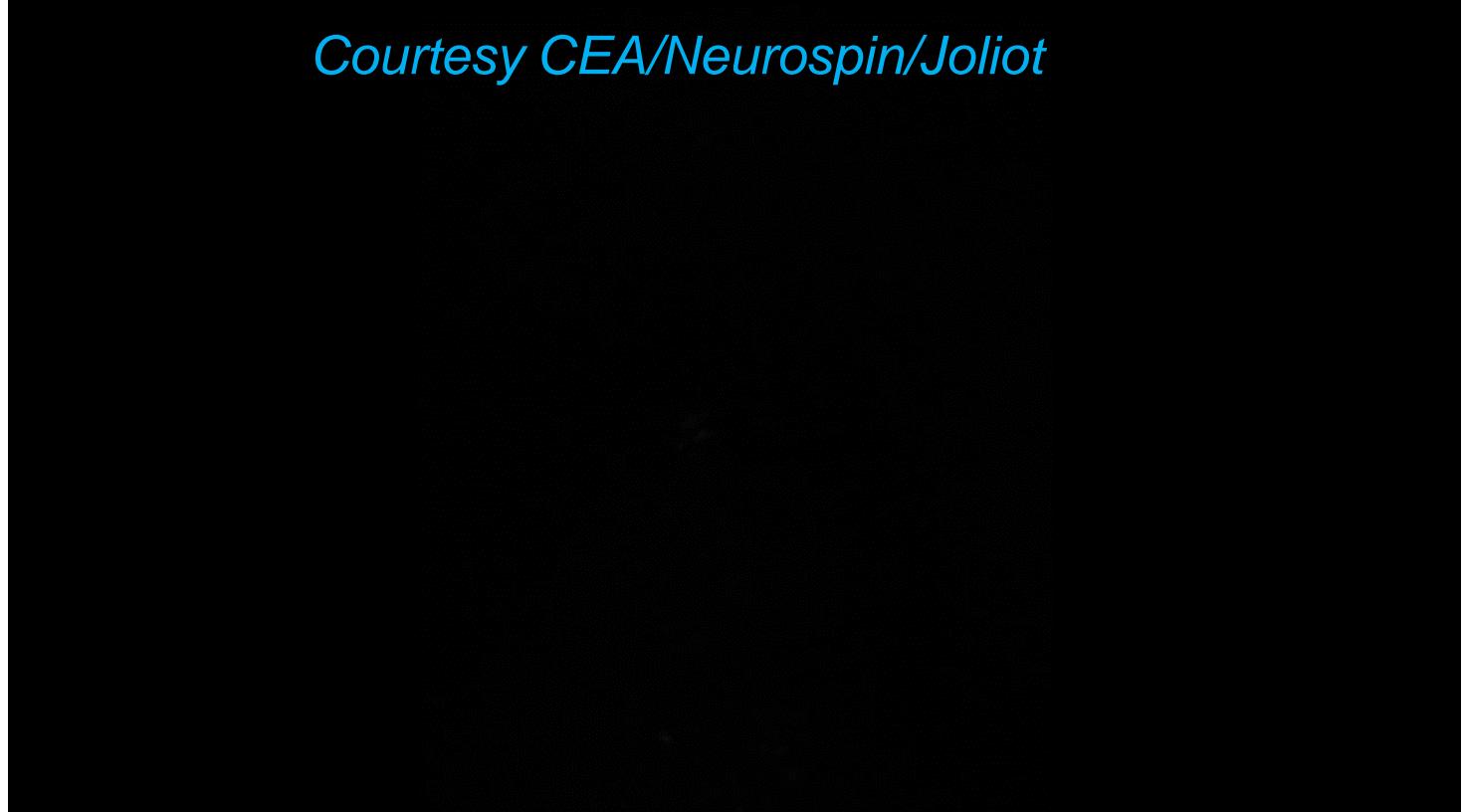
*Start-up of the imaging equipment*

- Réglage de l'homogénéité spatiale et temporelle
- Tests d'interaction entre les différents composants (aimant, gradient, essais CEM...)
- Premières calibrations

# OCTOBRE 2021: LES TOUTES PREMIERES IMAGES!!!



Courtesy CEA/Neurospin/Joliot



5 hours of acquisition  
**0.4 mm of resolution**

# EVOLUTION DU PARC IRM CORPS-ENTIER (WB)

## 2001-2022



**2001**

- 3T : ≈ 100 systems
- 2 systems 7T WB
- 1 system 8T WB



11.7T Bethesda



10.5T Minneapolis



- 📍 11.7T
- ✚ 10.5T
- 📍 9.4
- 📍 8T

**11.7T Saclay**



**2022**

- 7T : >80 systems installed (3 in France) – 6 to 10 new units per year
- 1 system 8T WB: Ohio State Univ (80cm)
- 6 systems 9.4T WB: Minneapolis (65cm), Chicago (80cm), Tübingen (82cm), Jülich (90cm), Maastricht (82cm) Beijing (83cm)
- 1 system 10.5T WB: Minneapolis – 88cm – passive shielding / images on human brain since 2020
- 3 projets WB 11.7T:
  - Iseult – 90cm – active shielding / first images / final calibration in progress
  - NIH (Bethesda): 68cm – passive shielding / ready for cooldown on site
  - NRI (Seoul): 70cm – passive shielding / delivered in may 2019

Emerging projets 14T and more: Heidelberg, USA (Boston, Stanford), China (Beijing, Shenzhen)

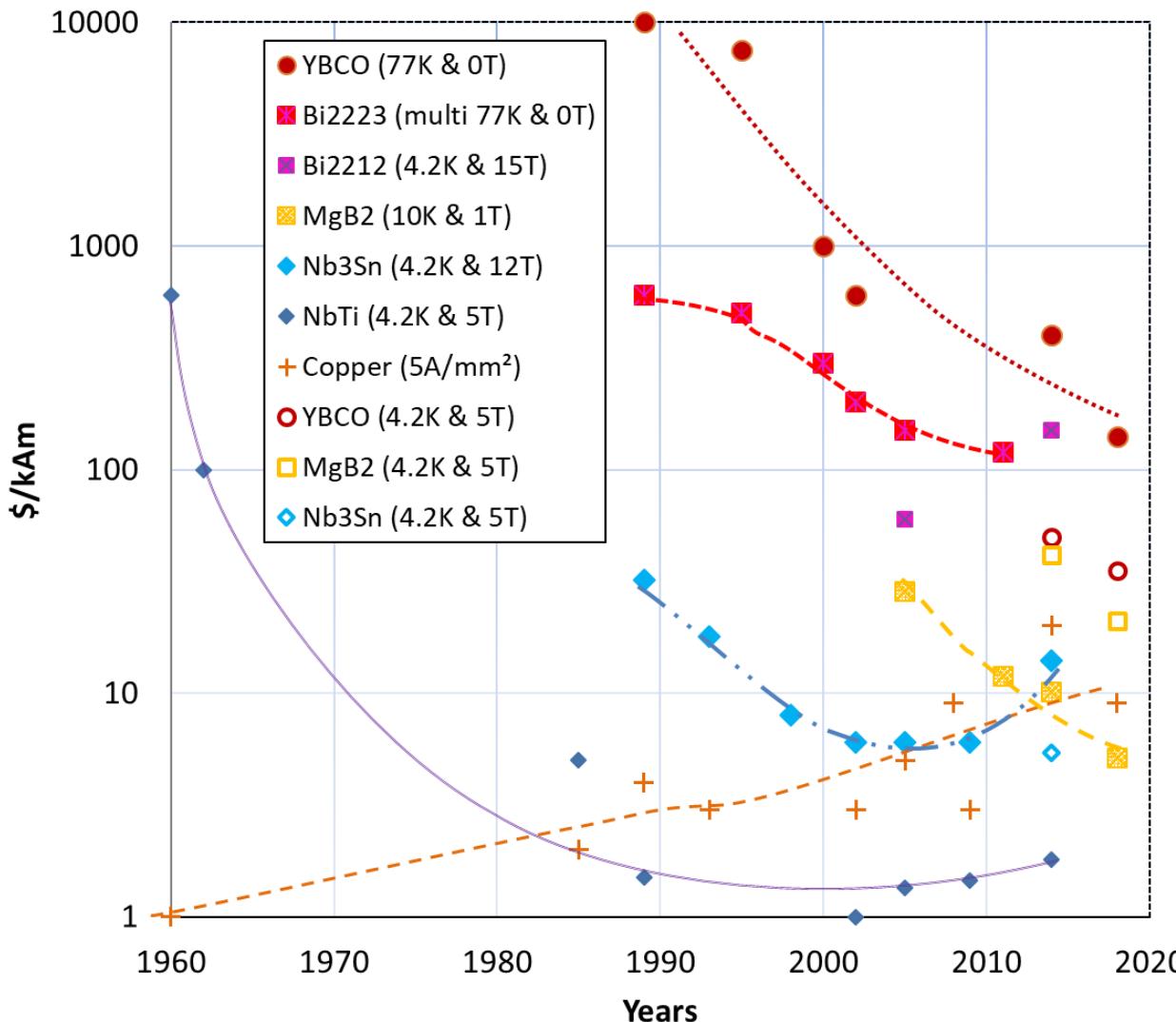


11.7T Séoul

# SI ON PARLAIT (UN PEU) D'ARGENT...



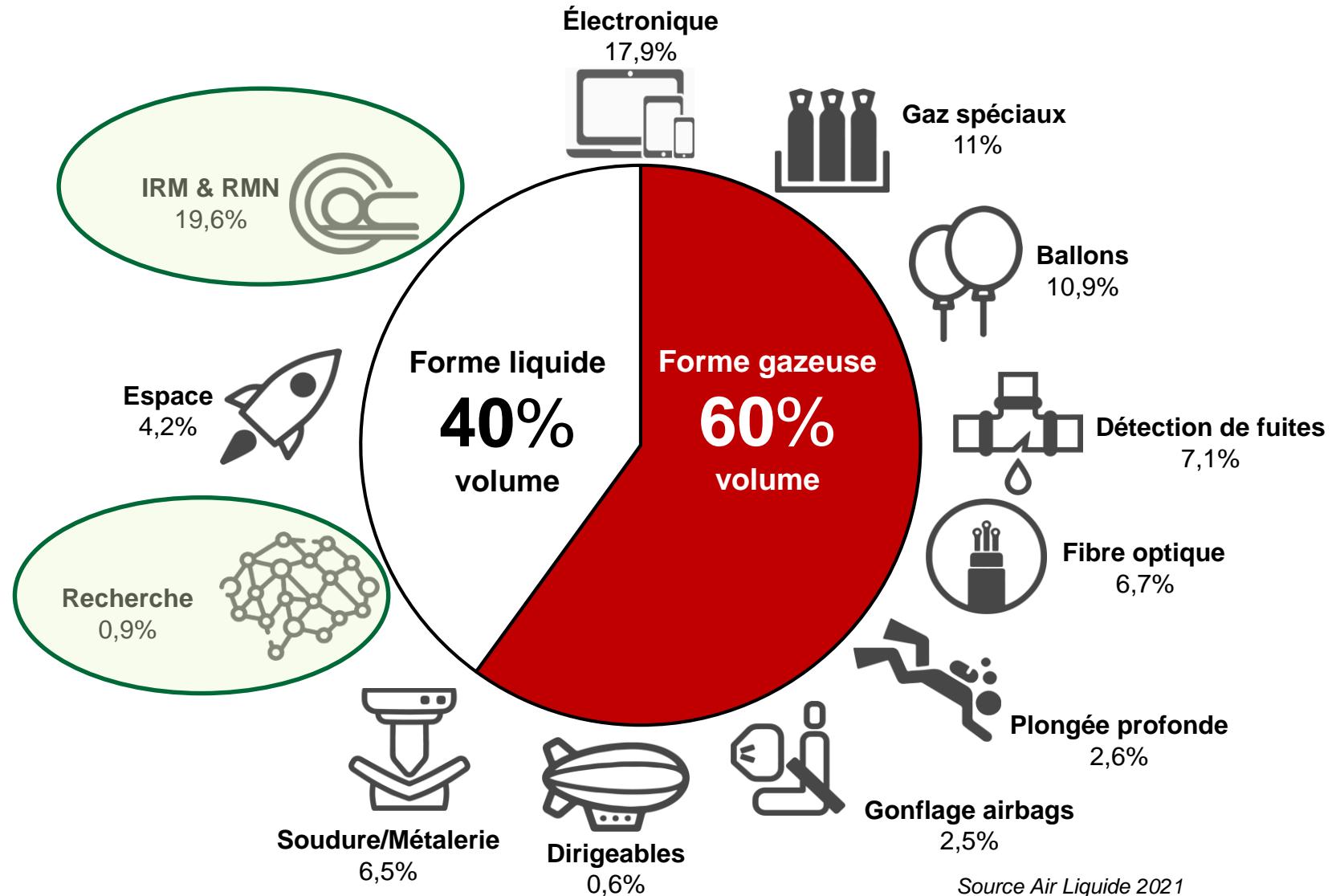
# DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS DONT LE COÛT BAISSE



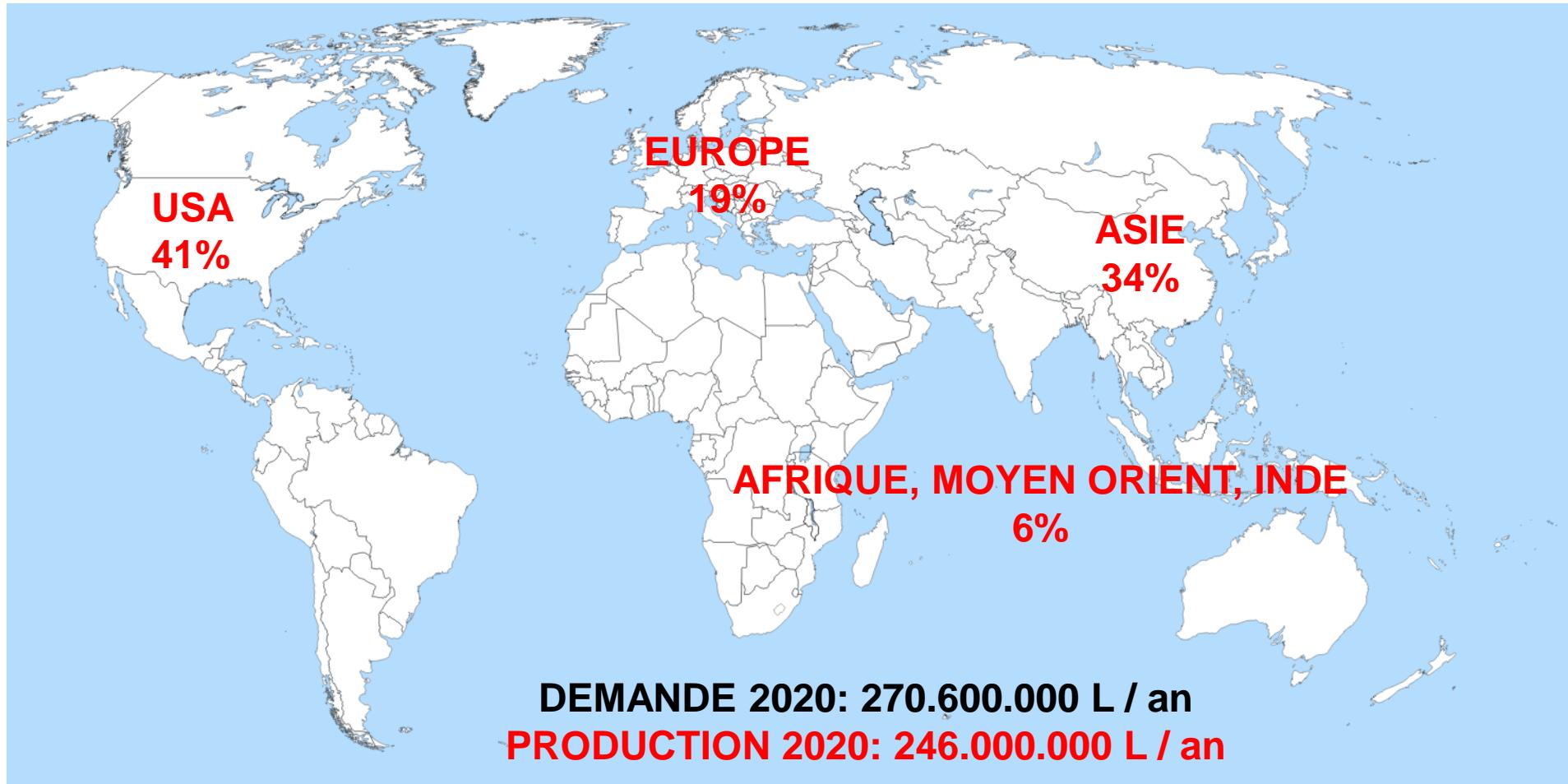
- Les gains en coût / performances ont toujours été liés aux grands projets (physique des particules, fusion) ou au développement du marché des aimants IRM/RMN
- On atteint maintenant un **plateau pour le NbTi (\$1-2/kA.m)** et le **Nb<sub>3</sub>Sn (\$5-10/kA.m)**; impact du coût des matières premières
- Coût des matériaux HTS (ReBCO et BSCCO) encore très élevé (\$50-100/kA.m); mais, gain attendu dans les prochaines années

Courtesy C. Berriaud

# INCONTOURNABLE HELIUM!



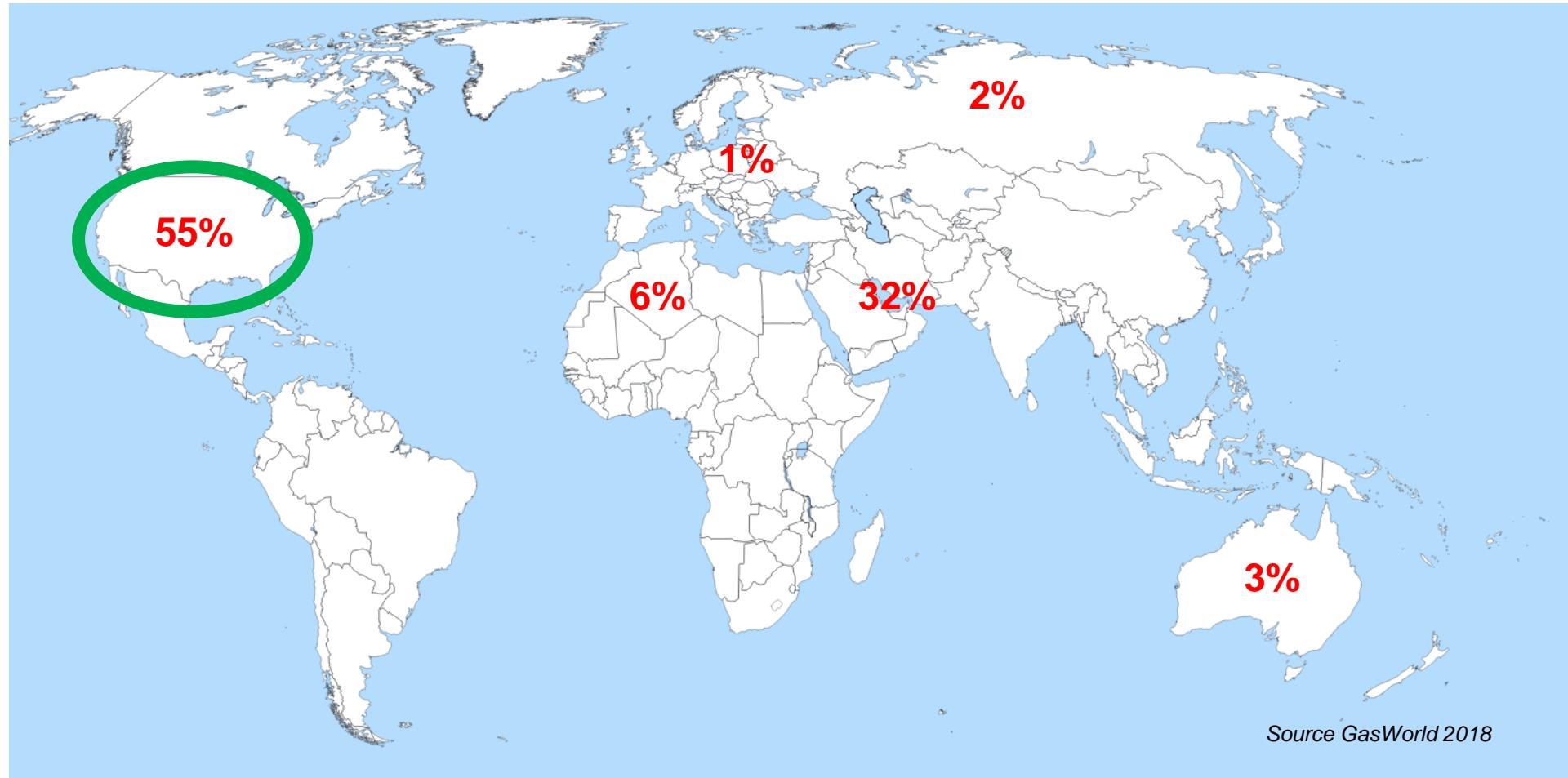
# MAIS UNE DEMANDE CROISSANTE, ET UNE PRODUCTION INSUFFISANTE



Courtesy  
G. Authelet

Source Air Liquide 2021, Edison Investment Research

# PRODUCTION JUSQUE 2017 / 2018

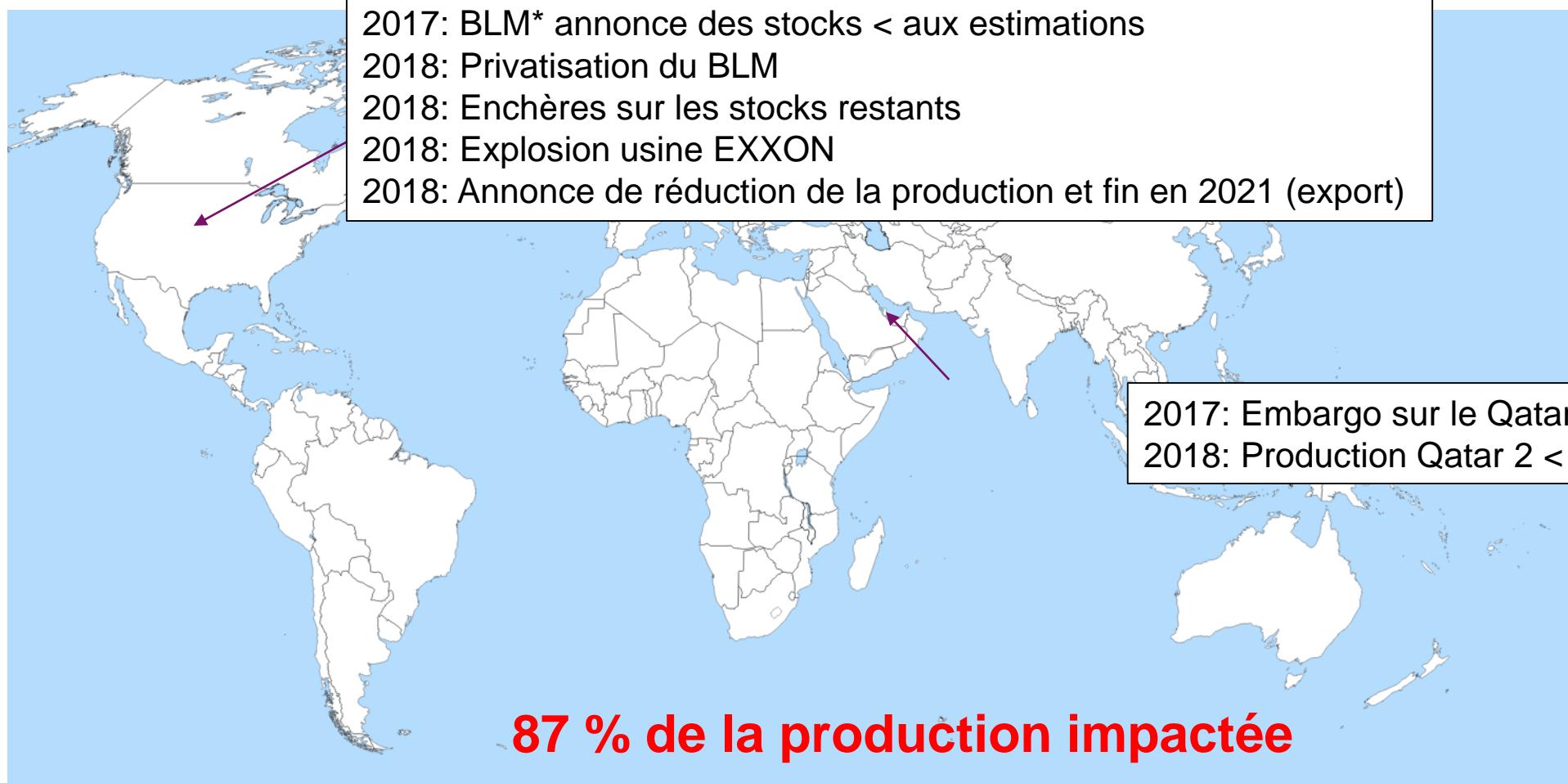


Courtesy  
G. Authelet

- Historiquement les USA produisent plus de la moitié de l'hélium du marché.

# SUPRACONDUCTIVITE ET GEOPOLITIQUE

## Une période 2017 – 2018 très compliquée

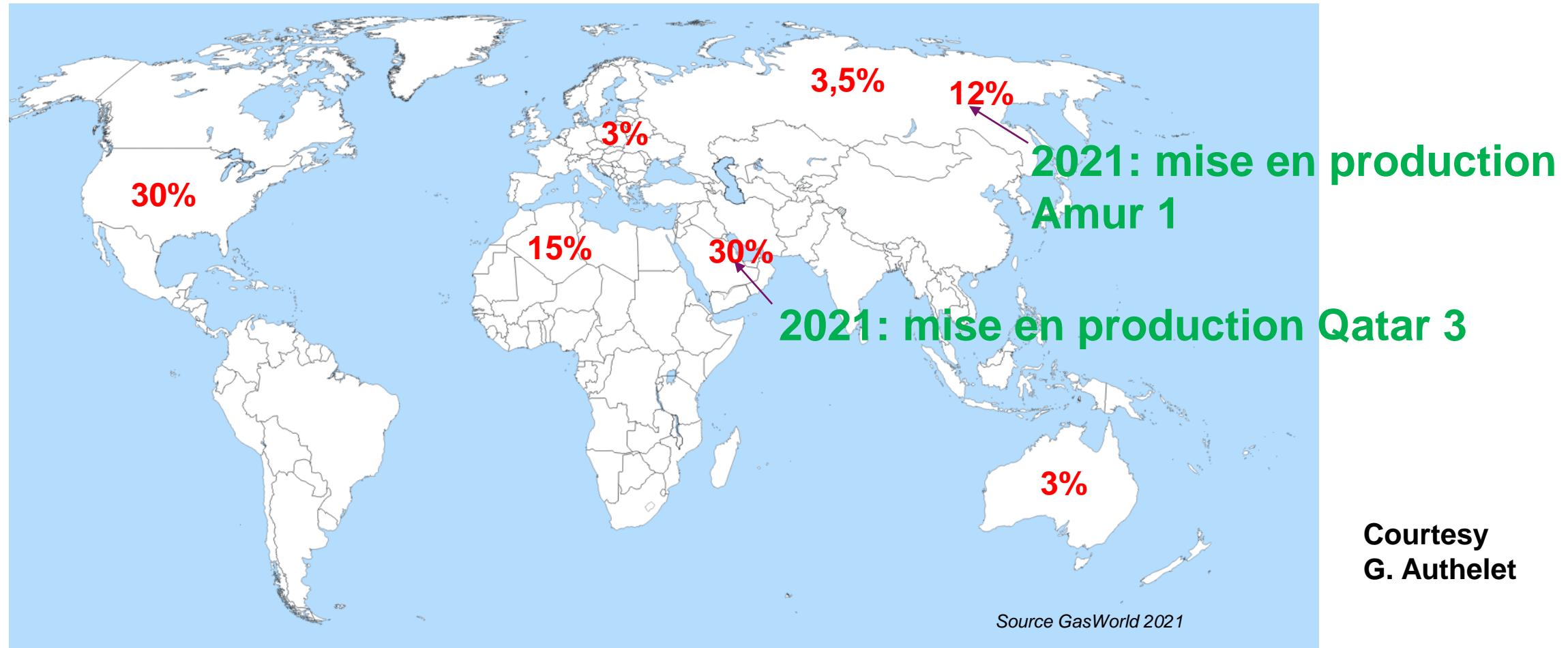


Courtesy  
G. Authelet

\*BLM = Bureau of Land Management

Sources Air Liquide, Air Product

# PRODUCTION FIN 2021



Courtesy  
G. Authelet

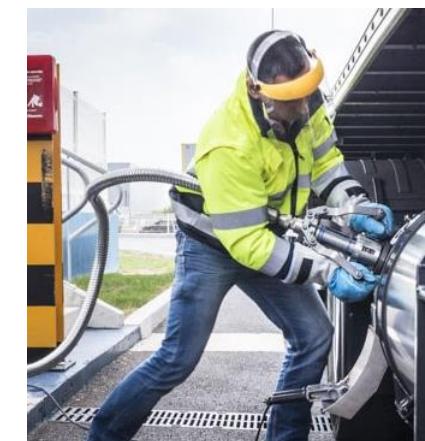
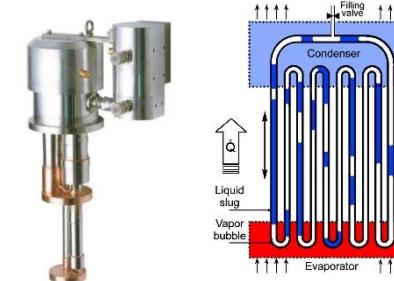
C'est un peu mieux, avec deux nouvelles usines en service

Mais: Augmentation estimée de 3% de la demande annuelle mondiale

Les USA vont devenir importateurs d'hélium.

# ET SI FINALEMENT LA CRYOGÉNIE, C'ÉTAIT L'AVENIR?

- Fortes tensions sur le marché de l'hélium
- Emergence des HTS: fonctionnement à des températures plus élevées pour les aimants produisant quelques teslas
- Réserver l'hélium aux aimants très hauts champs ?
  - Développer des technologies plus innovantes, plus autonomes, moins énergivores (cryocoolers, PHP...)
  - Développer des aimants « secs », sans fluide cryogénique



Bref, se passer de la cryogénie, mais pas du cryogéniste!

# EN CONCLUSION

- Depuis sa découverte en 1911, **la supraconductivité est devenue incontournable et ses applications sont de plus en plus nombreuses**
- Certains secteurs sont fortement dépendants des **partenaires académiques** (physique des hautes énergies, fusion), d'autres sont essentiellement portés par des **acteurs industriels forts** (IRM, RMN)
- **Pour de nombreuses applications, le NbTi reste encore incontournable (coût, performances, facilité de mise en œuvre), on peut attendre 10T sur 1m de diamètre!**
- **La technologie Nb<sub>3</sub>Sn est plus mature, mais il faut poursuivre l'effort de R&D** (production en série d'aimants d'accélérateur)
- Il y a une **émergence remarquable des HTS**, mais là encore, il faudra **encore beaucoup de R&D pour avoir une technologie mature**; par ailleurs, leur **coût reste encore prohibitif** pour être qu'ils soient utilisés à très grande échelle.
- **L'essor du Nb<sub>3</sub>Sn et des HTS dépendra fortement des grands projets scientifiques (physique des particules, fusion)** pour résoudre les problèmes de mise en œuvre, avec des **conséquences positives pour l'ensemble des applications**.
- **Le refroidissement des aimants reste un enjeu majeur (avec ou sans hélium!)**



Et merci à Gilles Authelot, Christophe Berriaud, Luca Bottura, Maria Durante, Jean-Luc Duchateau, Philippe Fazilleau, Hélène Felice, Graham Gilgrass, Denis Le Bihan, Thibault Lécrevisse, Philippe Lebrun, Mike Parish, Etienne Rocheapault, Thierry Schild et Pierre Védrine pour leur avoir emprunté quelques transparents!