

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Les aimants supraconducteurs : applications et technologies

Lionel QUETTIER

Séminaire SFP – 13 janvier 2022



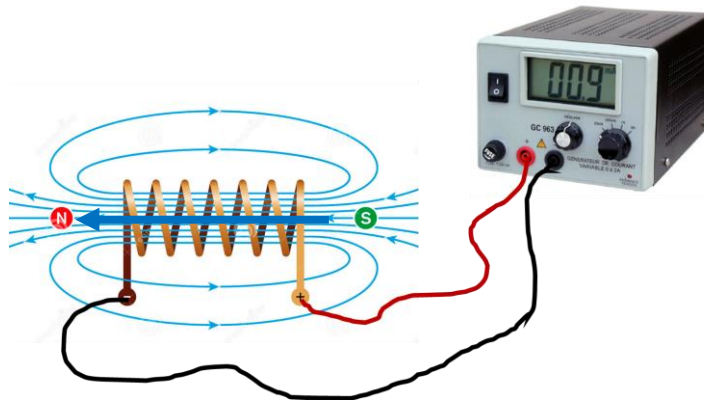
Le tout premier aimant



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



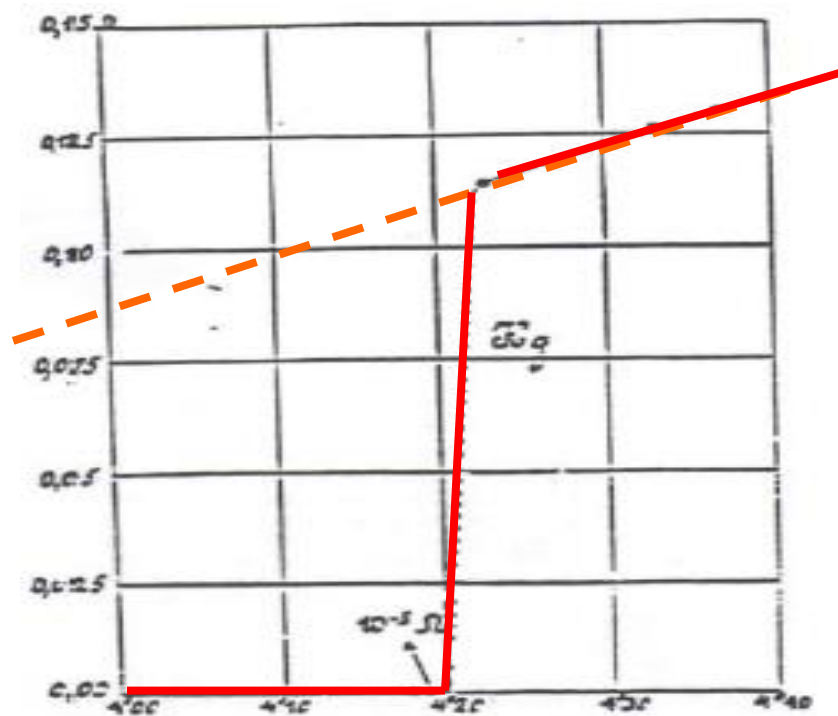
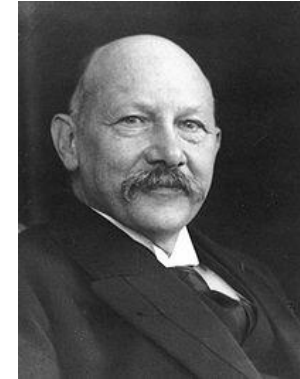
**Aimant permanent
(NdFeB, 0.5T)**



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



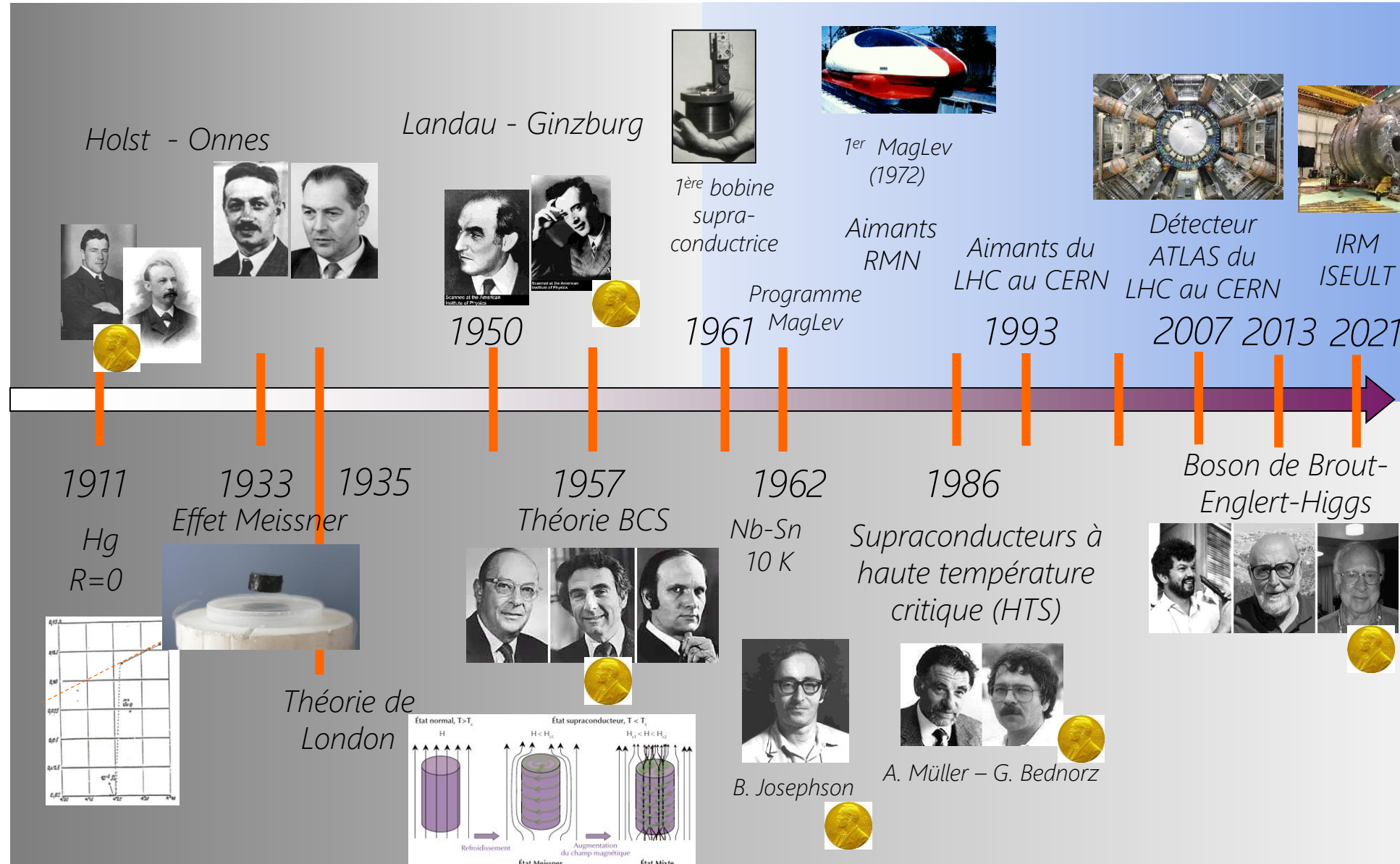
Gilles Holst, étudiant de Kamerlingh Onnes publie une courte note à l'académie royale des Pays-Bas le **8 Avril 1911** : "**Sous toute réserve, la résistivité du mercure disparaît en dessous de 4 K**".



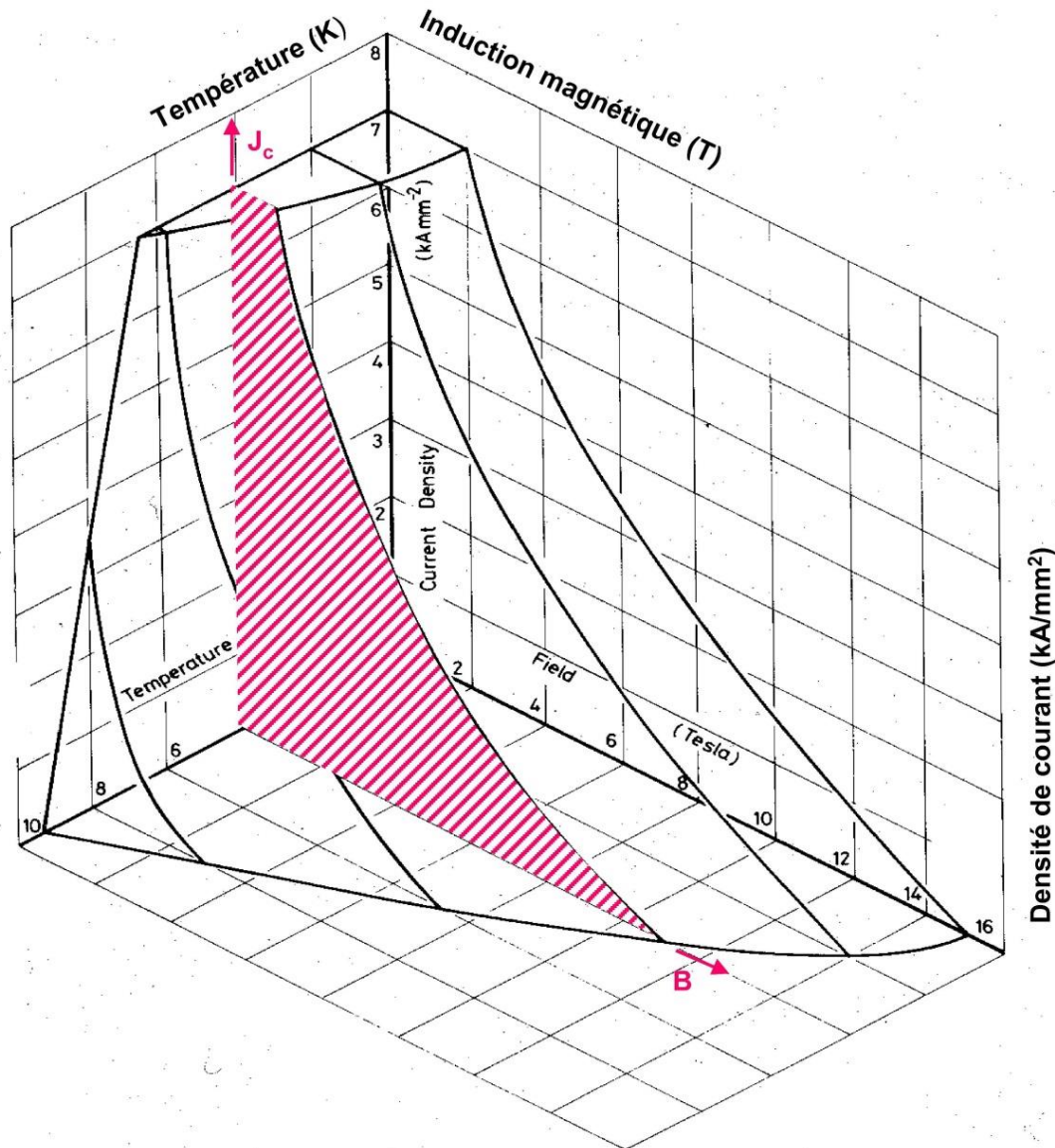
La loi d'Ohm n'est plus une contrainte!

- 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 SUPRACONDUCTIVITÉ... PLUSIEURS DÉCOUVERTES ET PLUSIEURS PRIX NOBEL!



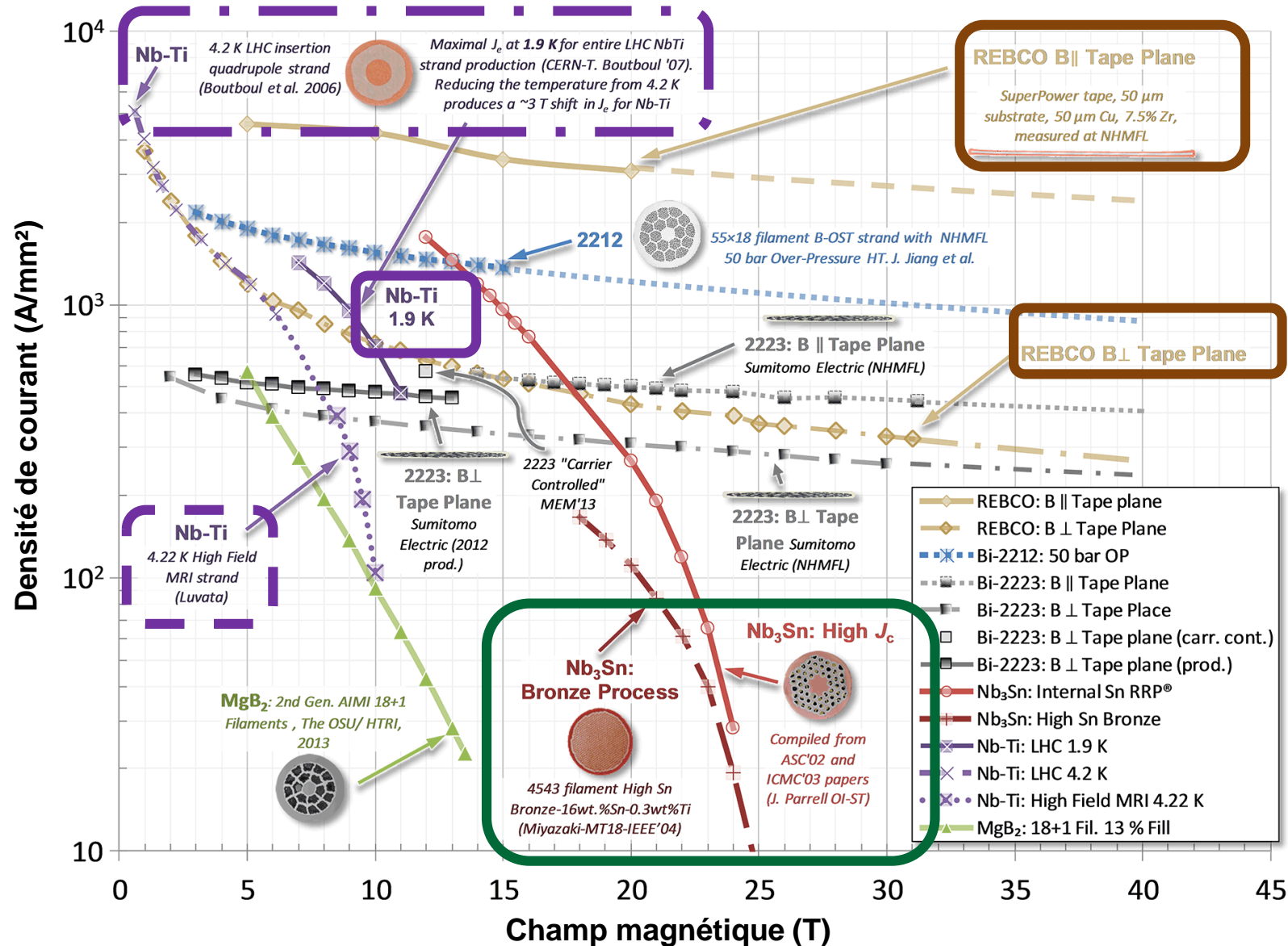
Courtoisie
Philippe
Fazilleau



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)

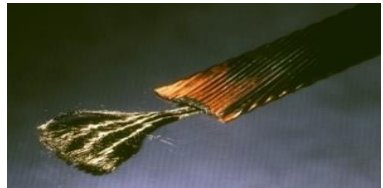
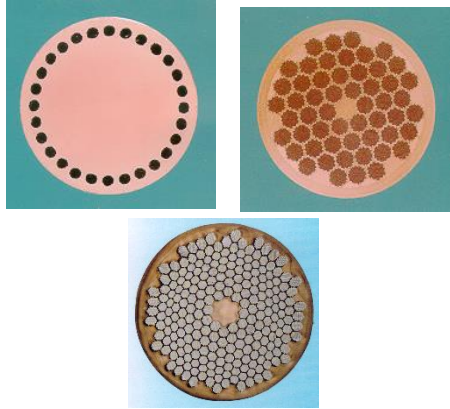


Température critique

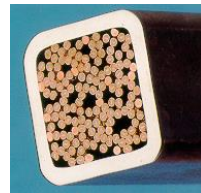
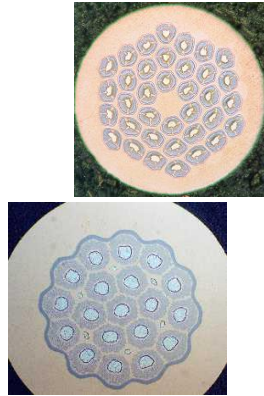
- NbTi = 10K
- Nb₃Sn= 18K
- MgB₂ =39K
- HTS >70K

DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS DISPONIBLES SOUS DIFFERENTES FORMES

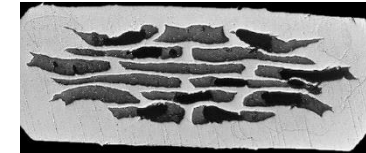
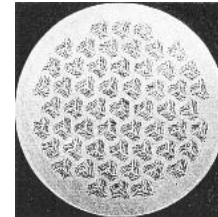
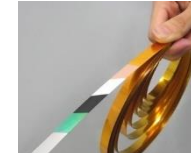
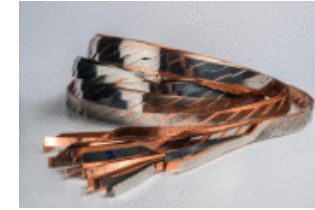
NbTi



Nb_3Sn , Nb_3Al



ReBCO

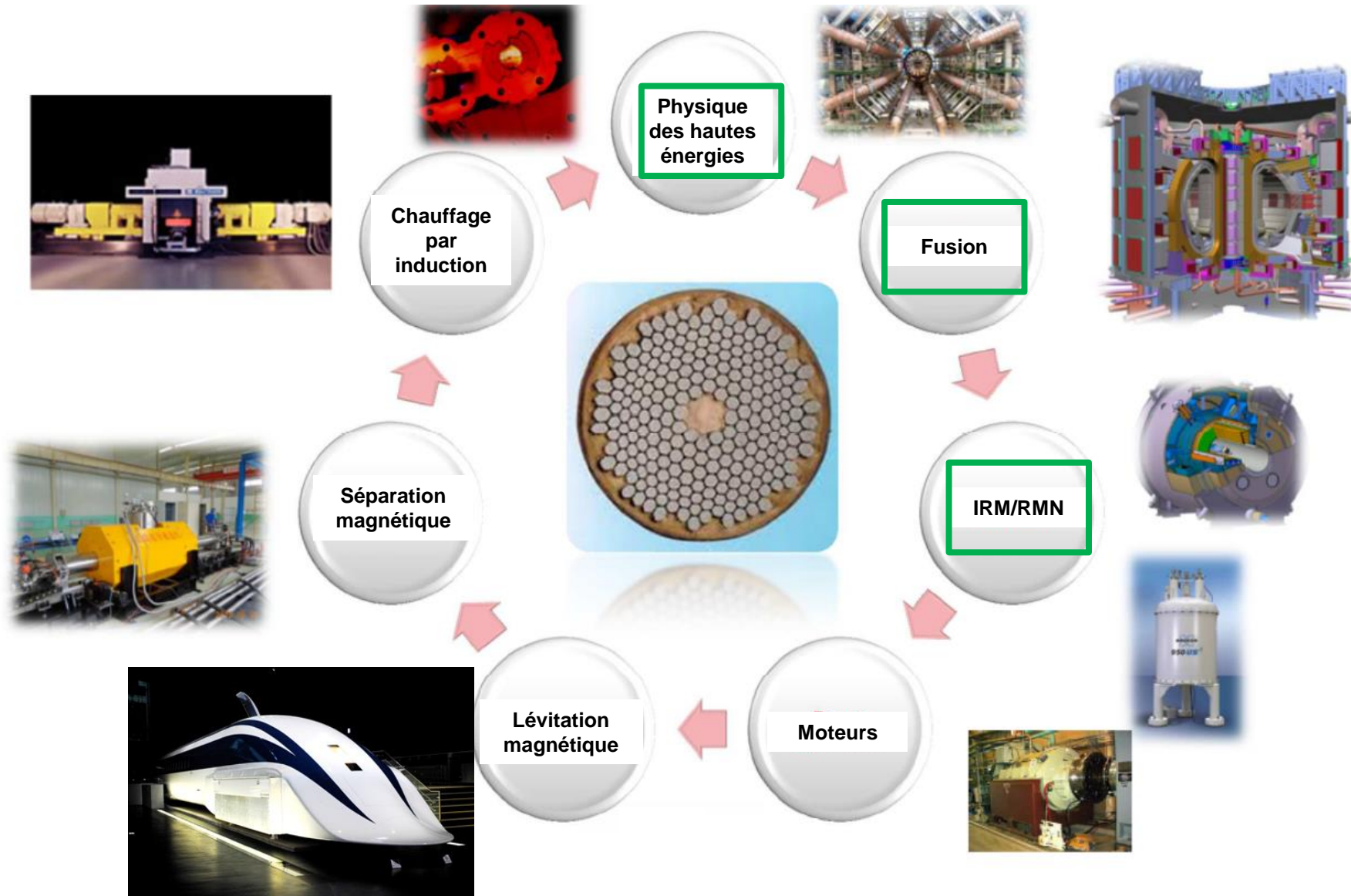


BSCCO

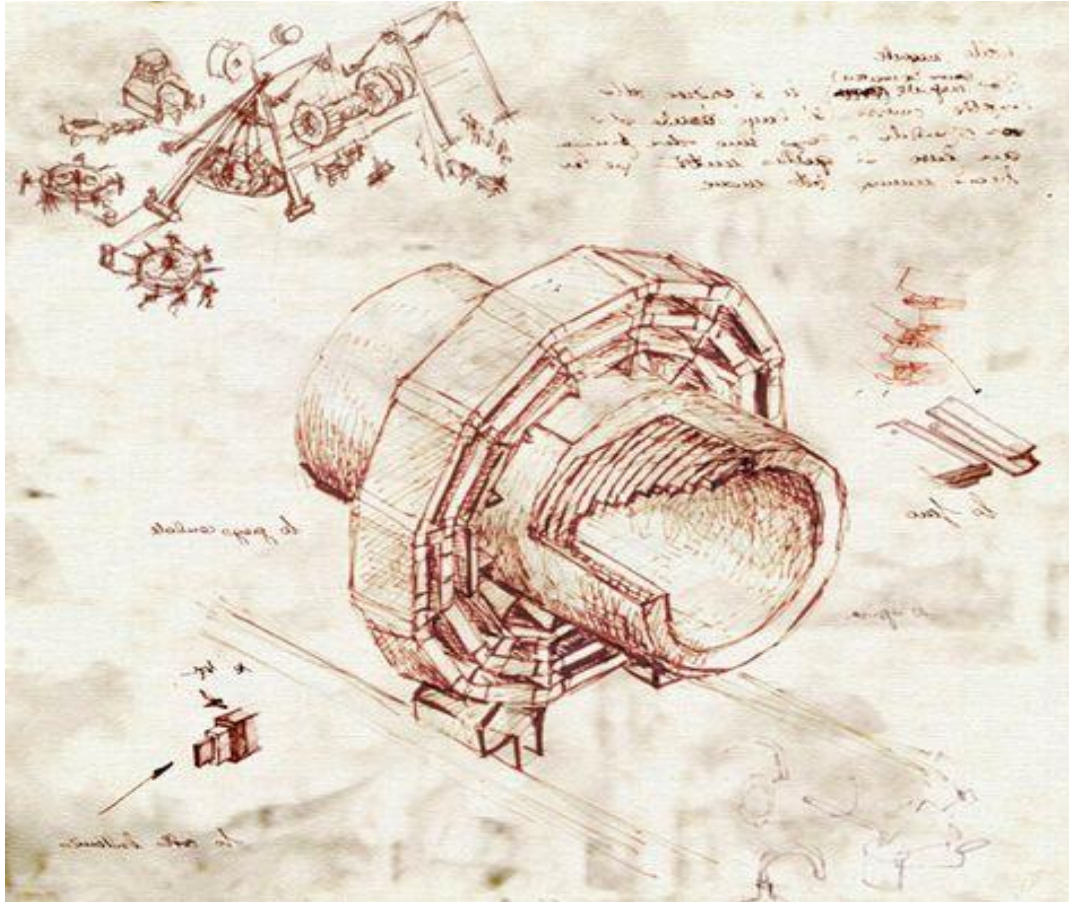
MgB_2



Pastilles/ brins/rubans/cables



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...

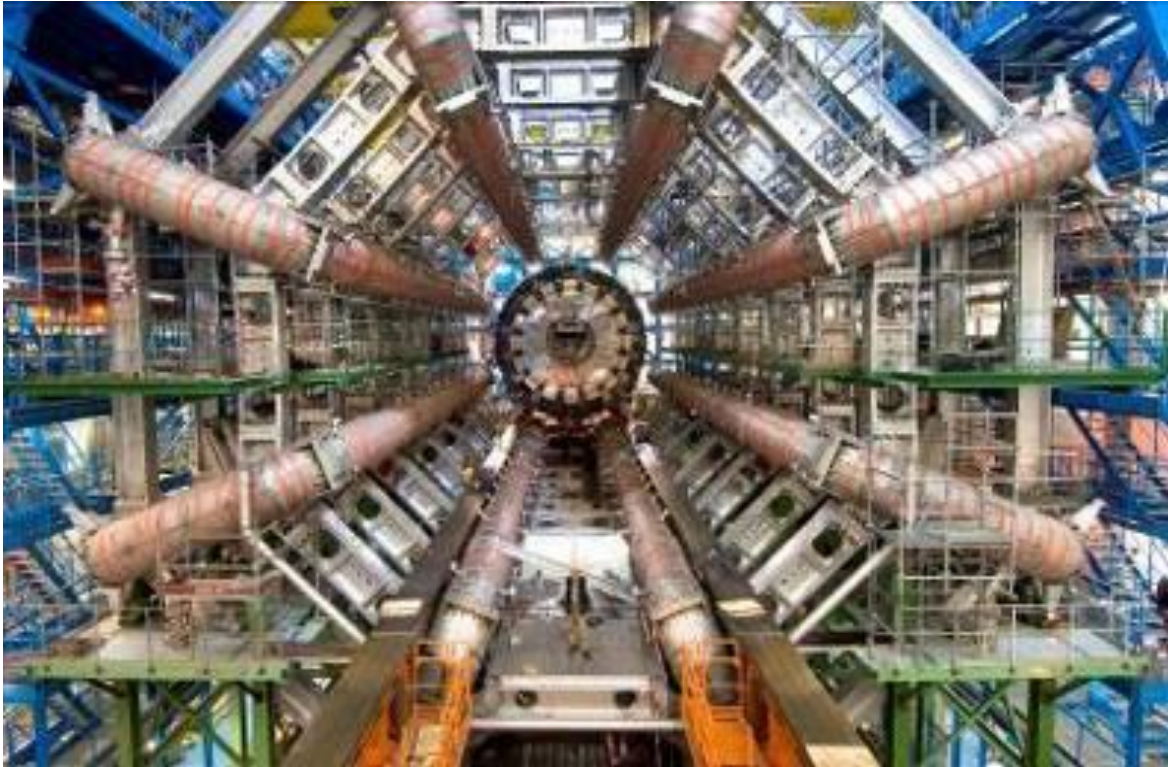
- **LA PHYSIQUE DES PARTICULES**
- LA FUSION
- LES AIMANTS IRM/RMN



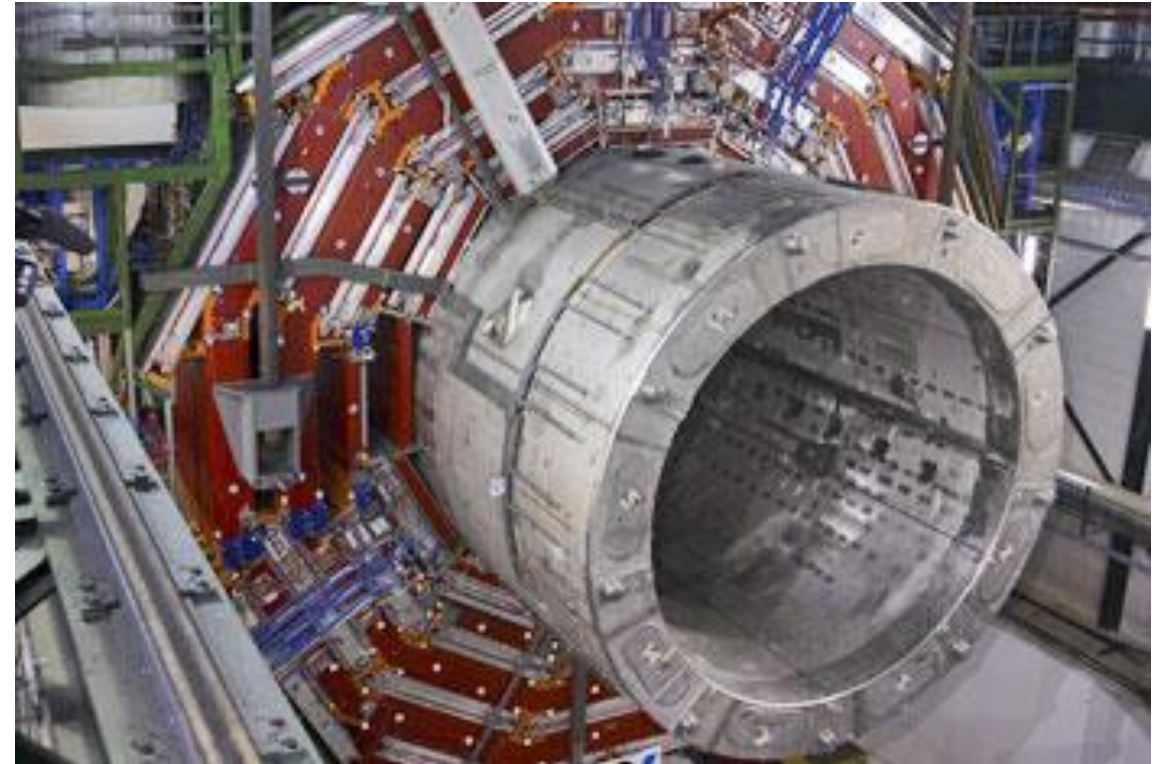
- Collisionneur à protons de 14 TeV
- Machine exploitée depuis 2008
- 27 km de circonférence
- 1706 aimants en NbTi, refroidis à 1.9K (hélium superfluide)
- Champ dipôle de 8.3T



- Deux grands aimants de détecteur (NbTi)

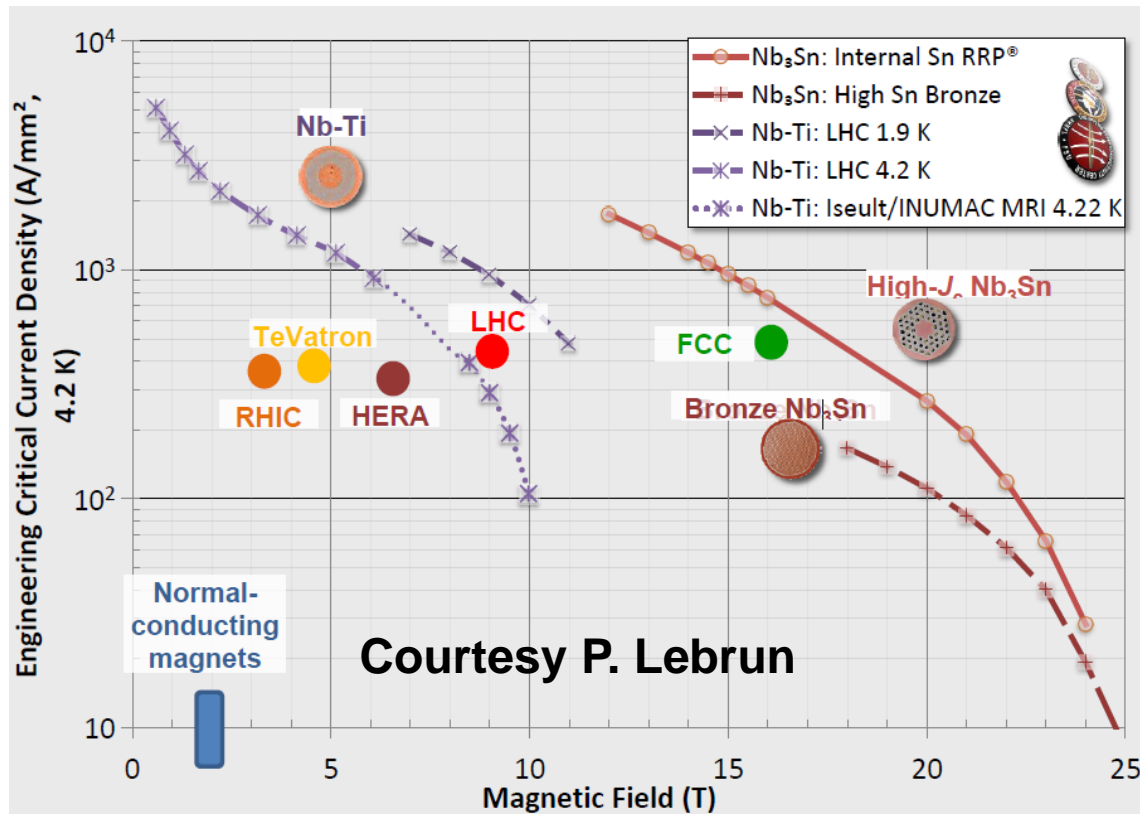


ATLAS Barrel Toroid



CMS solenoid

- 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 Nb₃Sn ?

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

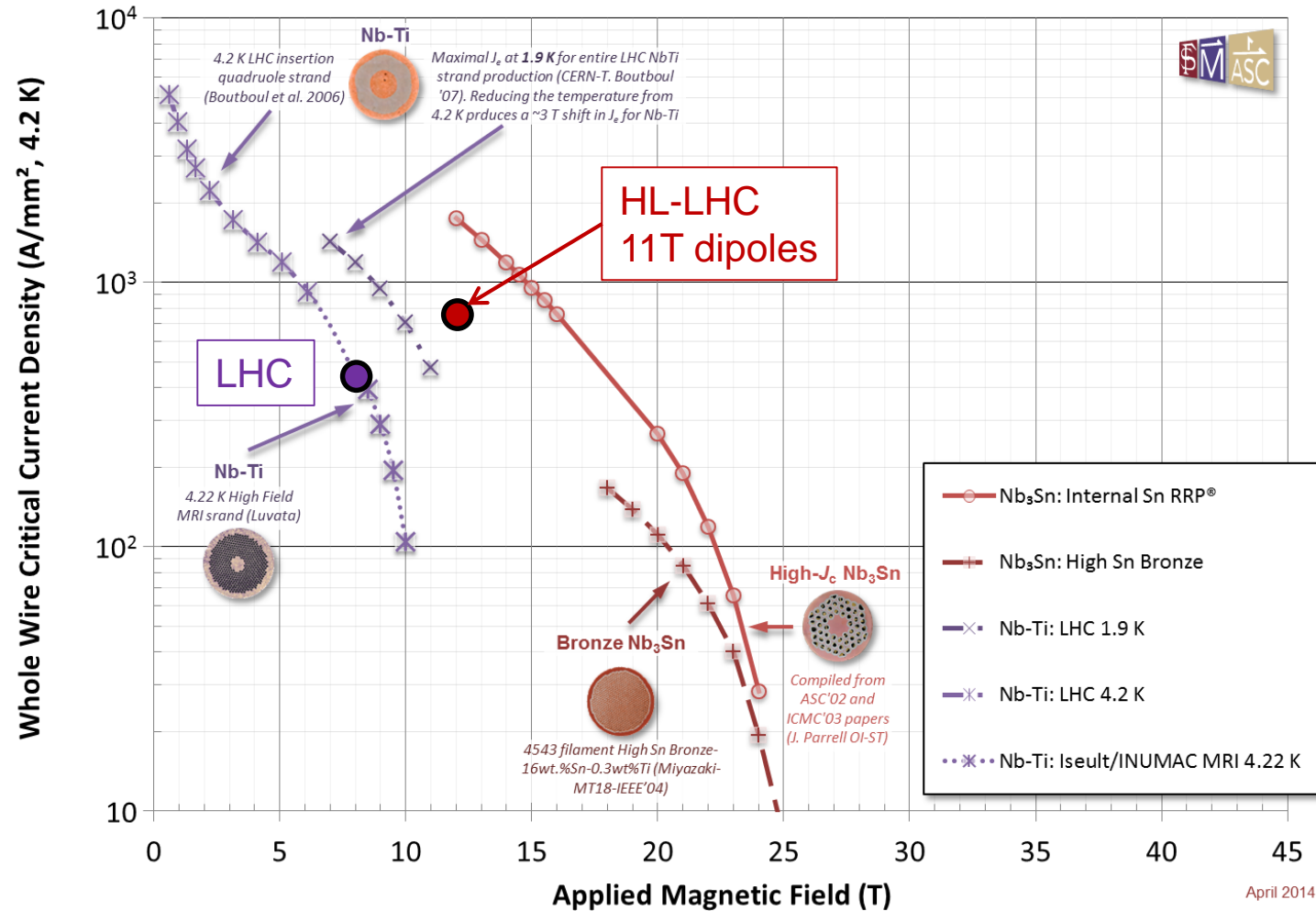
Target 7 TeV (14 TeV c.o.m)
Dipole 8.33 T



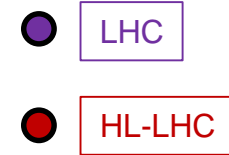
HL-LHC : High Luminosity LHC

- **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 Nb₃Sn



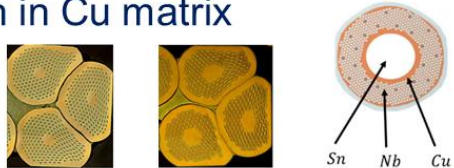
Magnet operating points :



Les défis des aimants Nb_3Sn :

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

1. Wires made of Nb filaments +Sn in Cu matrix

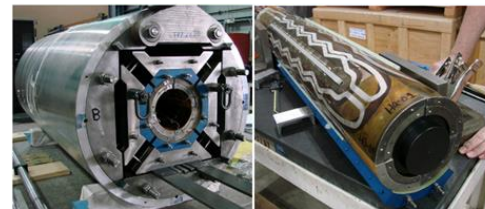


2. Rutherford Cable

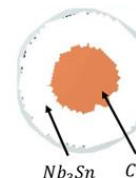


3. Coils wound with cables

6. Coils assembled in the support structure



4. 650°C heat treatment to form the Nb_3Sn phase



5. Coils impregnated with epoxy resin



7. Assembly in cryostat

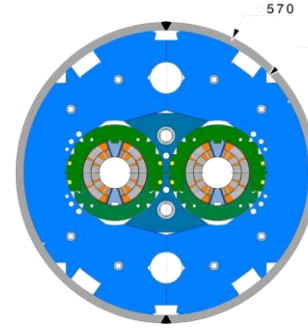


Les grandes étapes de fabrication d'un aimant d'accélérateur Nb_3Sn

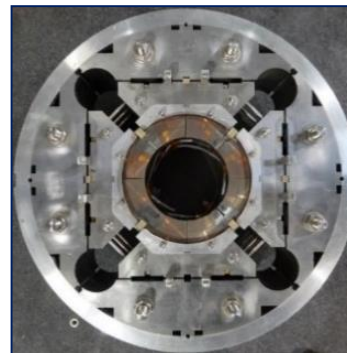
Courtesy E. Rochepault

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

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



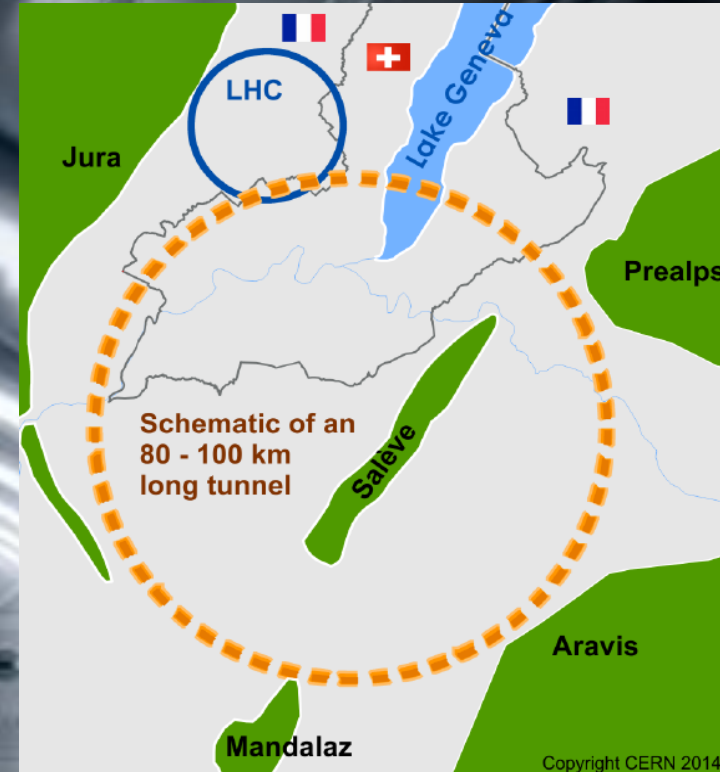
MQXF project: install high gradient/high aperture quadrupoles (132.6 T/m in a 150 mm bore) in the insertion regions



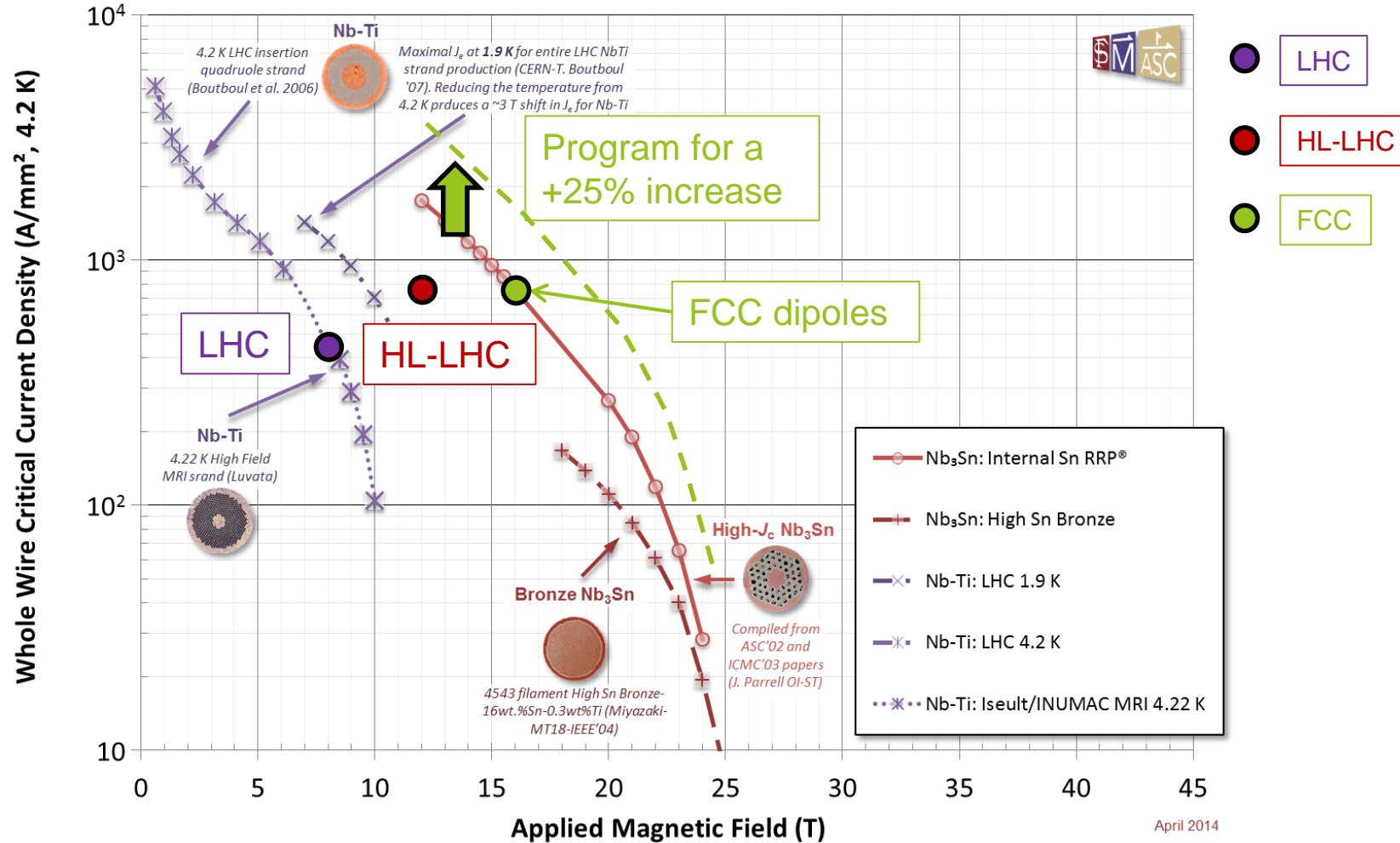
- 3 aimants courts 4m (USA) / 3 aimants longs 8m (CERN)
- Tests en cours
- Installation prévue en 2024-2025 (LS3)

FCC-hh Future Circular Collider

100 km - 16 T
100 TeV (c.o.m)



Courtesy of CERN

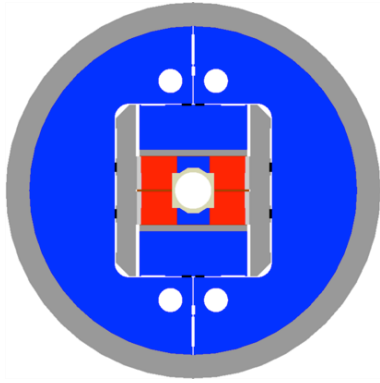
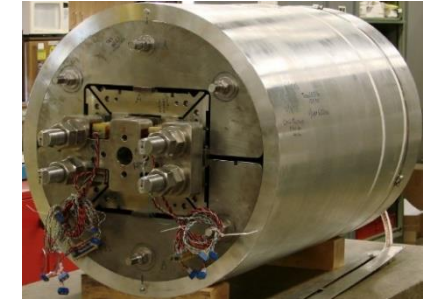
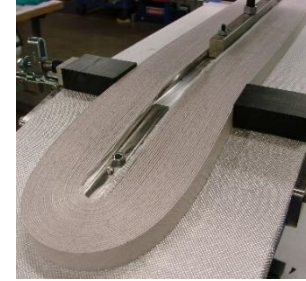
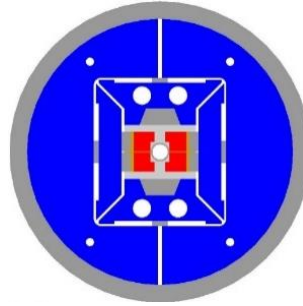


- HD2 (LBNL)

R&D magnet

Φ 43mm

→ **13,8 T** in **2008**



- FRESCA2 (CERN/CEA)

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

Φ 100 mm

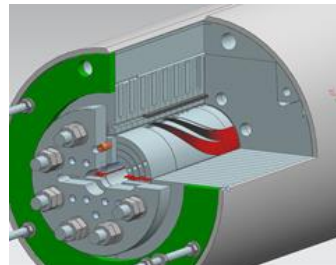


- Fermilab 15T dipole

R&D magnet,

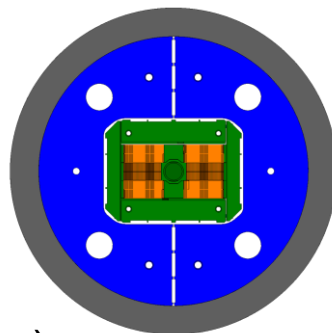
→ **14,5 T** in **2020**

Φ 60 mm



CERN R&D: RMM

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

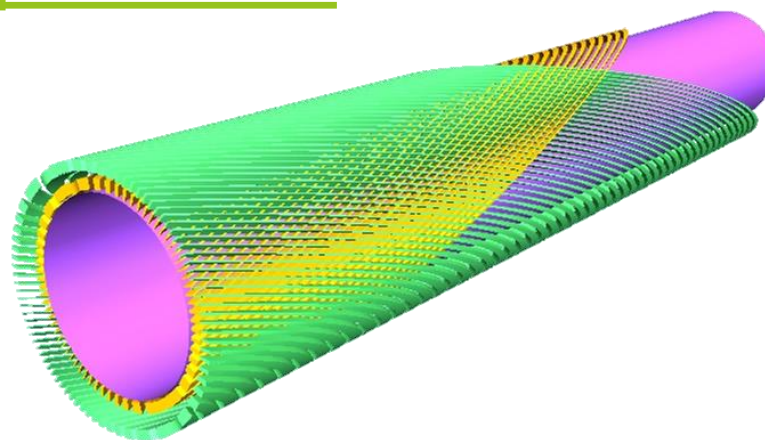


Φ 50 mm (FFC spécification)

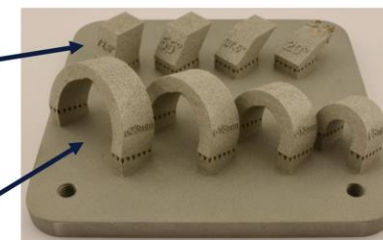
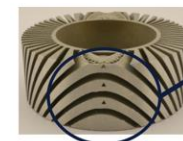
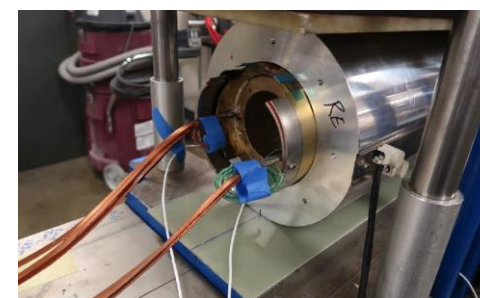


The Canted Cosine Theta (CCT) concept – LBNL (USA)

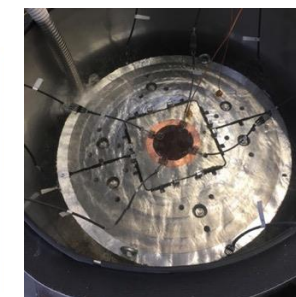
- New technology
- Short models
- Tests ongoing



R&D en cours (PSI, Suisse)

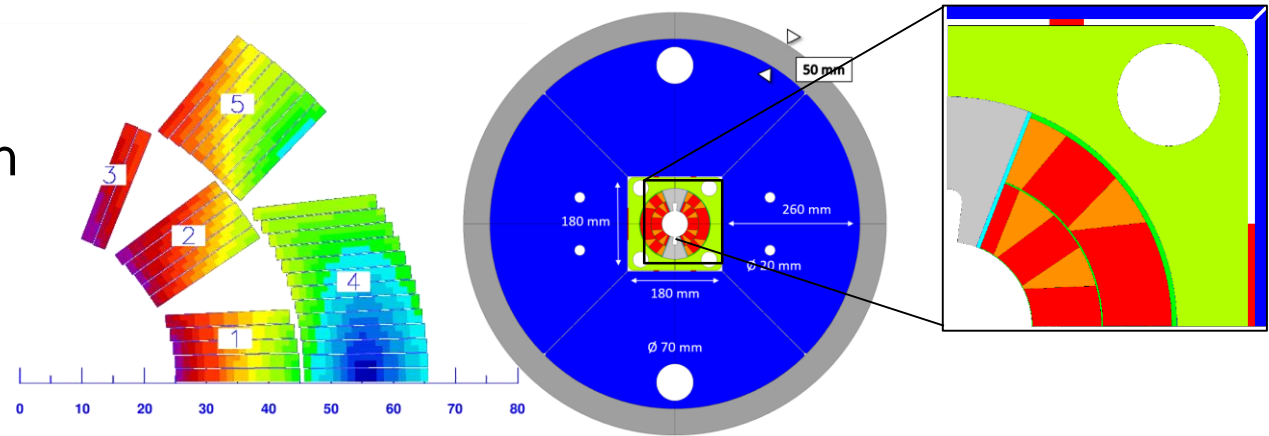


SLM with stainless steel (CL 20ES)



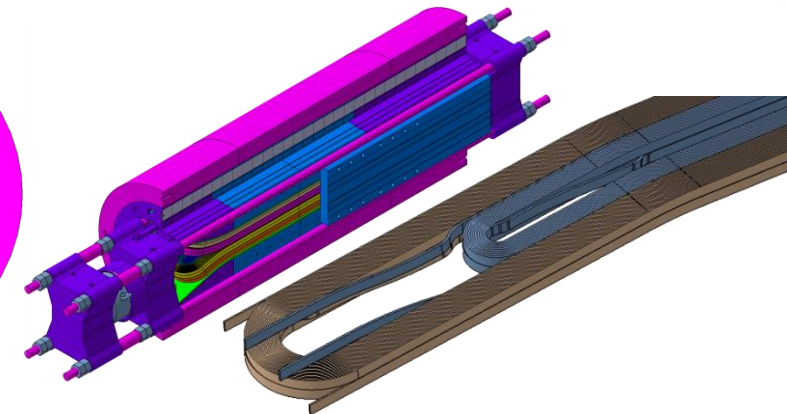
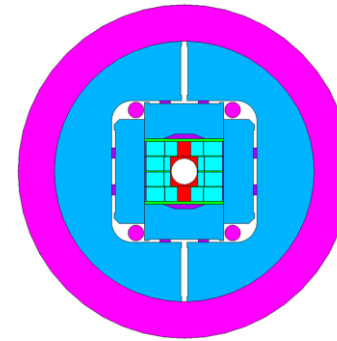
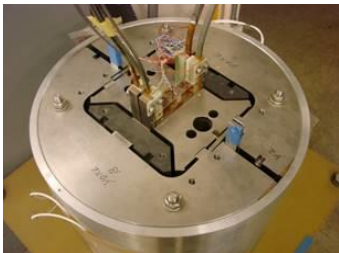
• Falcon: CERN/INFN model

- 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. Rochepault

➔ Mais il reste encore un gros effort de R&D pour maîtriser la technologie, et pouvoir assurer la production en série d'aimants Nb_3Sn

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

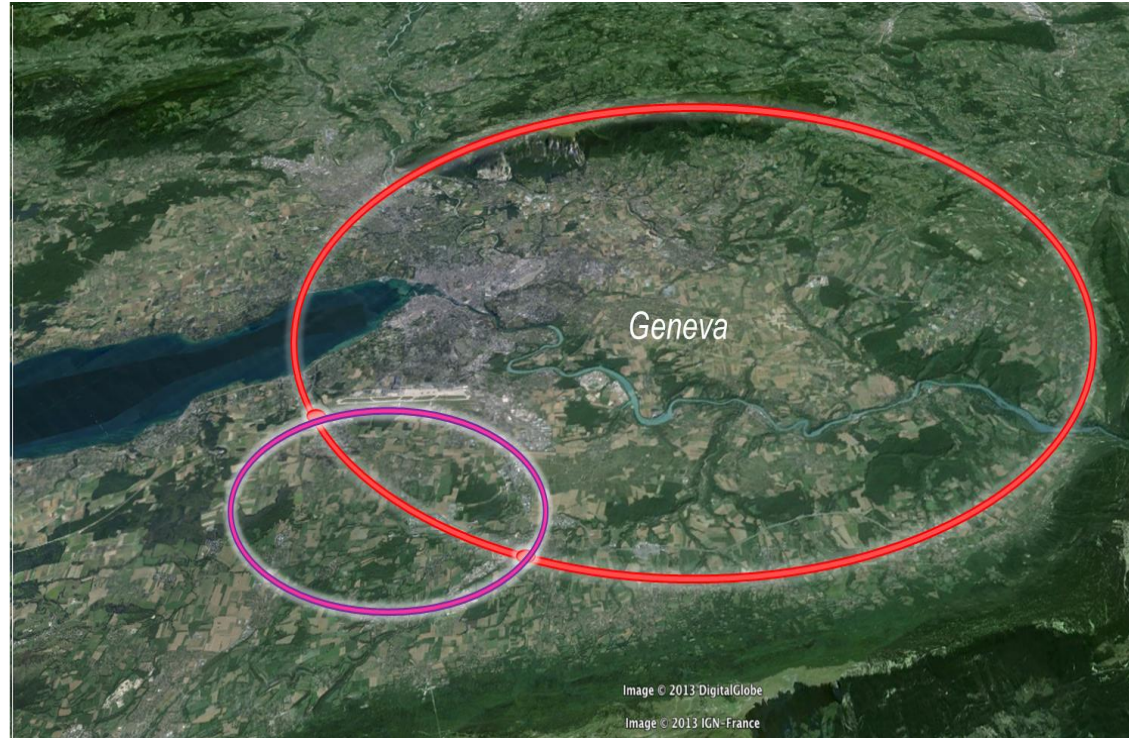
Energie du
faisceau

Champ
magnétique

Rayon de
courbure

LHC
14 TeV
27 km,
NbTi, 8.33 T

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



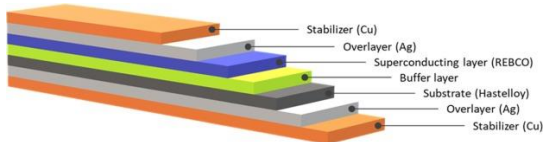
HE-LHC
33 TeV
65 km,
NbTi, 8,33 T

Les 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

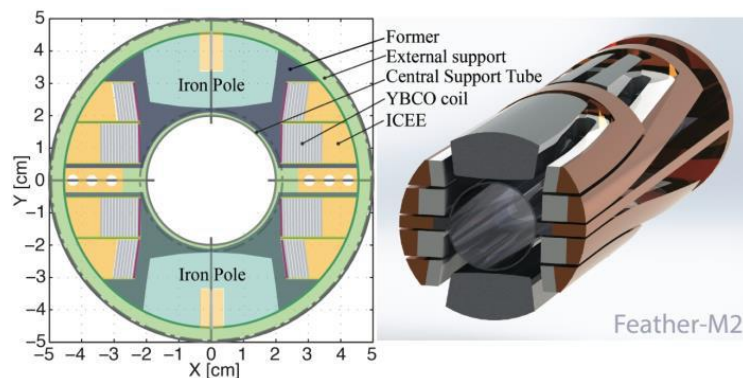
YBCO ($R_{rare}E_{earth}BCO$)

Yttrium
Barium
Copper
Oxide



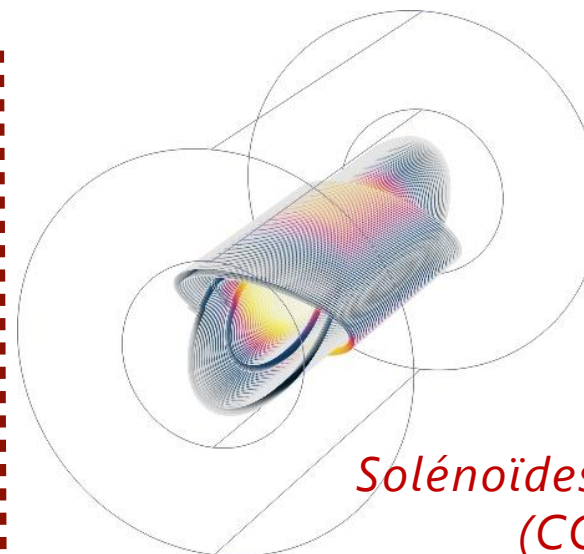
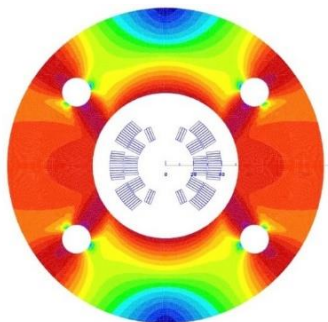
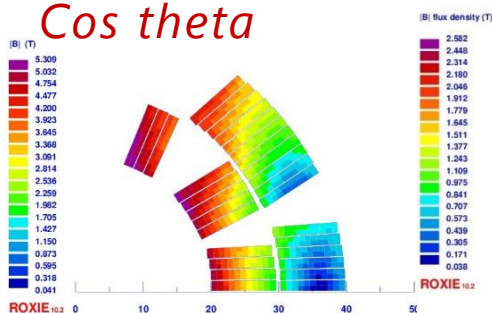
Câble Roebel

Blocks alignés



Feather-M2

Cos theta



Solénoides inclinés (CCT)

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

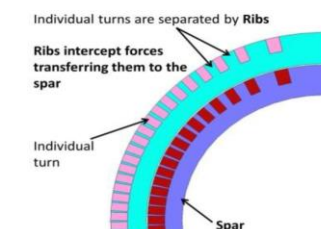
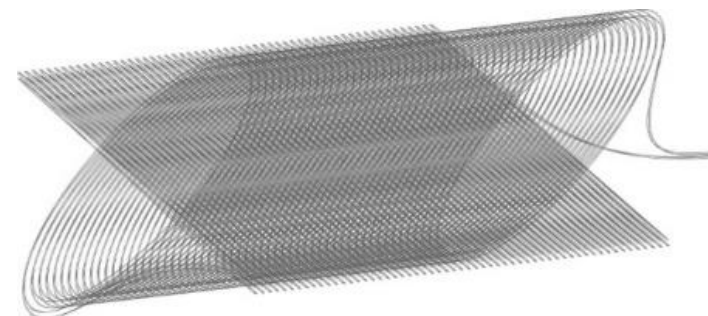
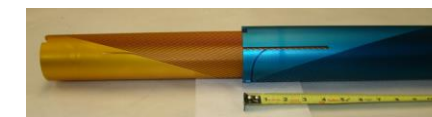
D. I. MEYER and R. FLASCK

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

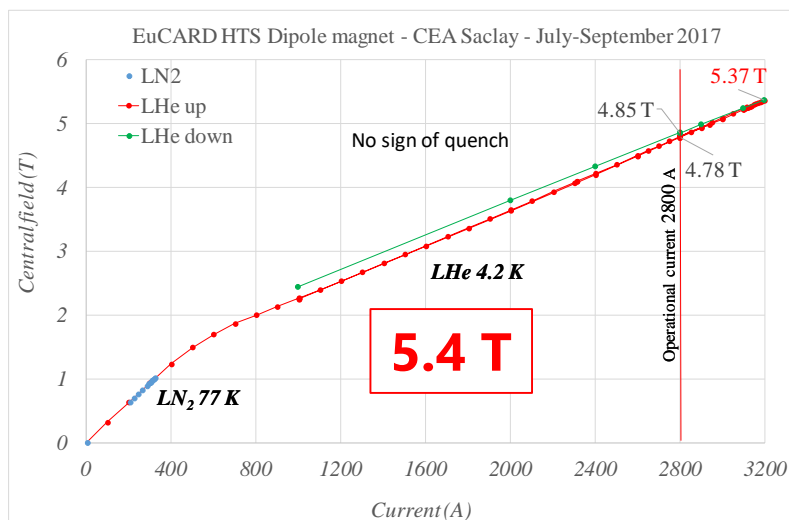
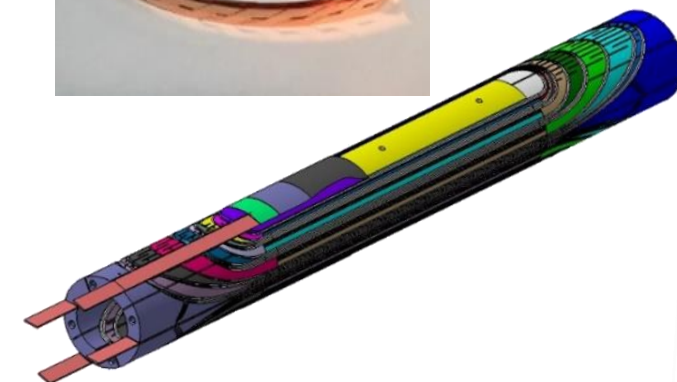
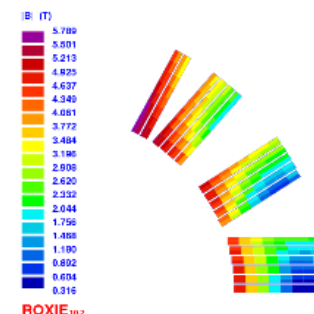
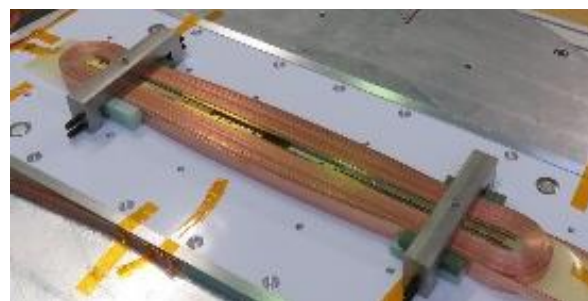
Received 16 December 1969

BI2212

Bismuth
Strontium
Calcium
Copper
Oxide



Courtesy P.Fazilleau



EuCARD, CEA-CERN

EuCARD2, CEA design

5.4 T

2.6 T

Dipole

Dipole cos theta

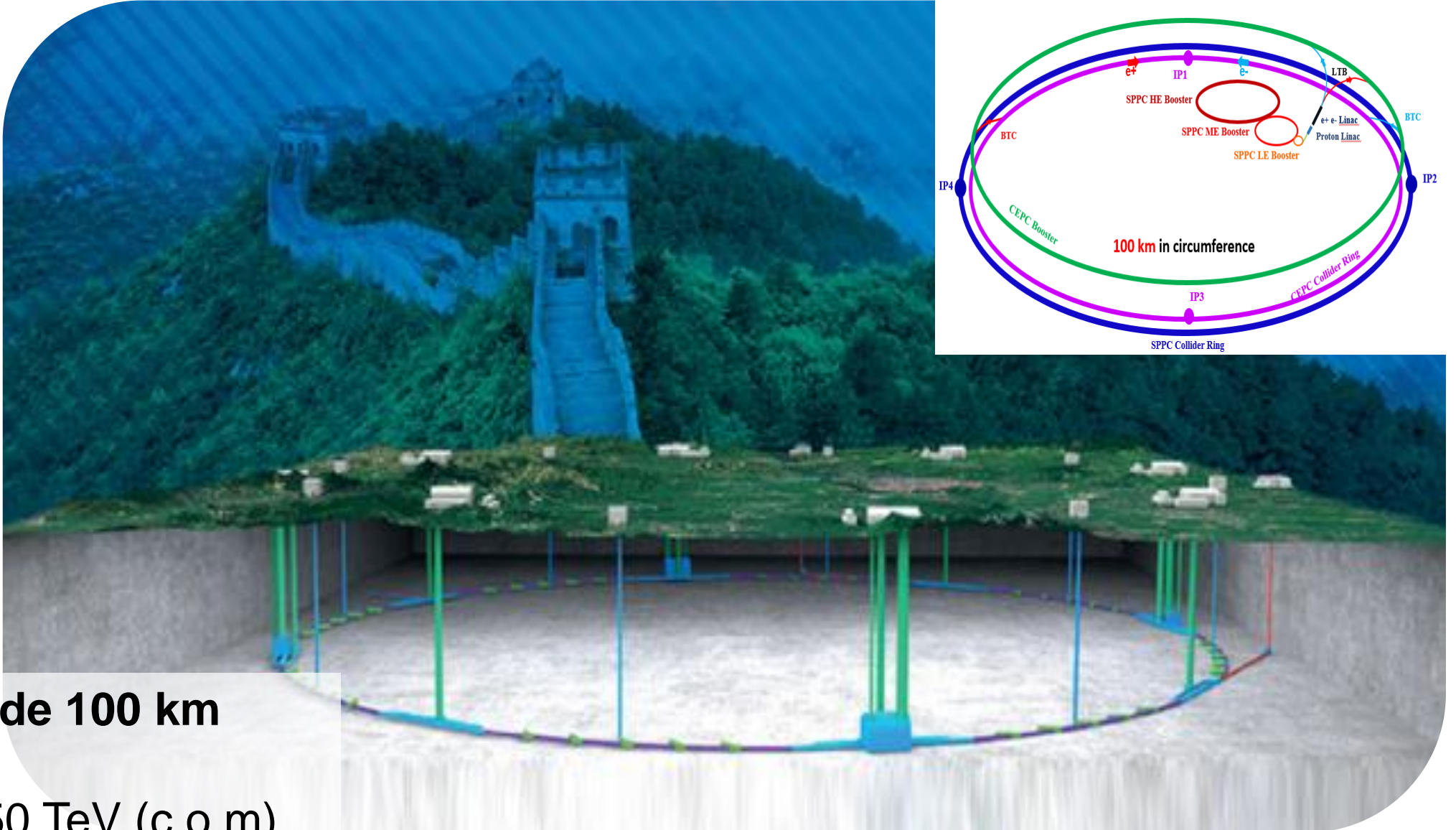
REBCO, 4 rubans SC en //, 4.2 K

Cable Roebel rubans REBCO, 4.2 K

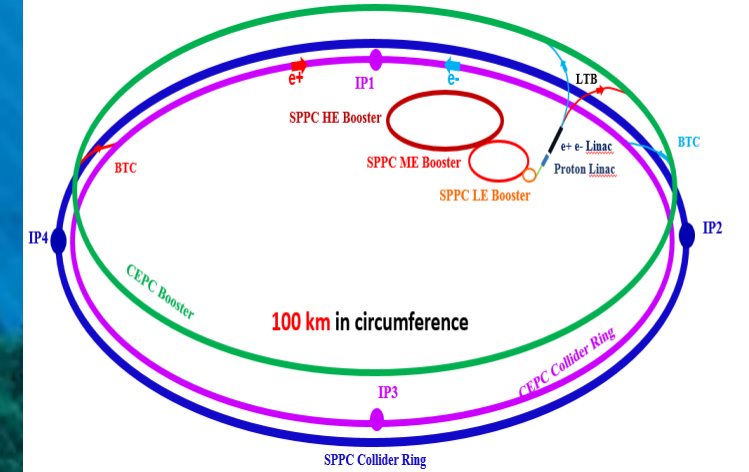


Test de l'aimant seul à venir au CERN puis dans un champ de 6T

Courtesy M. Durante/T. Lécrevisse



Tunnel de 100 km
12-24 T
75 to 150 TeV (c.o.m)



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

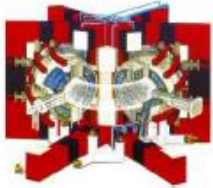


Quelques exemples...

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

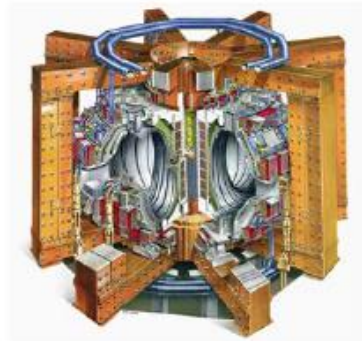
Tore Supra

25 m³, $P_F \approx 0$ MW_{th}



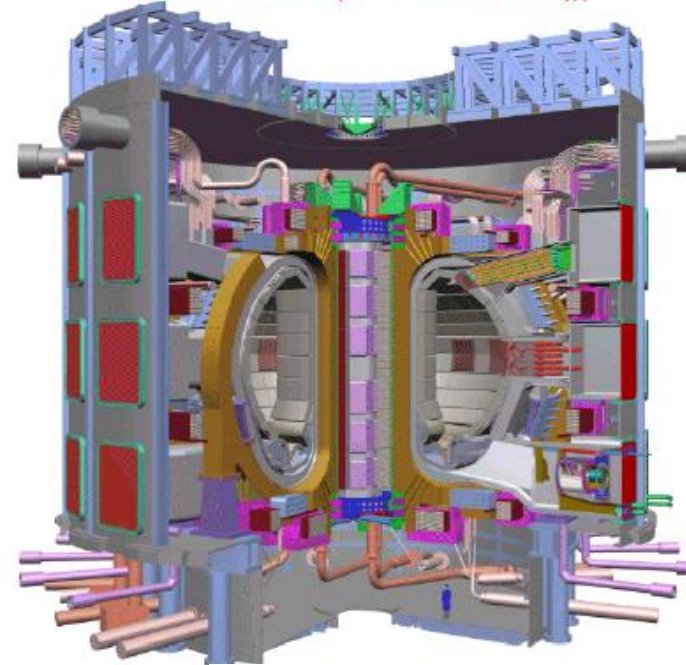
JET

80 m³, $P_F \approx 16$ MW_{th}

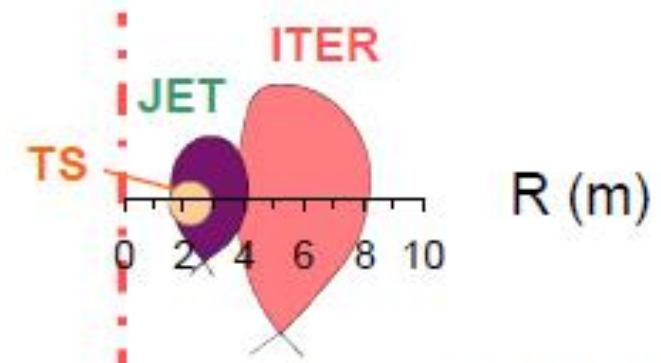


ITER

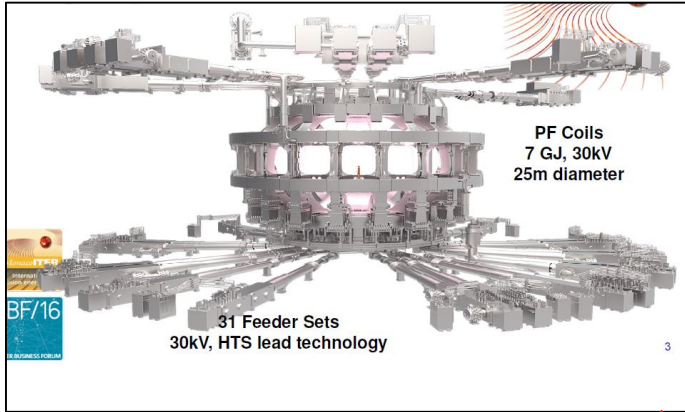
800 m³, $P_F \approx 500$ MW_{th}



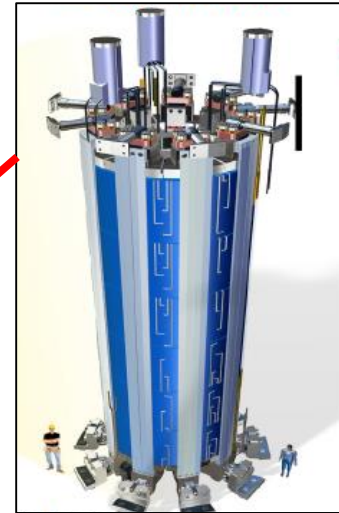
ITER Parameters	
R : Major radius (m)	6,2
a : Minor radius (m)	2,0
Plasma magnetic field B_t (T)	5,3
Plasma Current (MA)	15
Fusion Power P_F (MW)	500
Plasma discharge duration	400 s
Amplification factor(Q)	10
Investment cost	~13 G€



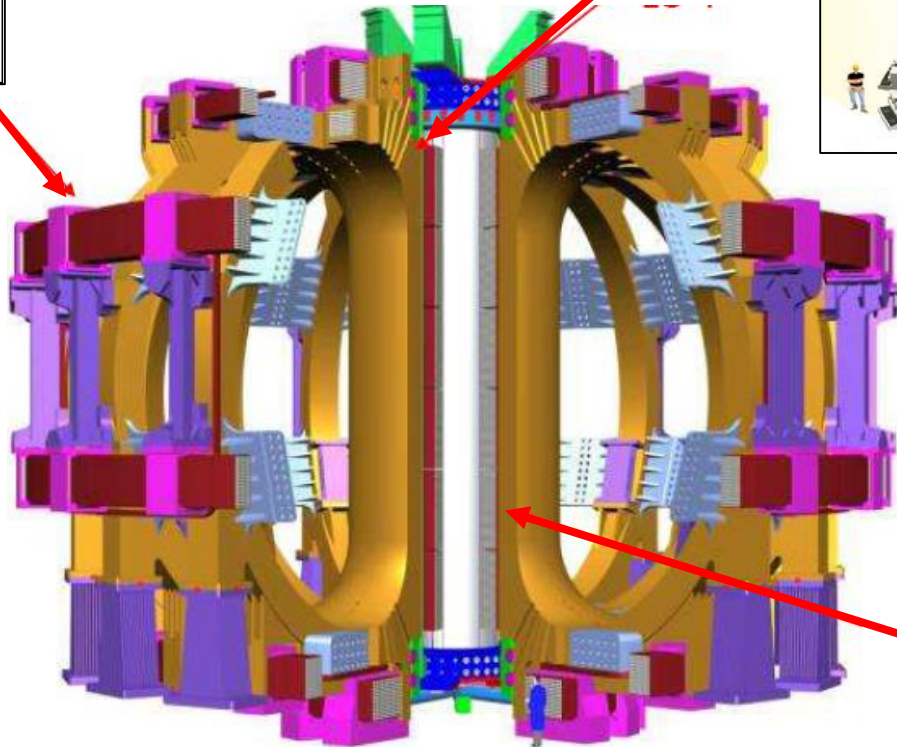
LES AIMANTS D'ITER, LES PLUS GRAND AIMANTS SUPRACONDUCTEURS JAMAIS CONSTRUITS



Bobines poloïdales
 $D = 25\text{m}$

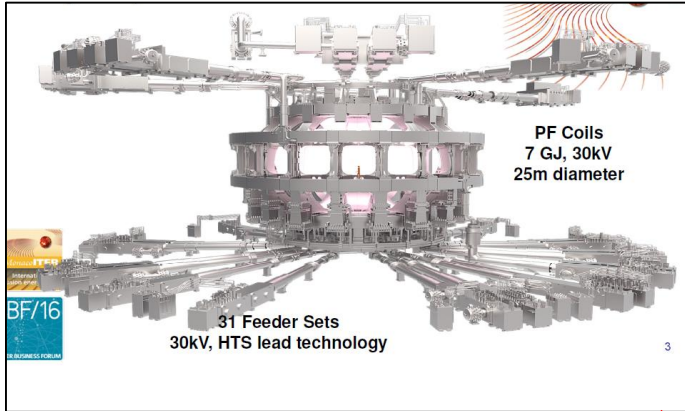


Solénoïde central
 $H = 13\text{m}$



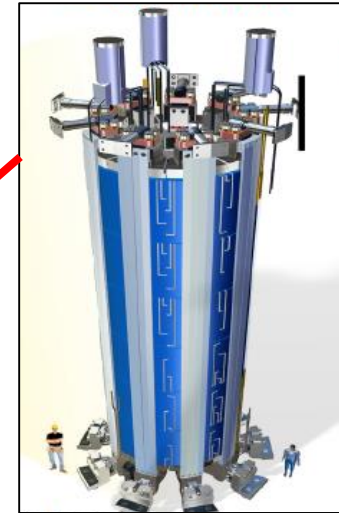
Bobines toroïdales
 $R = 6.2\text{ m}$

LES AIMANTS D'ITER, LES PLUS GRANDS AIMANTS SUPRACONDUCTEURS JAMAIS CONSTRUITS



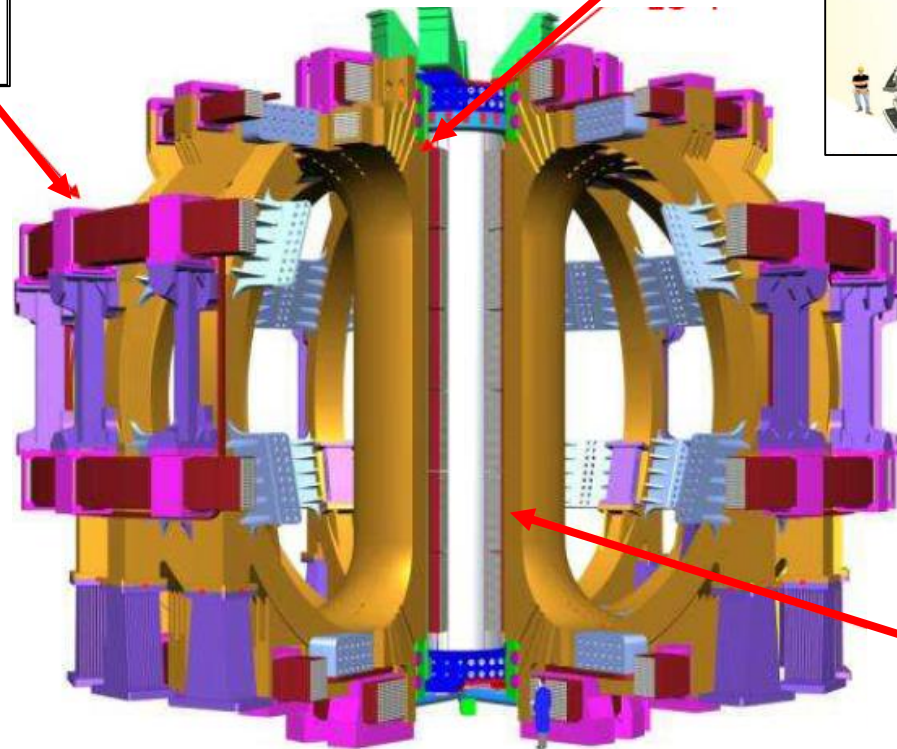
Bobines poloïdales

- 4-6T
- NbTi
- 244 tonnes



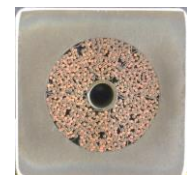
Solénoïde central

- 13T; 4.5K
- Nb₃Sn
- 132 tonnes



Bobines toroïdales

- 11.8 T (peak)
- Nb₃Sn
- 376 tonnes

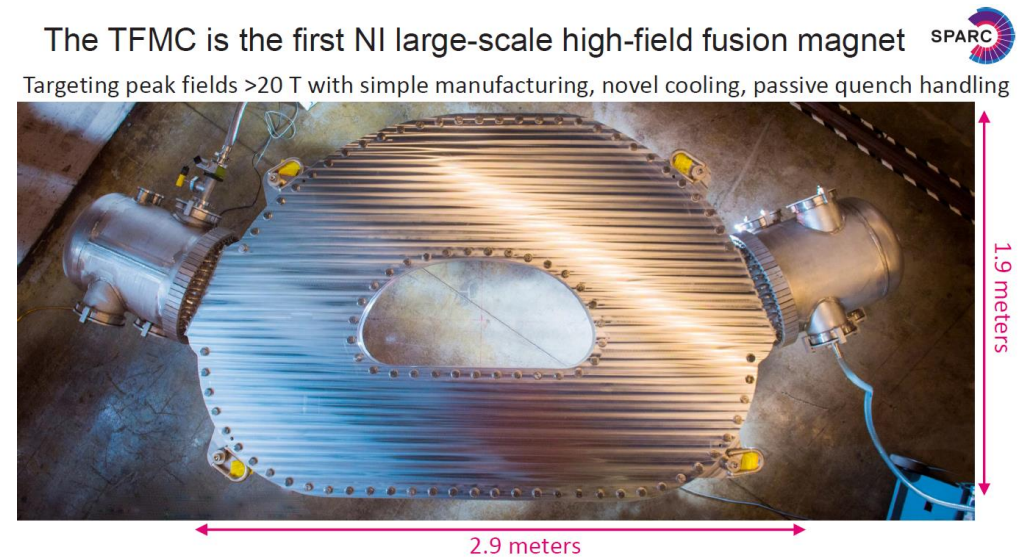
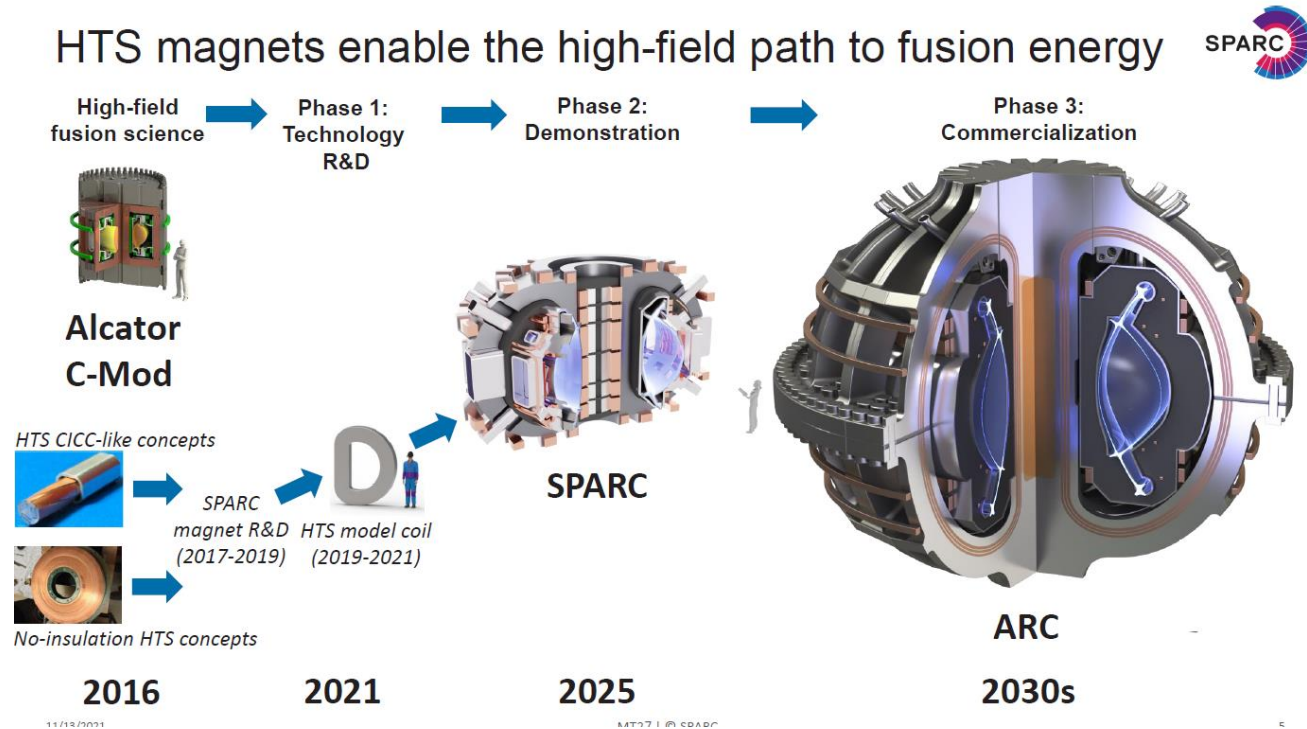


Et des composants HTS
(amenées de courant)



Mais trop longs à détailler dans cette présentation ☹

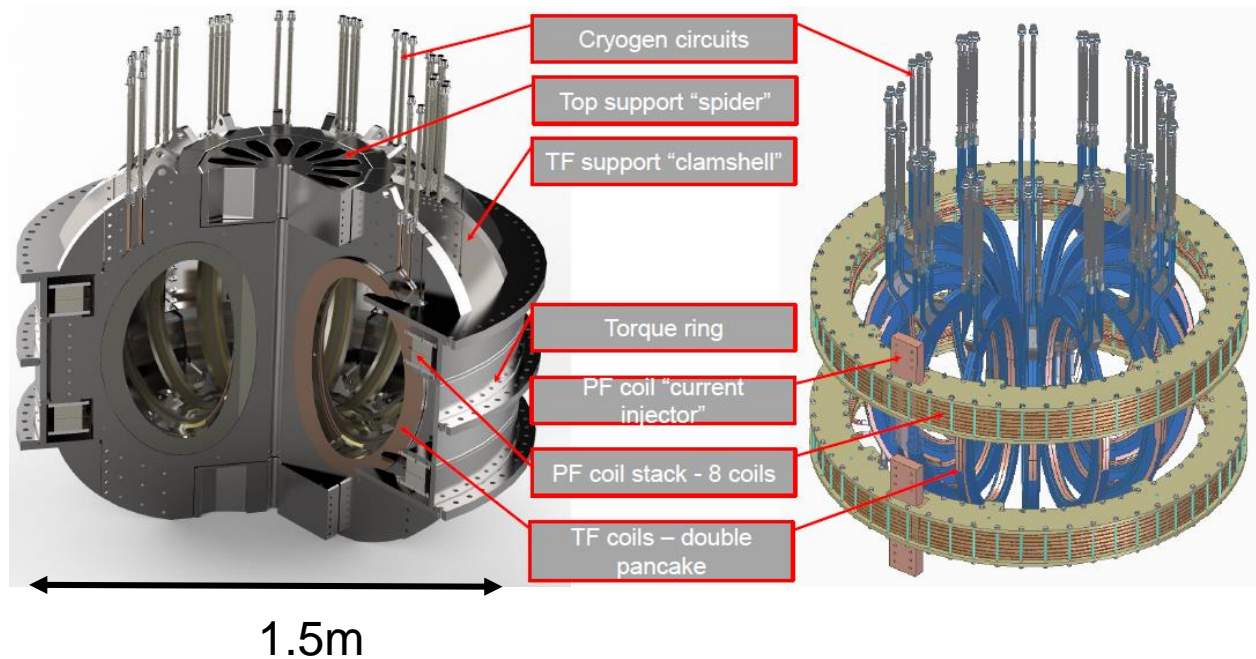
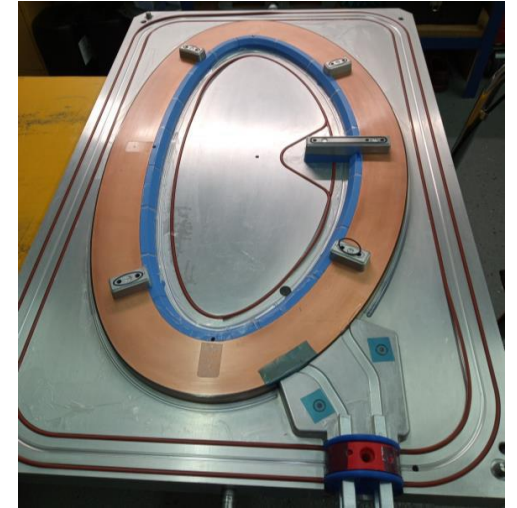
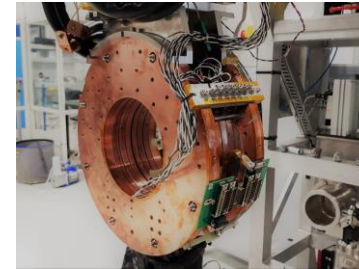
Le projet SPARC (MIT / Commonwealth Fusion Systems - USA)



- 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



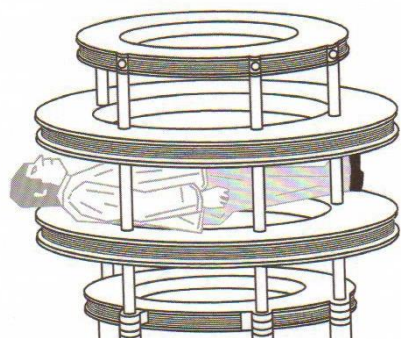
Premier prototype attendu vers 2030

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



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

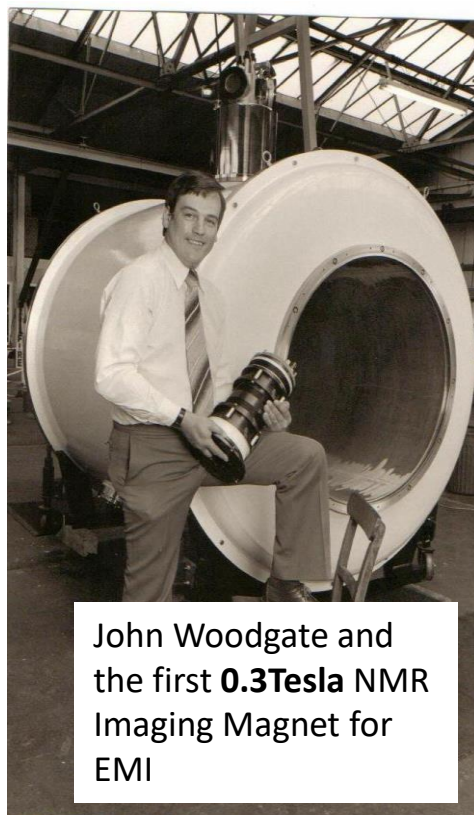




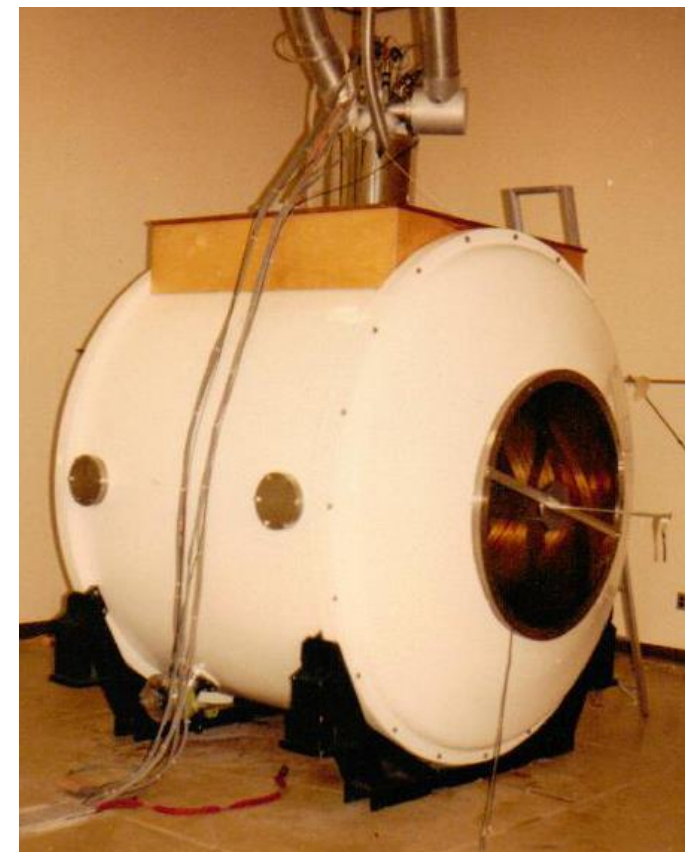
Aberdeen **0.03T resistive**
magnet - 1977



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

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



*Philips Ingenia
Elition 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*

Cylindrical magnets: >99% of superconducting scanners



Systèmes “ouverts”



1 T
Panorama (Philips)



0.5 T
OpenSky MRI (ASG)

Mobile MRI



*Extremity scanner
GE Optima 430s*

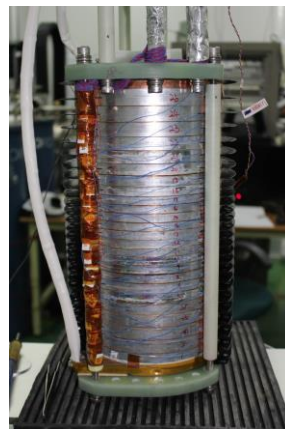
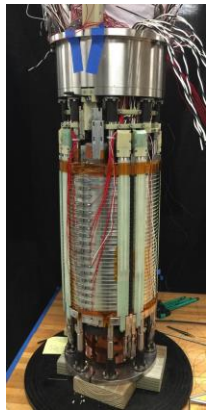
De très nombreux progrès au cours des derniers années

Des petits démonstrateurs...

Aux aimants commerciaux!

NATIONAL HIGH
MAGNETIC
FIELD LABORATORY

SUNAM



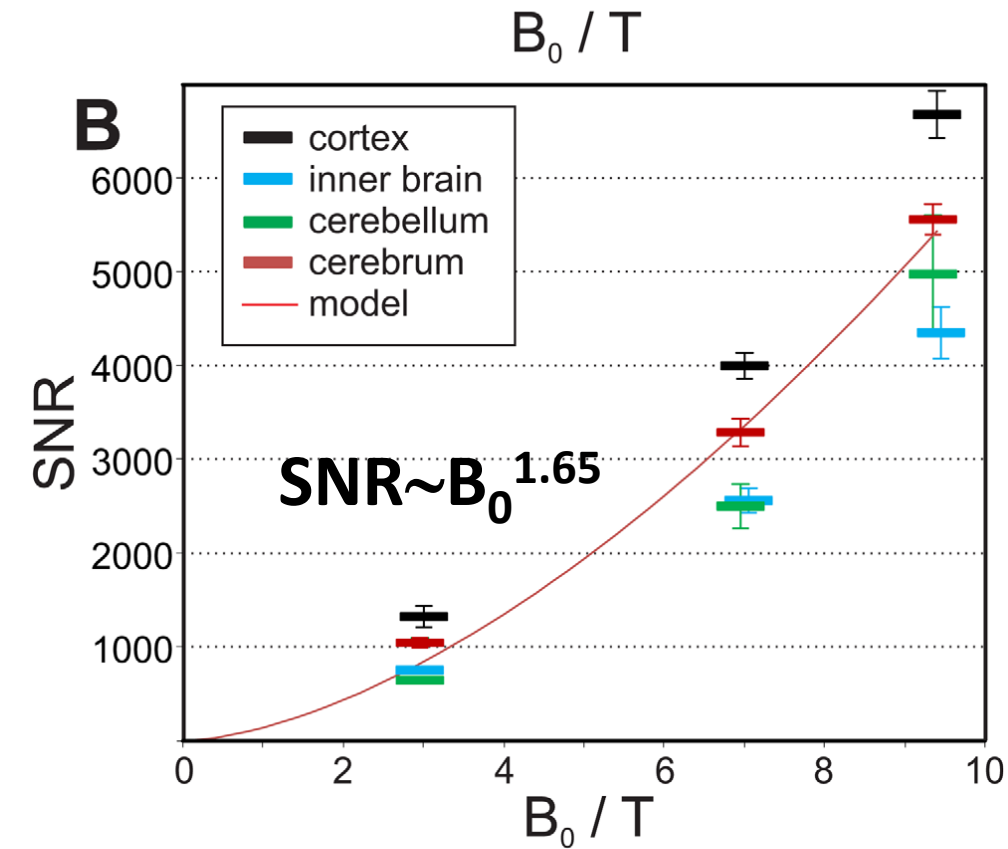
32T
17T HTS+
15T LTS
ID 34mm

45,5T
14,5T HTS+
31T résistif
ID 14mm

26,4T
(HTS only)
ID 35mm

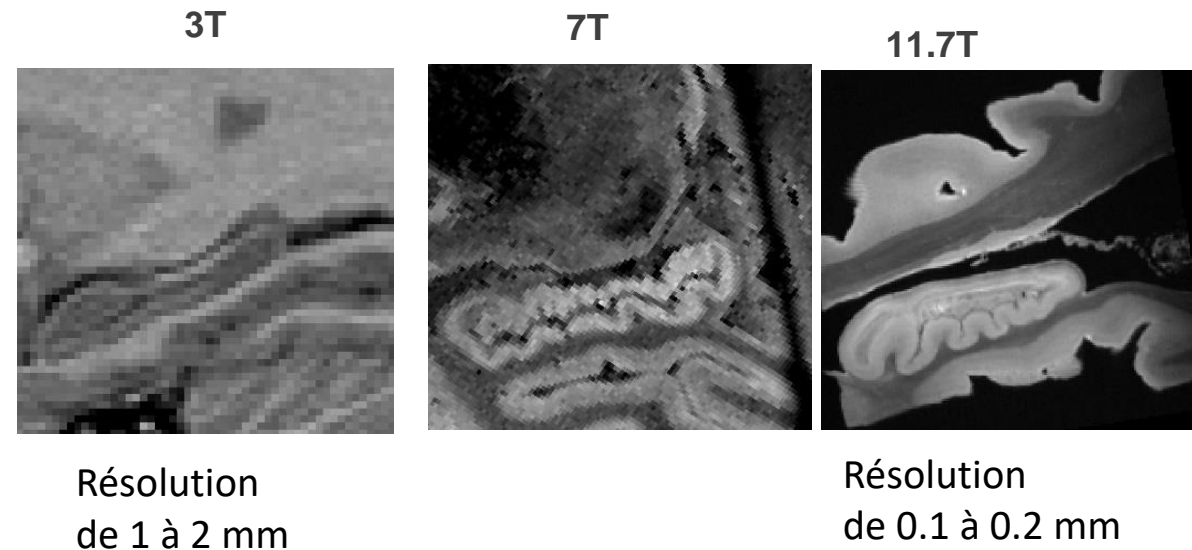
32,5T: 14,5T HTS+ 18T résistif
ID 38mm

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



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

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

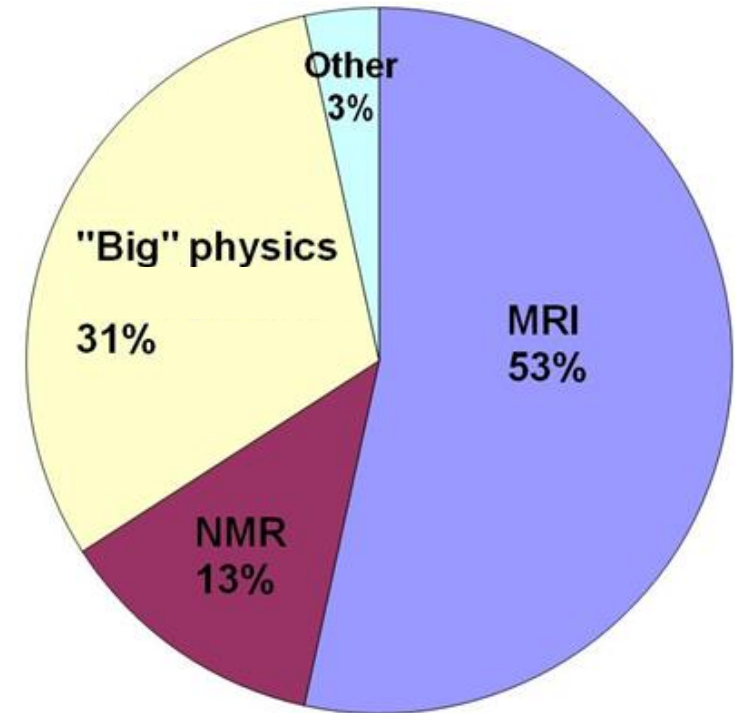


**Meilleure résolution
spatiale et temporelle**

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

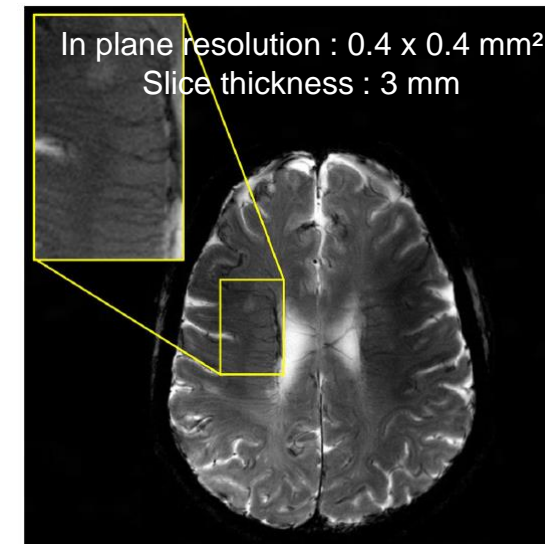
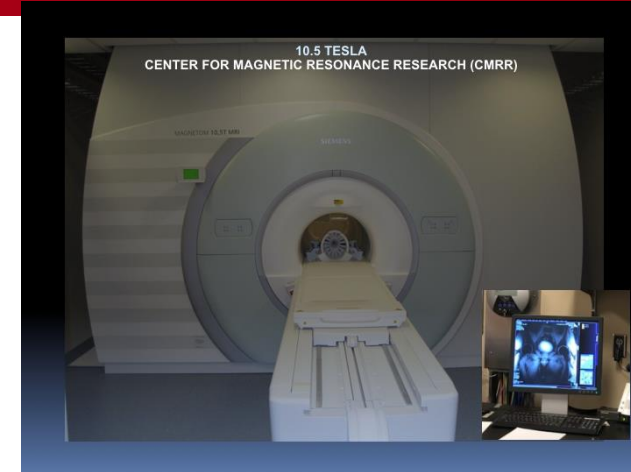
PREMIERE IMAGE SUR UN CERVEAU HUMAIN EN 2020

Center for Magnetic Resonance Research,
Department of Radiology, Minneapolis



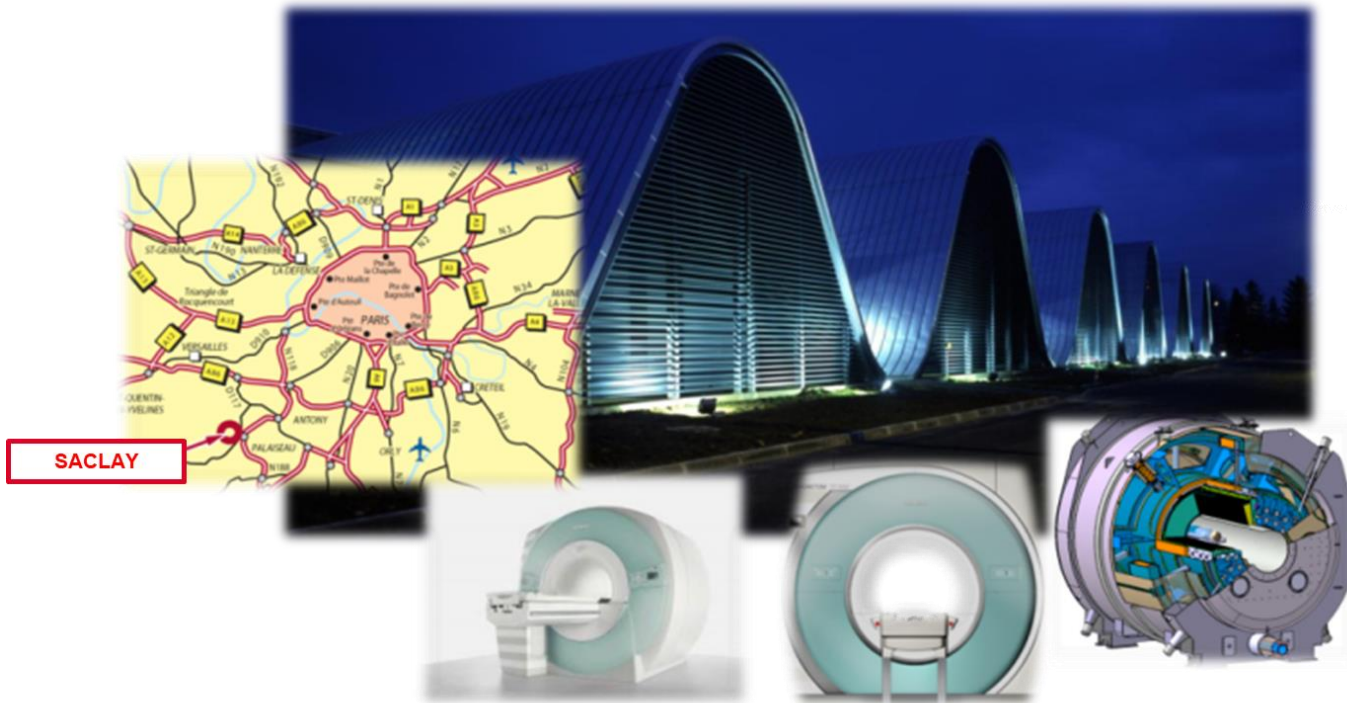
Mass	110 tons
Central bore diameter	88 cm
Length	4.1m
Width	3.2m
Conductor	NbTi (433km)
Operating temperature	3K

Passive shielding



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

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



**Neurospin
CEA Saclay, France**

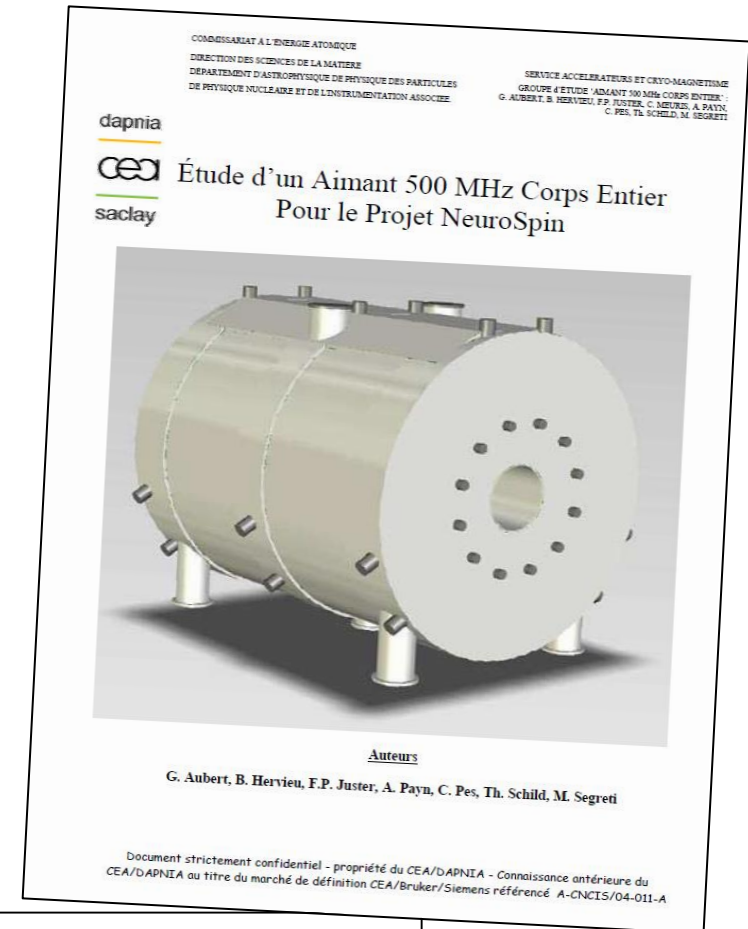
Institut
des sciences du vivant
Frédéric Joliot



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

Une première spécification très succincte mais très ambitieuse!

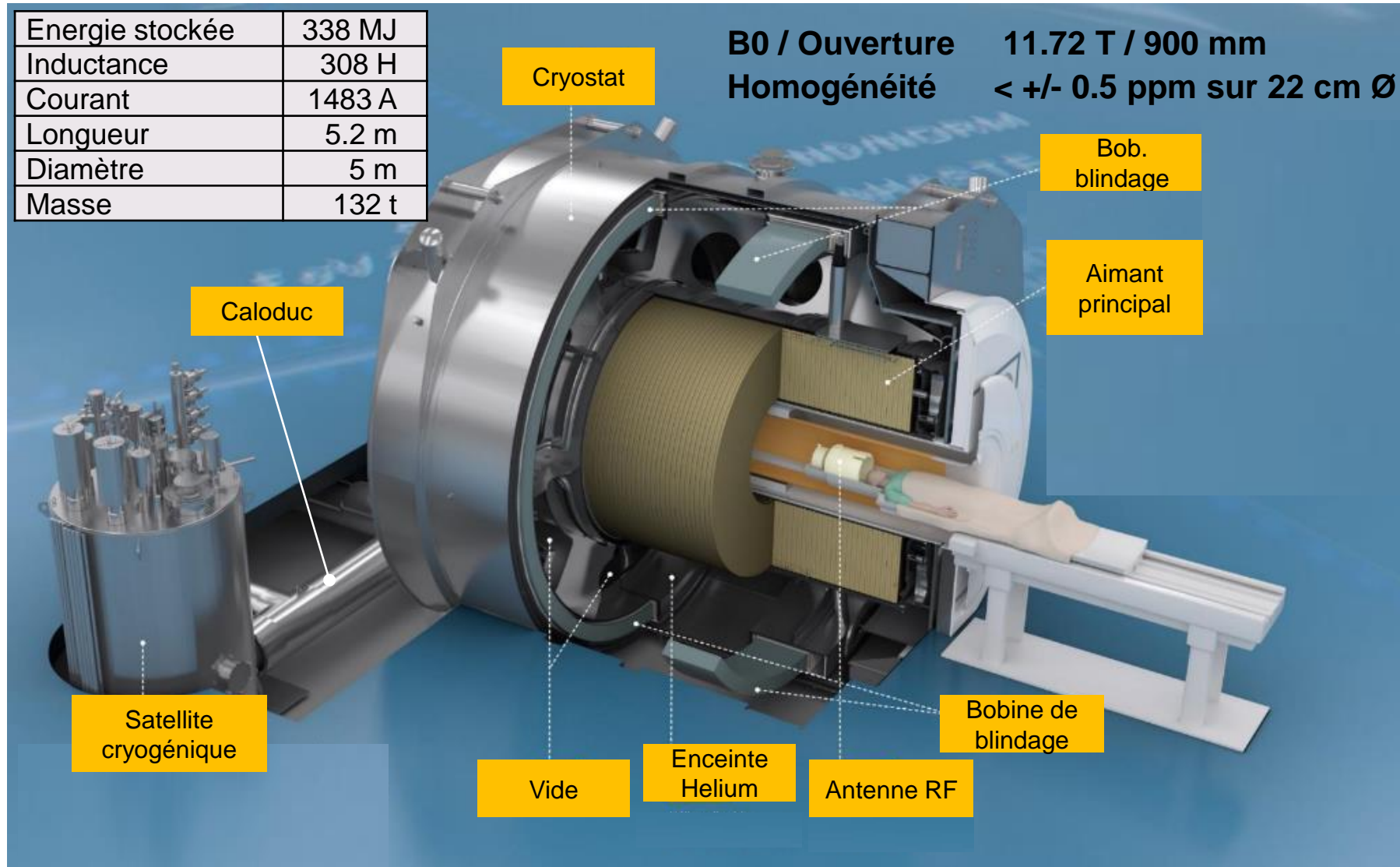
- B0 / ouverture 11.7T / 900mm
- Stabilité temporelle 0.05 ppm/h
- Homogénéité < 0.1 ppm sur Ø10 cm
- Champ de fuite 10 G à l'intérieur de l'arche



ET UN PREMIER AVANT-PROJET EN JUILLET 2004

L'AIMANT DE L'IRM ISEULT

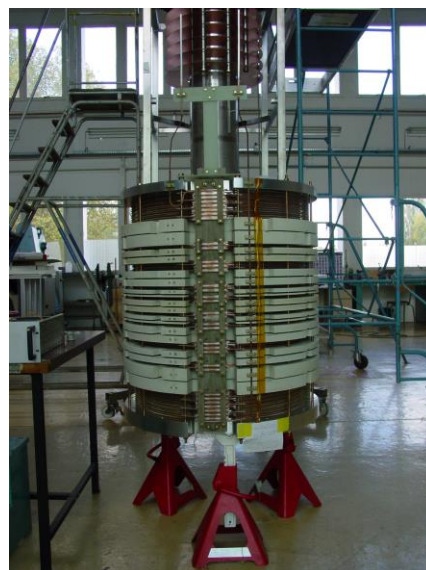
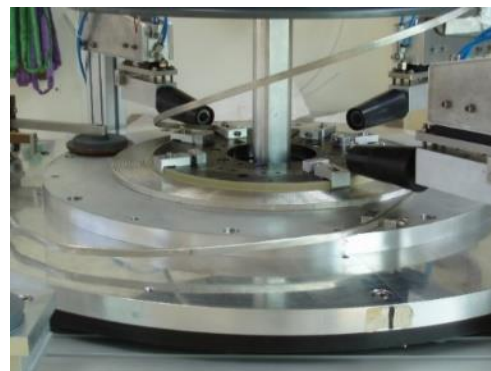
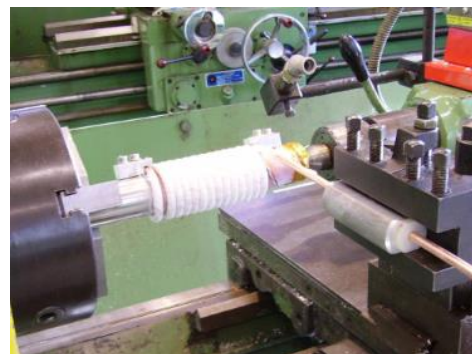
Energie stockée	338 MJ
Inductance	308 H
Courant	1483 A
Longueur	5.2 m
Diamètre	5 m
Masse	132 t



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 :

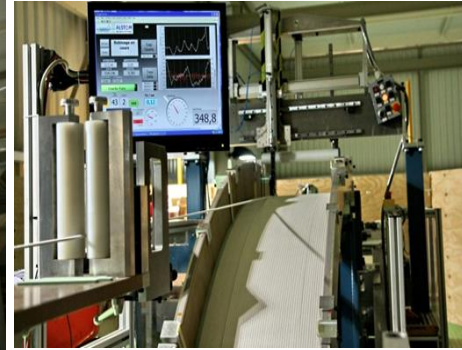
- **170 « double-galettes »** dans la bobine principale
- **2 bobines de blindage** pour limiter l'extension du champ magnétique
- Conducteur NbTi @ **1.8K (He II superfluide)**
- Aimant fonctionnant directement sur **alimentation externe**



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



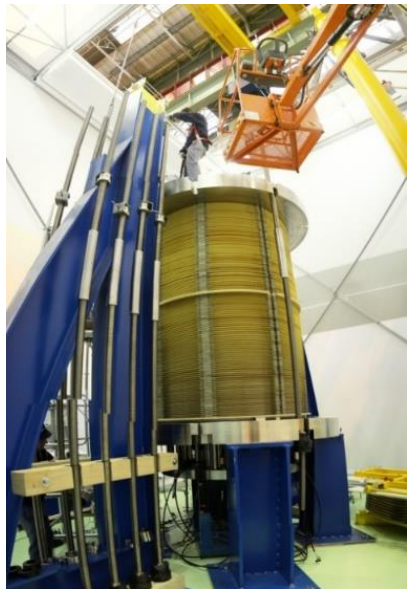
*Bobinage des double-
galettes (DG)*



*Fabrication des bobines
de blindage*



Intégration bob. principale / bob. de blindage



Empilage des 170 DG



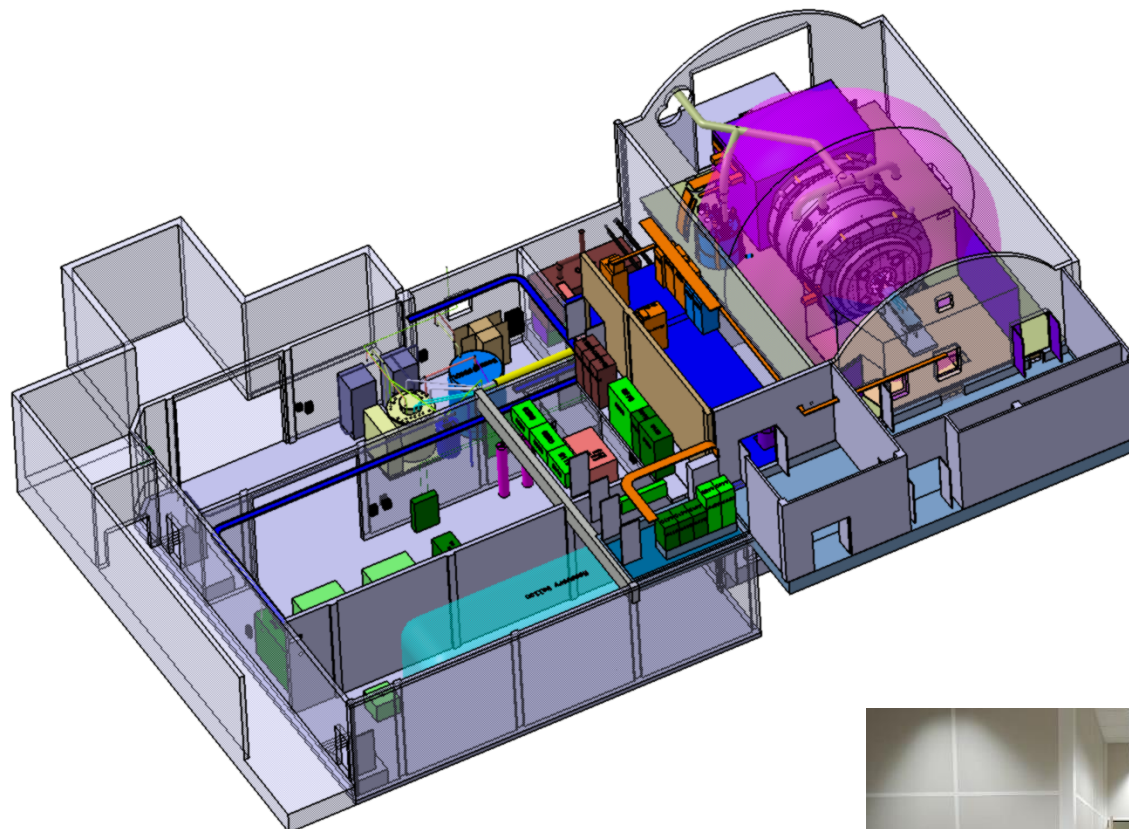
*Pose de la super-
isolation*



Fermeture enceinte à vide



Alimentations



Circuit vide



MCS/MSS/DAQ



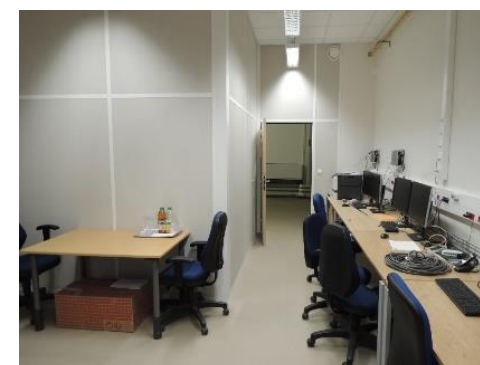
Boîte froide



Batteries 48V



Amenées de courant

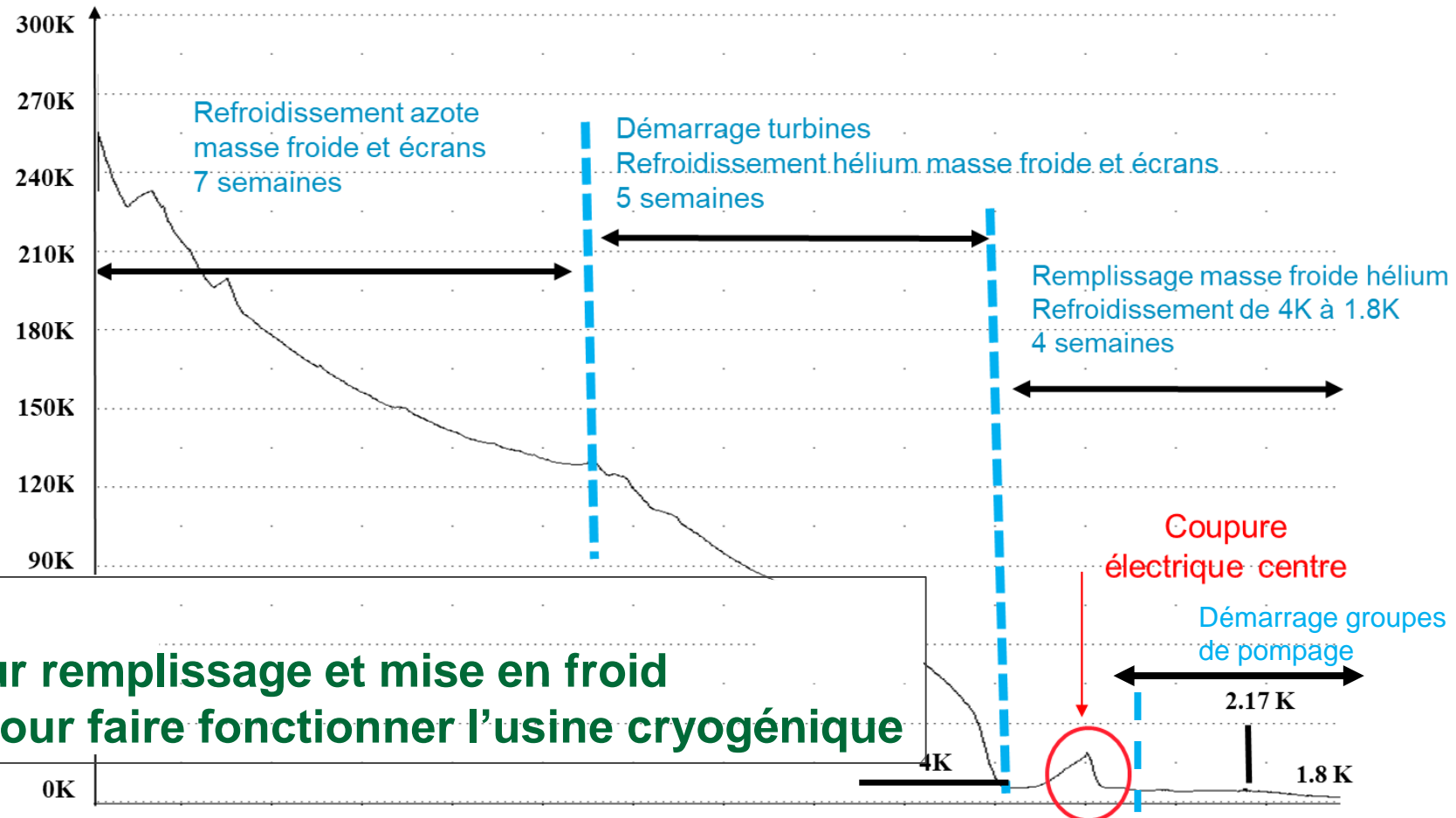


Salle de contrôle



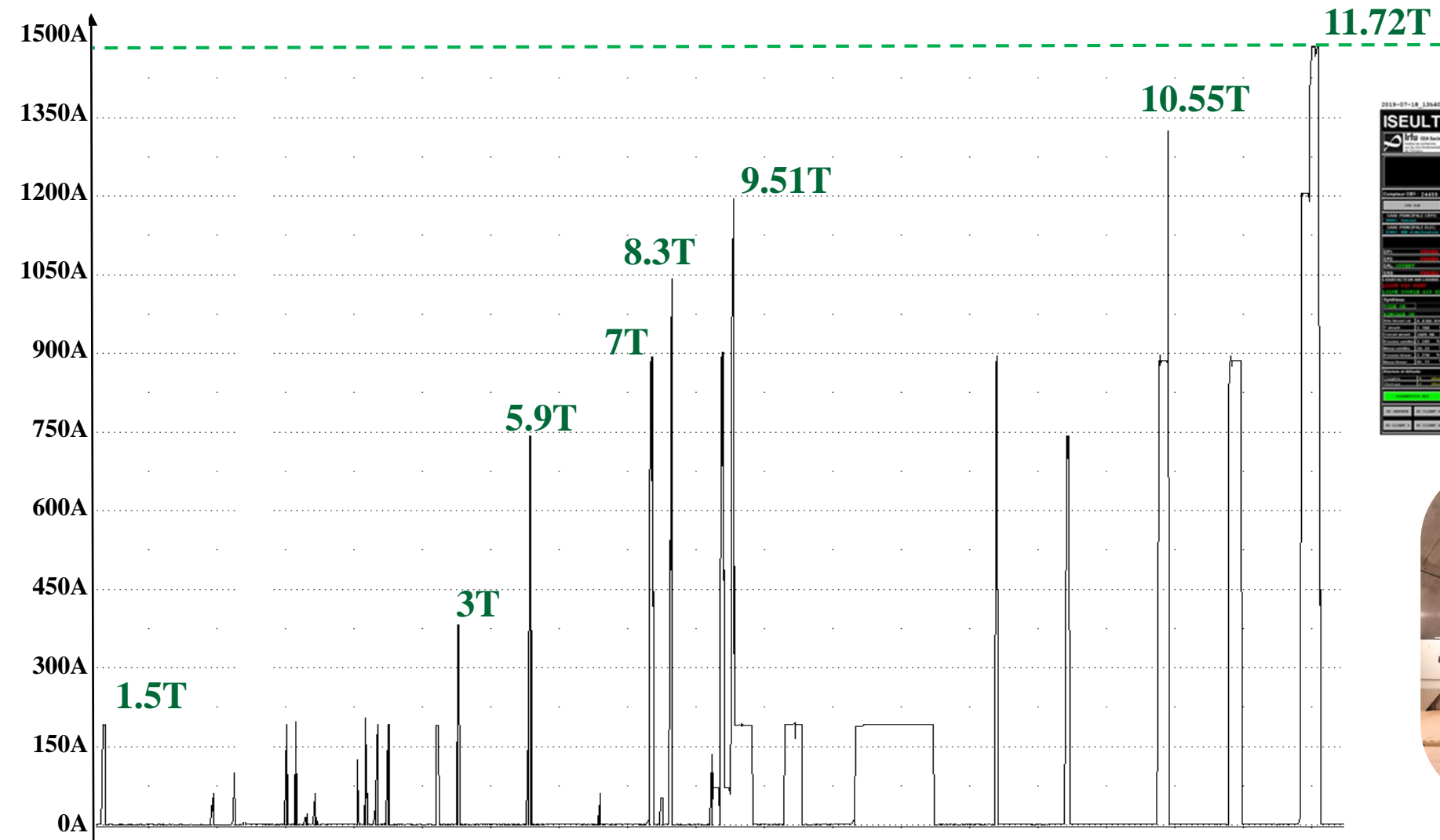
Résistance de décharge

- 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)



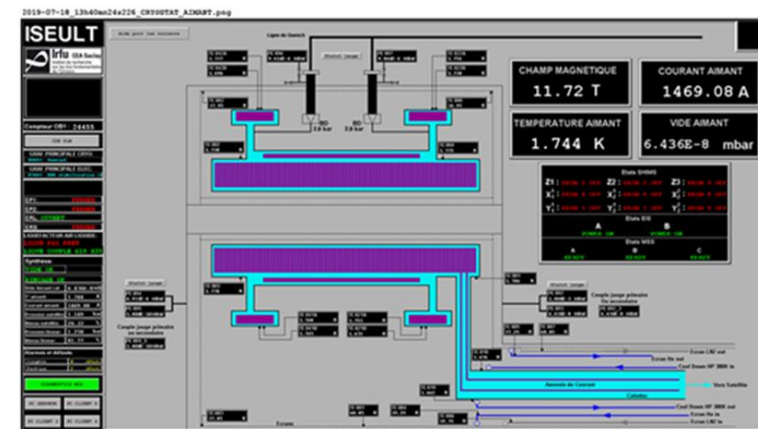
250 000 L azote
18 500 L hélium pour remplissage et mise en froid
150 kW électrique pour faire fonctionner l'usine cryogénique

Courant



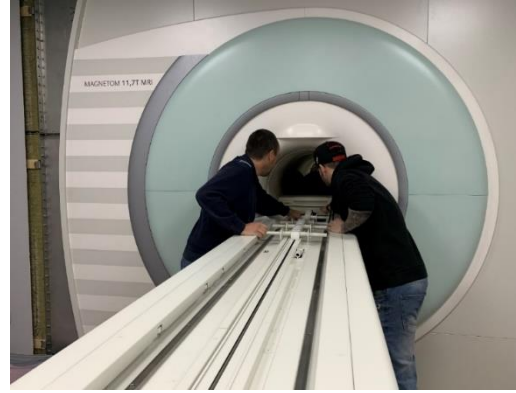
21 Mars 21, 2019

18 Juillet 2019

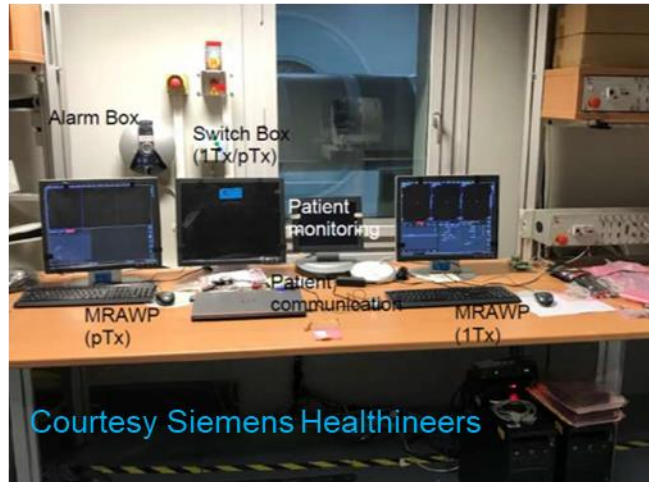




Gradient coil insertion

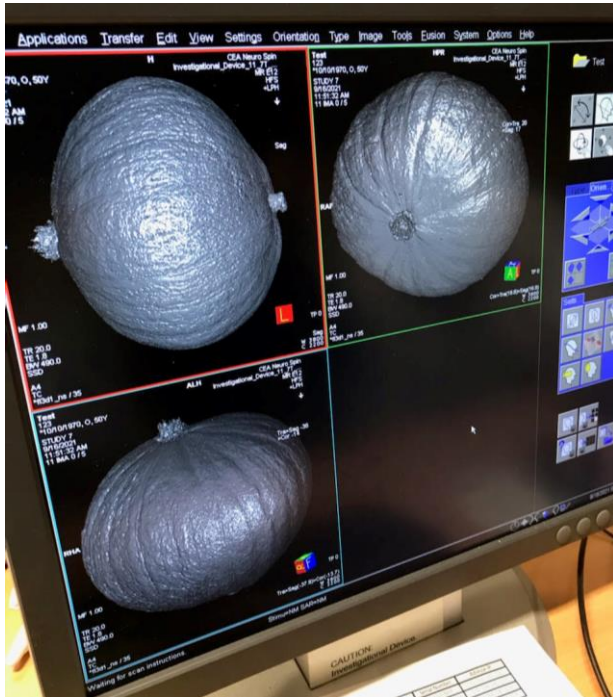


- Mise en service de la haute disponibilité (plus de 1300 tests de défaillance)



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



5 hours of acquisition
0.4 mm of resolution

5 hours of acquisition
0.4 mm of resolution

EVOLUTION DU PARC IRM CORPS-ENTIER (WB) 2001-2022

2001

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



11.7T Bethesda



11.7T Saclay



11.7T Séoul



10,5T Minneapolis

- 11.7T
- 10.5T
- 9.4
- 8T

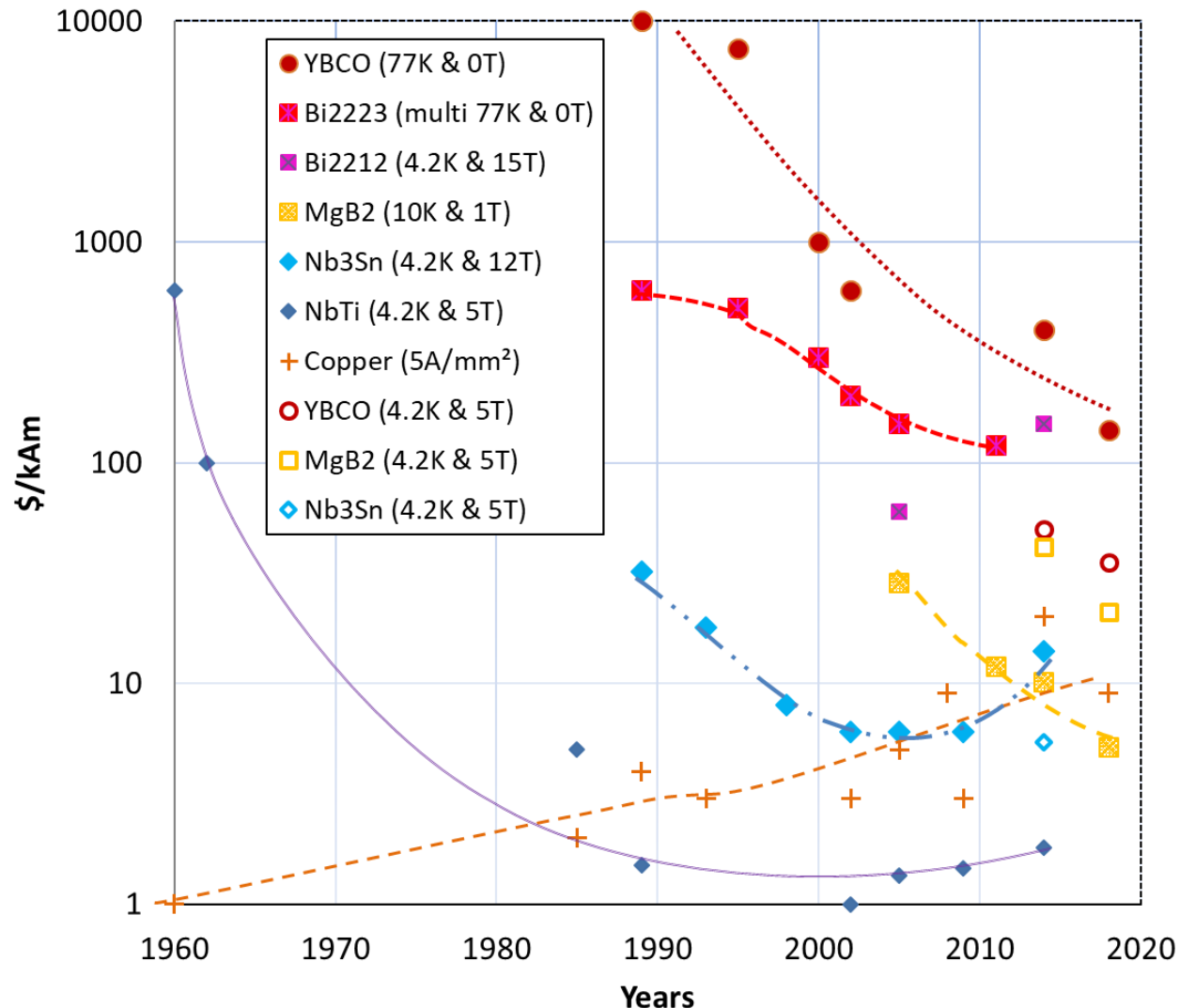
2022

- 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)



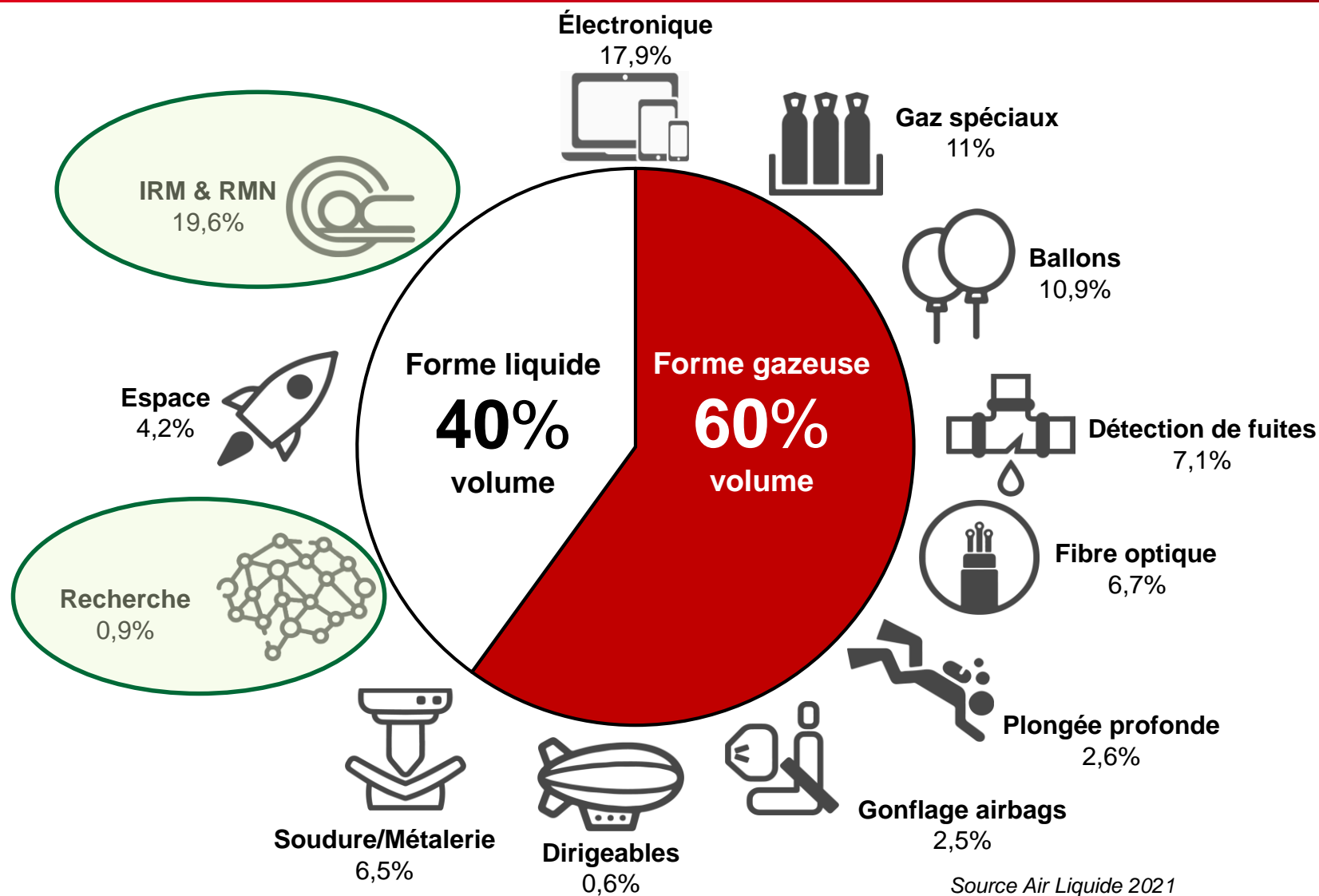
DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS DONT LE COÛT BAISSE



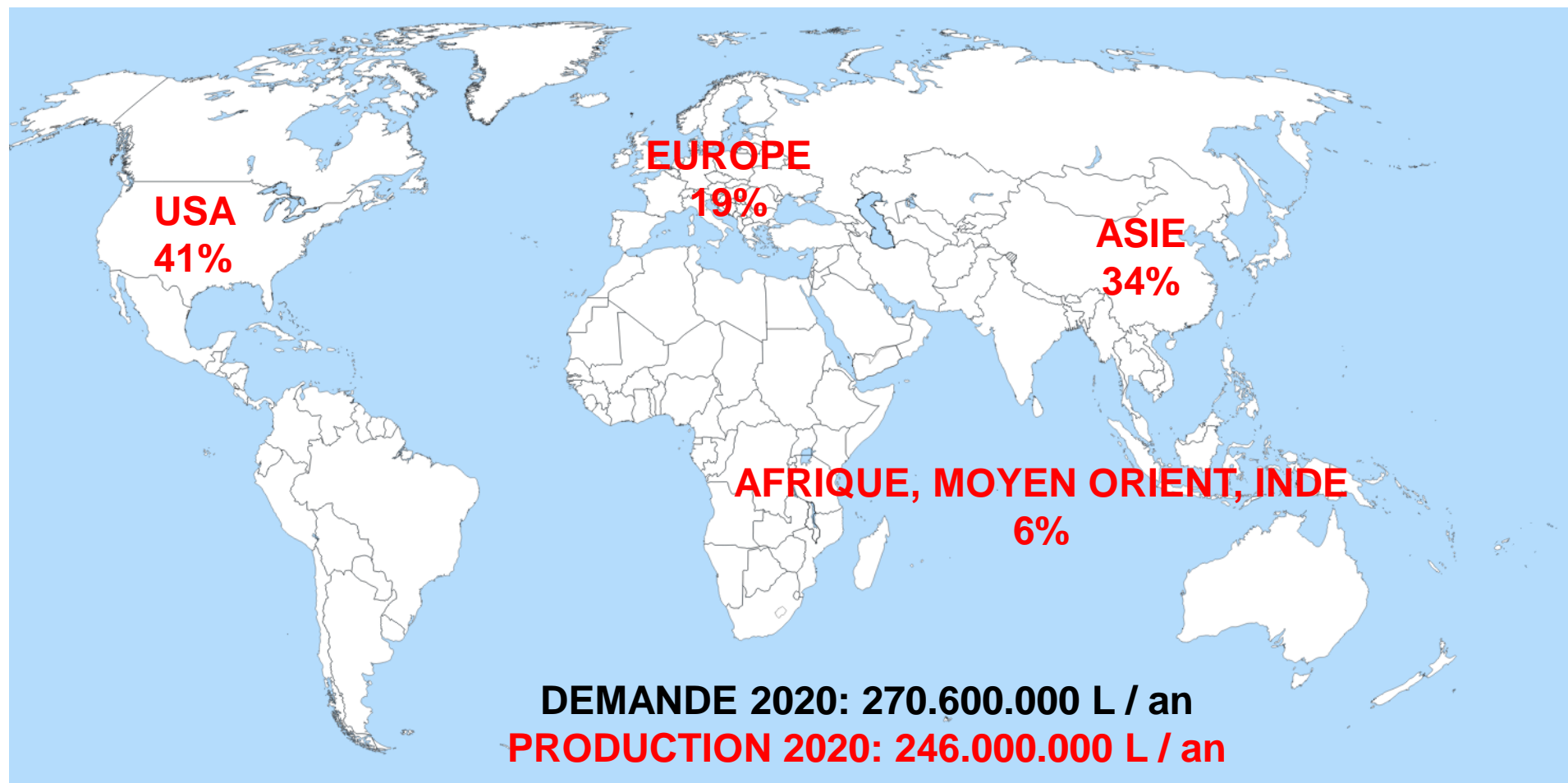
Courtesy C. Berriaud

- 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 Nb3Sn (\$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**

INCONTOURNABLE HELIUM!

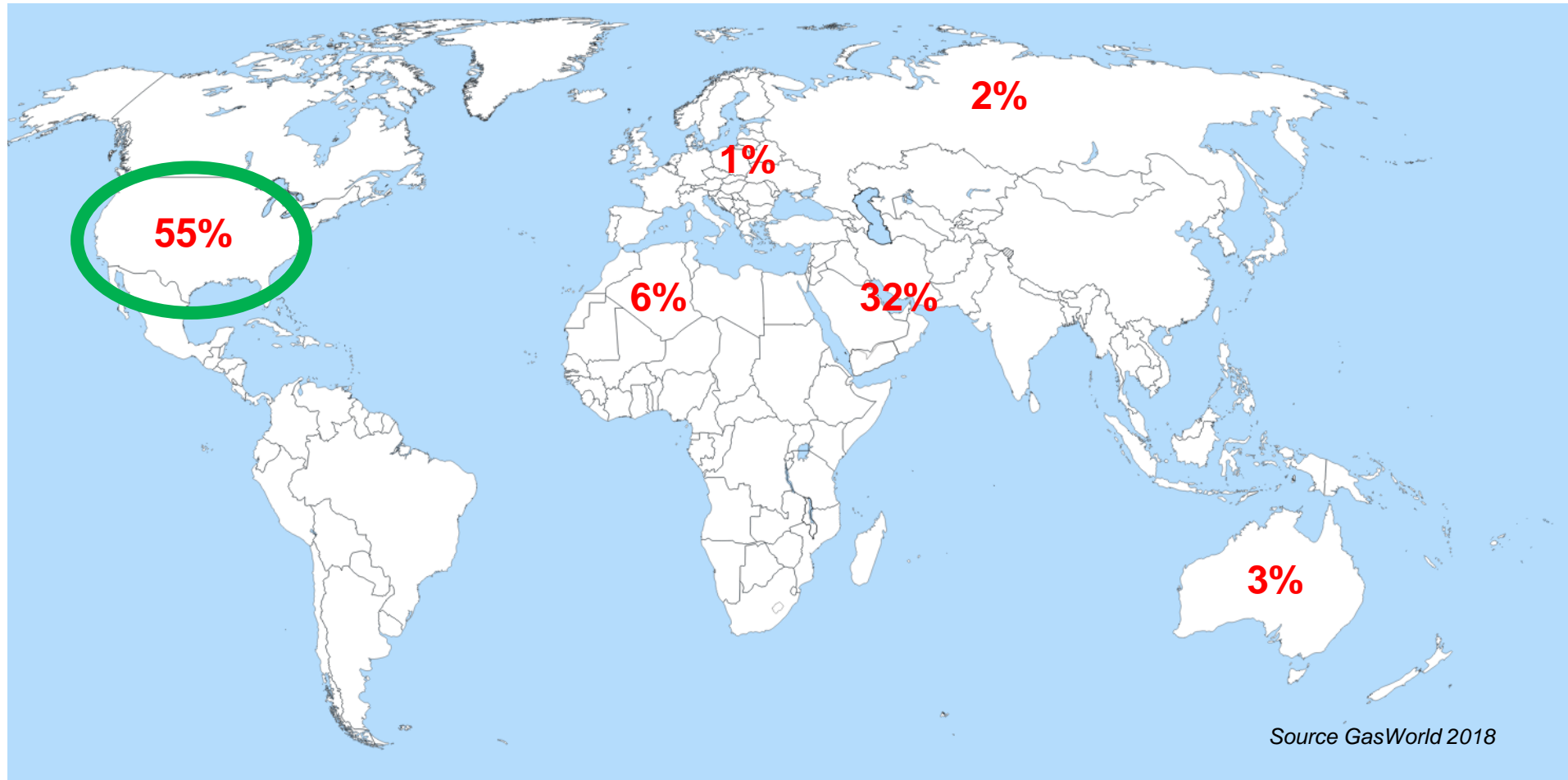


MAIS UNE DEMANDE CROISSANTE, ET UNE PRODUCTION INSUFFISANTE



Courtesy
G. Authelet

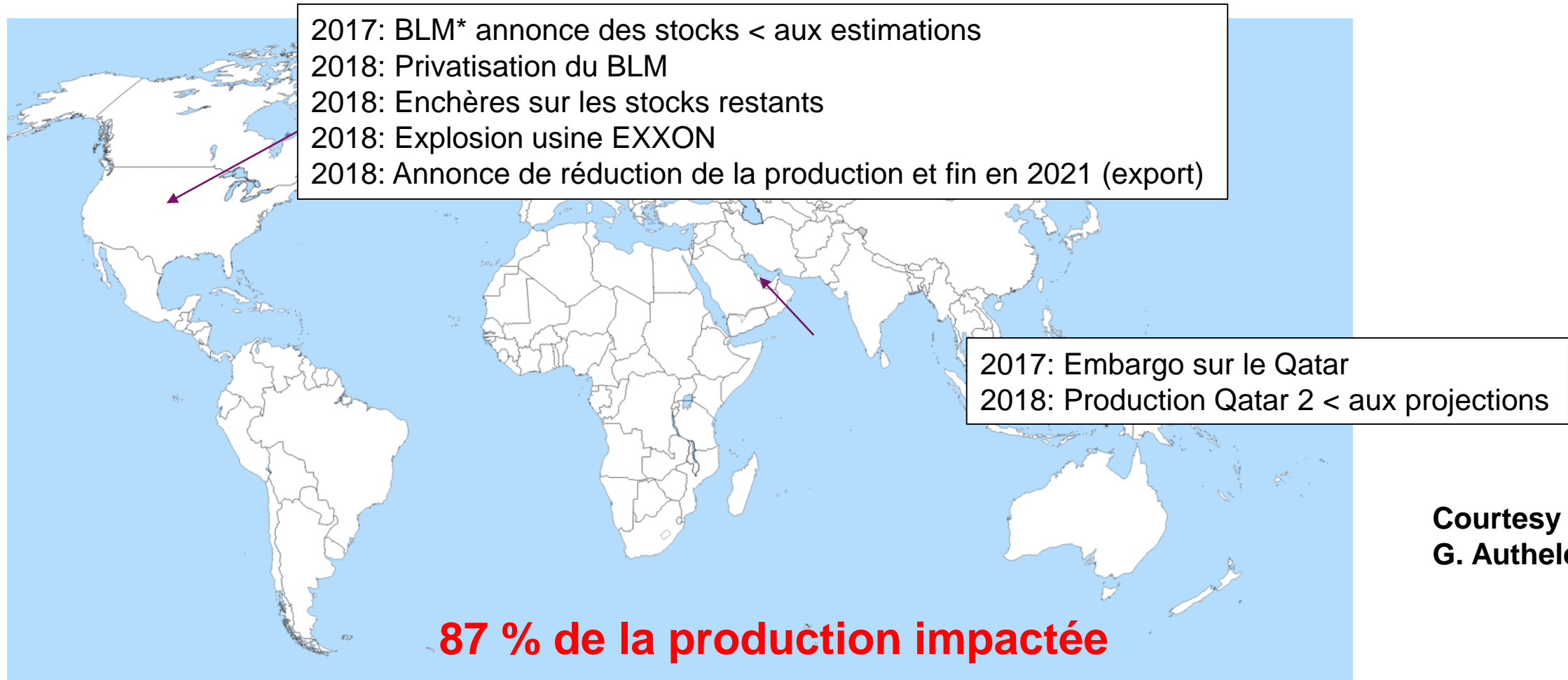
Source Air Liquide 2021, Edison Investment Research



Courtesy
G. Authelet

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

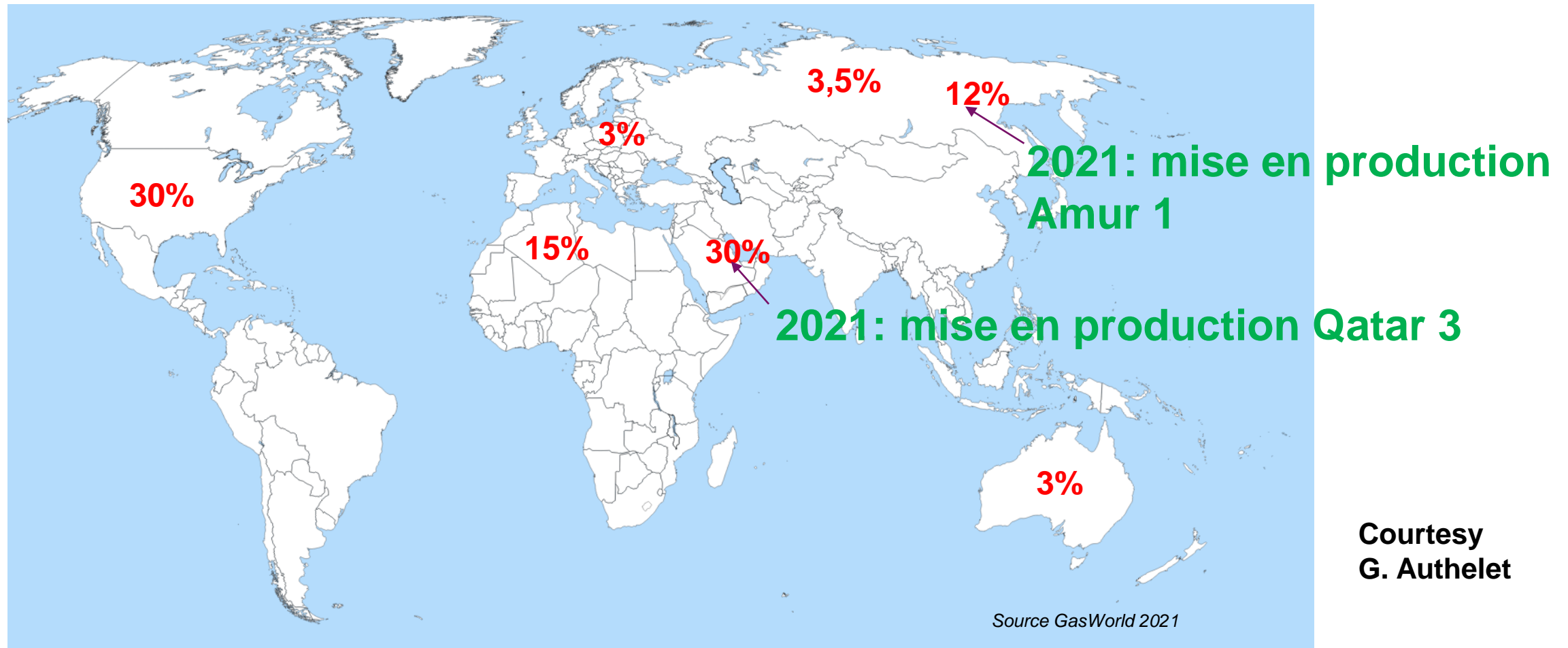
Une période 2017 – 2018 très compliquée



Courtesy
G. Authelet

*BLM = Bureau of Land Management

Sources Air Liquide, Air Product

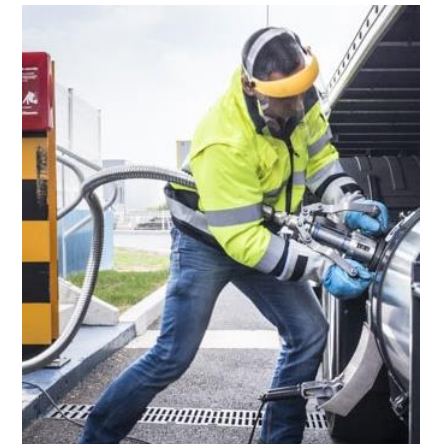
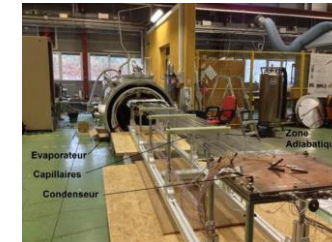
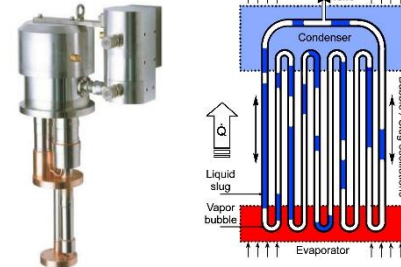


C'est un peu mieux, avec deux nouvelles usines en service

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

Les USA vont devenir importateurs d'hélium.

- 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!

- 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 Nb₃Sn 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 Nb₃Sn 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 Authelet, 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 Rochepault, Thierry Schild et Pierre Védrine pour leur avoir emprunté quelques transparents!