



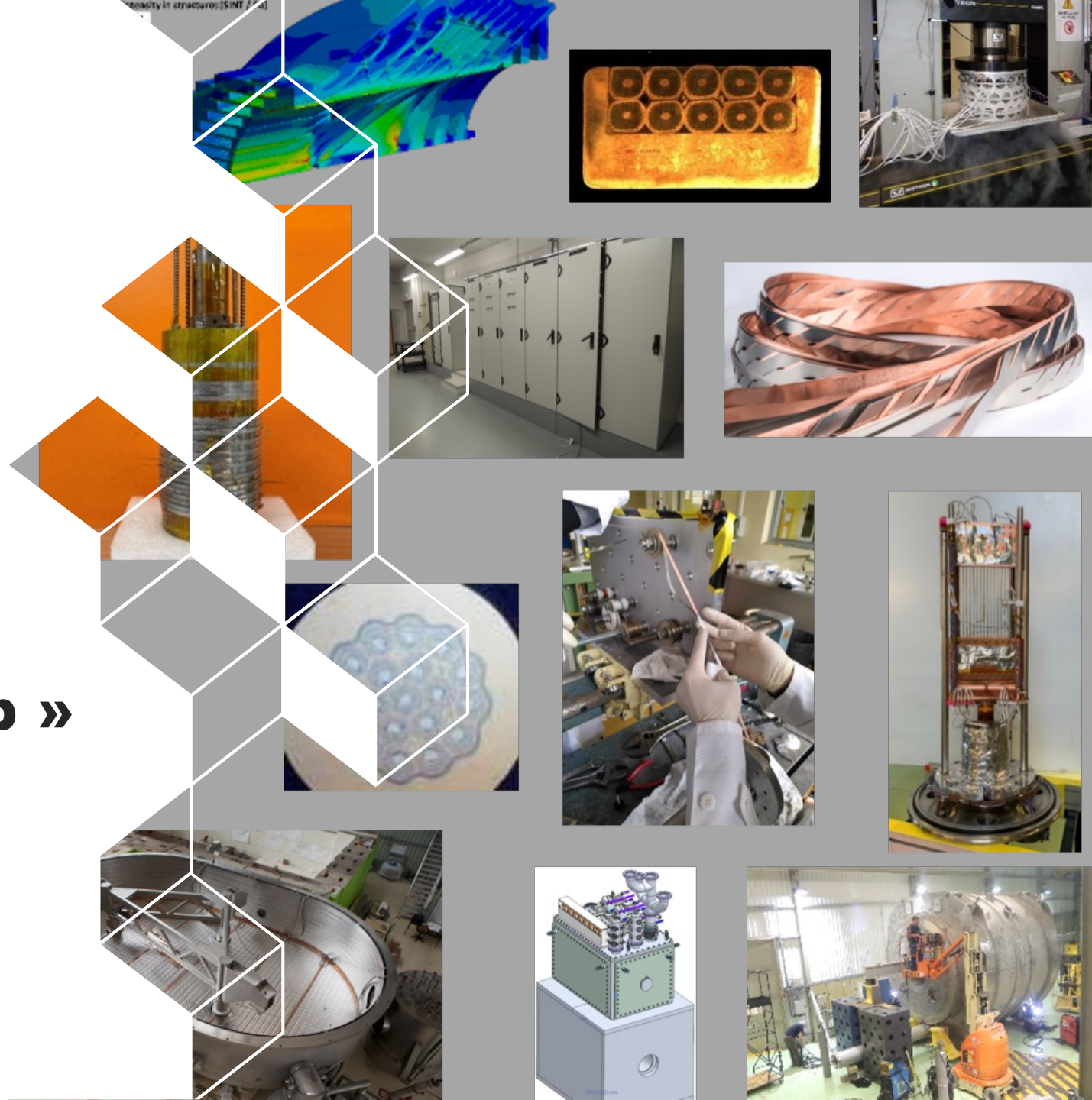
irfu



« Les aimants à haut champ »

Lionel Quettier

Journée P2I - 9 janvier 2024



Le champ terrestre



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



Aimant permanent
(NdFeB, 0.5T)

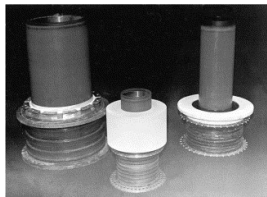


Dipôle LEP
Resistif (2T)



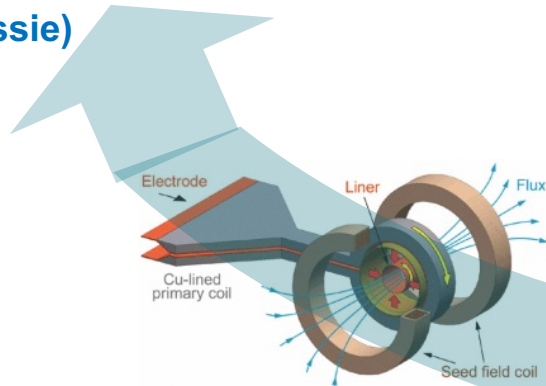
IRM Magnetom
Siemens (7T)

Qu'est qu'un aimant à haut champ?

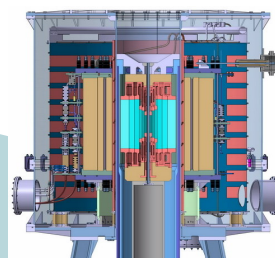


Dipôle LHC
(8.3T)

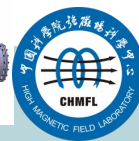
VNIIEF MC-1 (Russie)
2800T



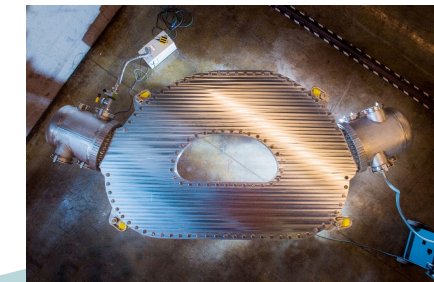
ISSP (Japon)
(750T)



CHFML Hefei (Chine)
Aimant hybride (45,2T)



RMN Bruker 1.2 GHz
(28.2 T)



SPARC (fusion)
(20T)

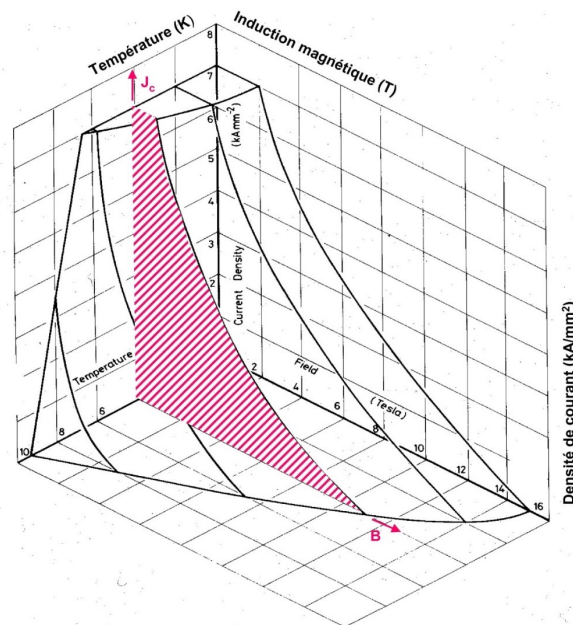
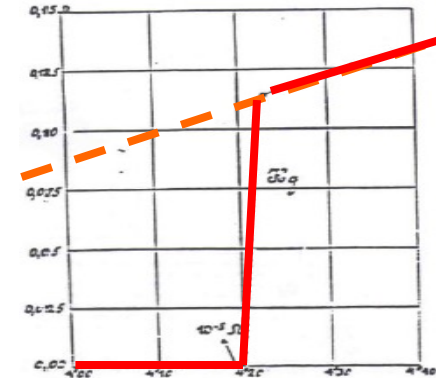


IRM Iseult
(11.7T)

INCONTOURNABLE SUPRACONDUCTIVITÉ

Gilles Holst, étudiant de Kamerlingh Onnes écrit dans une courte note à la Royal Academy of the Netherlands en avril 1911 :

... thus the mercury at 4.2 K has entered a new state, which, owing to its particular electrical properties, can be called the state of superconductivity...

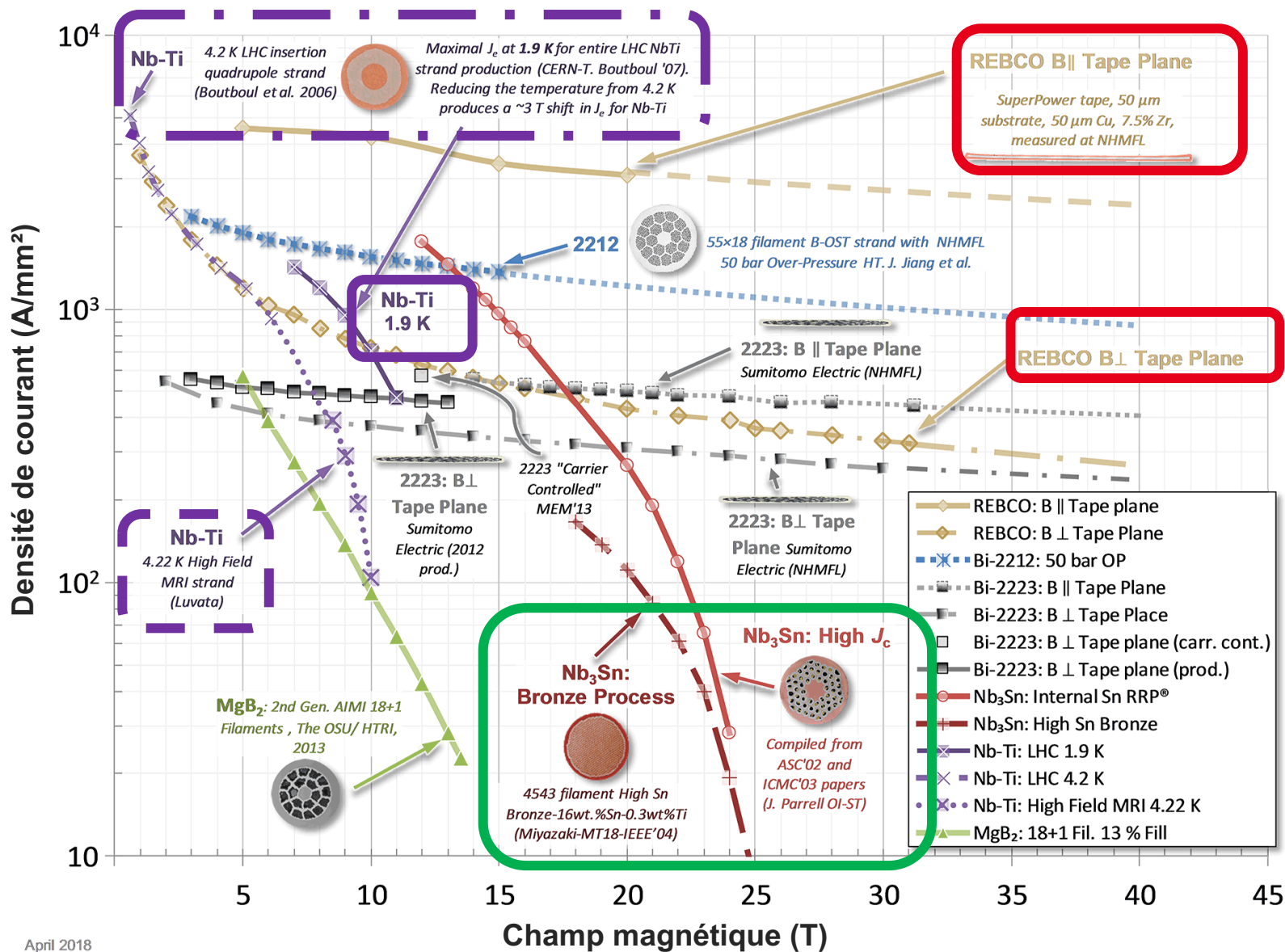


La loi d'Ohm n'est plus une contrainte!

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
- Bi 2223/Bi 2212 around 100K
- REBCO >70K**

High field superconductors (Nb₃Sn, REBCO, Bi-2212, Bi-2223, ...) are brittle materials and stress/strain sensitive
HTS are sensitive to field orientation

LES DÉFIS DES AIMANTS À HAUT CHAMP



Très fort champs, très forts courants, grande zone utile, énergie stockée très élevée, très fortes contraintes mécaniques...

La supraconductivité nécessite des très basses températures

Besoin de systèmes cryogéniques complexes qui doivent être mieux optimisés (plus compact, autonome, consommation minimum...)

Protection en cas de quench (perte brutale de l'état supraconducteur)

- Détecter rapidement l'apparition d'un quench
- Dissiper l'énergie stockée dans l'aimant
- Gérer les brusques variations de températures et les tensions qui apparaissent dans les bobines

Et surtout, la mécanique!!

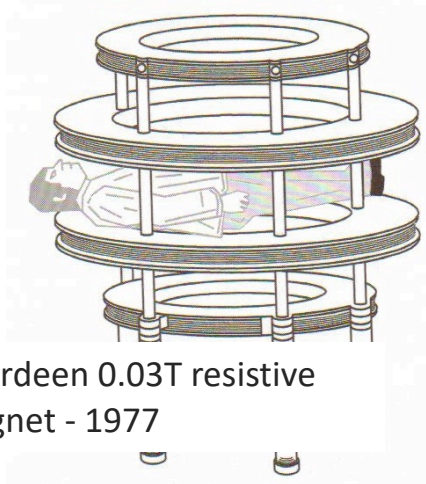
- Gestion des contraintes mécaniques et des déplacements

$$\left. \begin{array}{l} F \propto B^2 \\ w \propto \frac{B}{J} \end{array} \right\} \longrightarrow \sigma \approx \frac{F}{w} \propto JB$$

QUELQUES EXEMPLES

- Les aimants d'IRM
- Les aimants hybrides
- Les aimants pour la fusion
- Les aimants pour la physique des hautes énergies

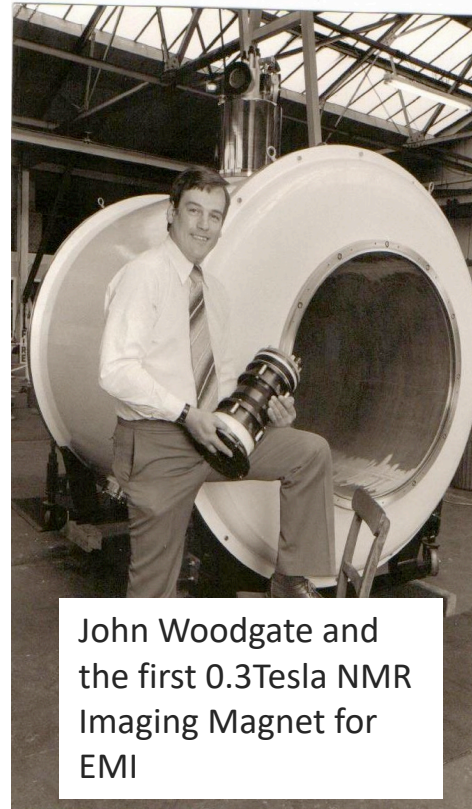
IRM ET AIMANTS SUPRACONDUCTEURS 1977 - 1981



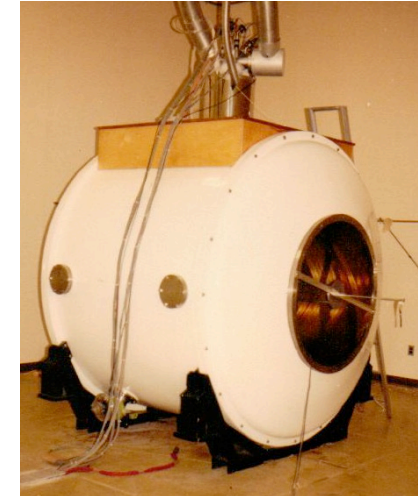
Aberdeen 0.03T resistive magnet - 1977



0.15T Resistive magnet - 1980



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



First 1.5Tesla magnet (STAR) - 1983

Courtesy G. Gilgrass

LES IRM À HAUT CHAMP

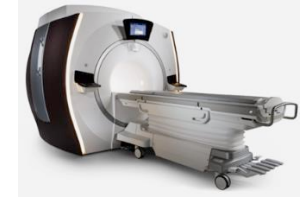
- Le standard pour un IRM corps entier reste à 1.5T, mais le marché s'oriente maintenant vers 3T



Philips Ingenia
Elition 3.0T X



Siemens Skyra



GE Discovery 750w

- Il existe plusieurs systèmes IRM commerciaux à 7T



GE experience, SIGNA 7T



Philips Achieva, 7T



Siemens, Magnetom 7T

- Et quelques systèmes à très haut champ (petite ouverture)



Bruker
9.4T / 200mm
15.2T / 110mm

LES IRM (CORPS ENTIER – WB) À HAUT CHAMP

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

2024

- 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)

L'IRM ISEULT 11.7T

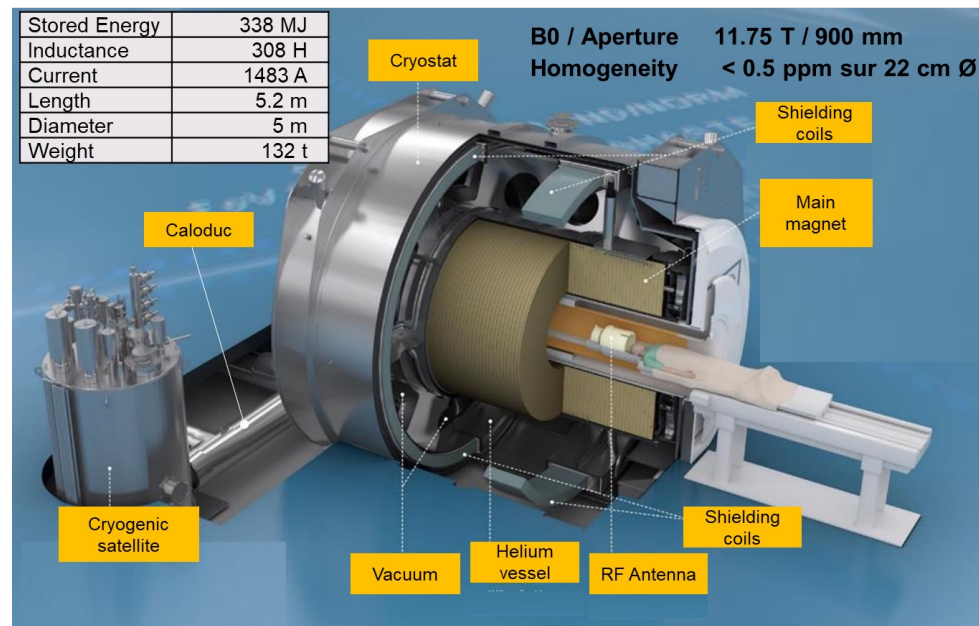
Initiative franco-allemande lancée en 2005 pour développer l'imagerie à haute résolution

- **B0 / Ouverture 11.72T / 900mm**
- **Bobinage en NbTi, refroidissement avec un bain d'hélium superfluide à 1.8 K**



Neurospin, CEA Saclay

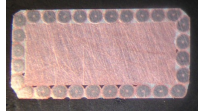
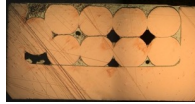
Energie stockée	338 MJ
Inductance	308 H
Courant	1483 A
Longueur	5.2 m
Diamètre	5 m
Masse	132 t



DESIGN ET FABRICATION (2006-2017)

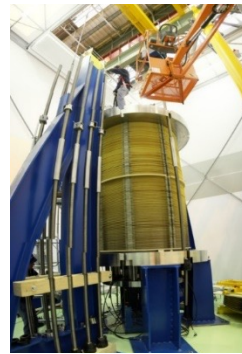
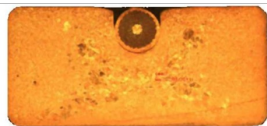
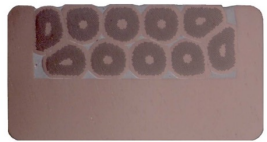


2006 – 2009 :
R&D AND
PROTOTYPES



All new concepts supported by mockups and prototypes
Conductors, winding techniques, mechanics, cryogenics, thermo-hydraulic studies...

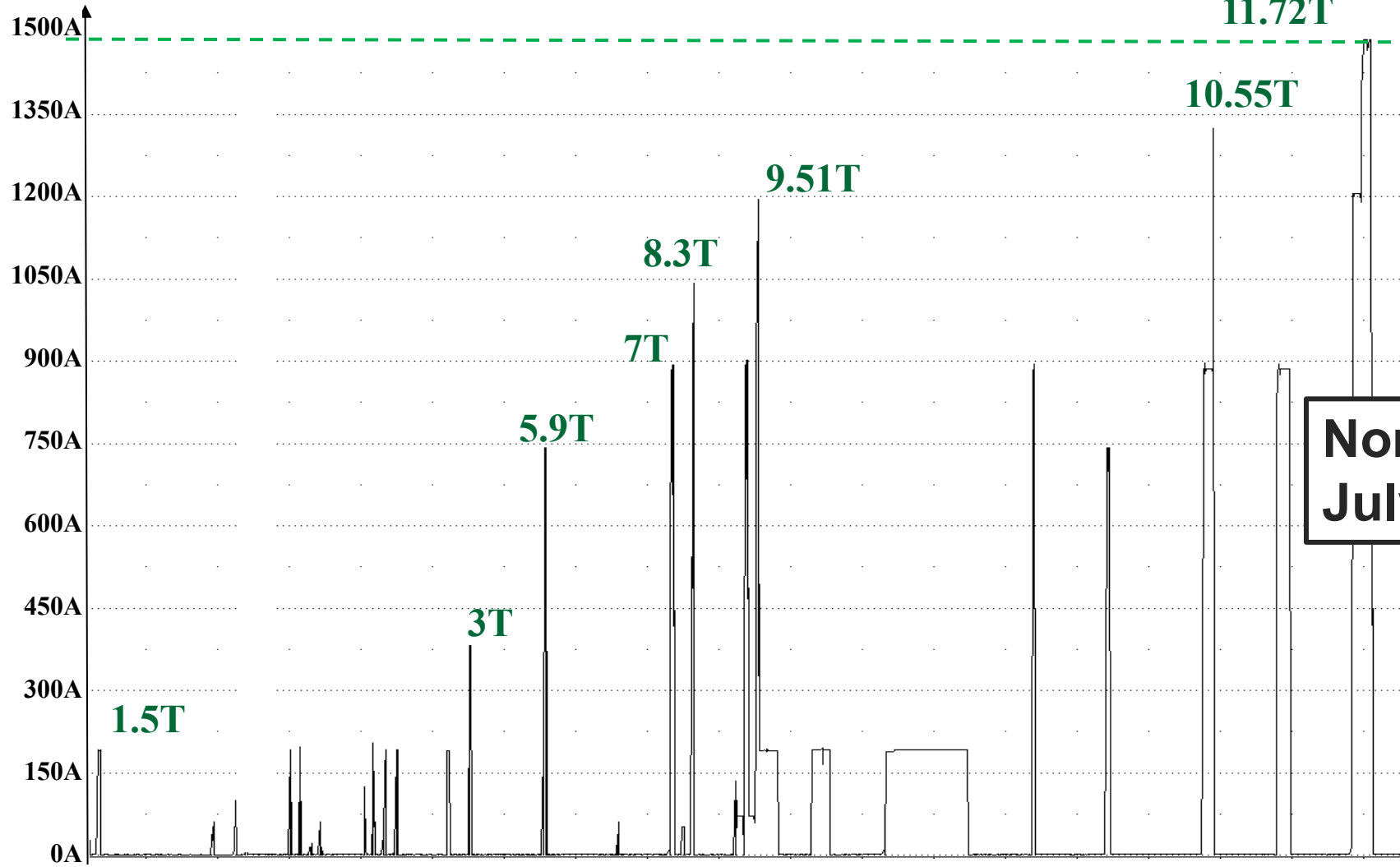
2010 – 2017 : CONDUCTOR AND MAGNET MANUFACTURING (Belfort, France)



MONTEE EN CHAMP

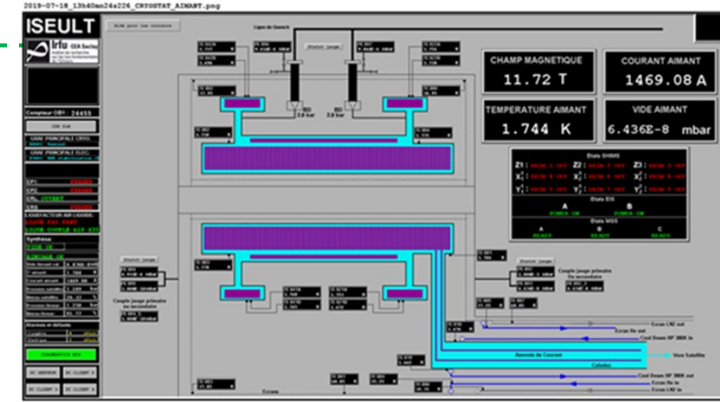


Current

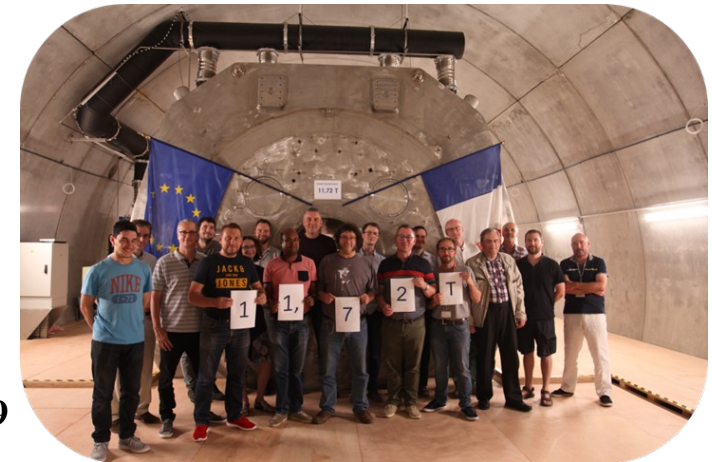


March 21, 2019

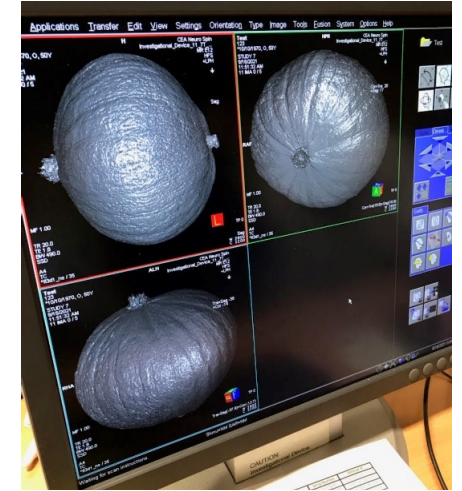
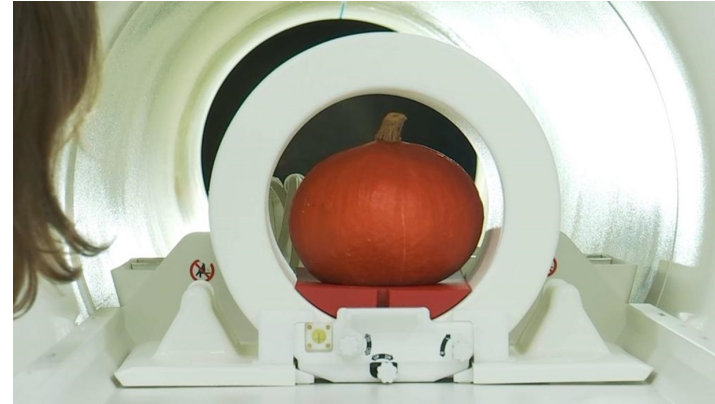
July 18, 2019



Nominal field reached in July 2019 for the first time



LES PREMIÈRES IMAGES



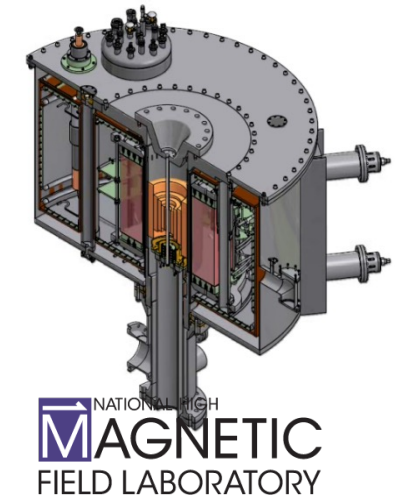
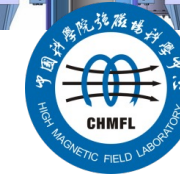
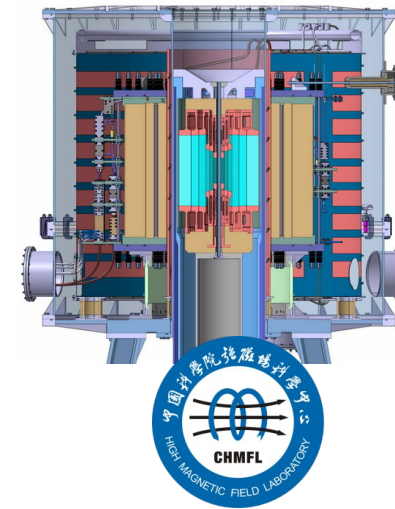
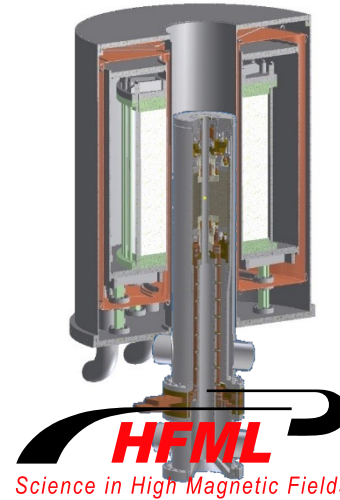
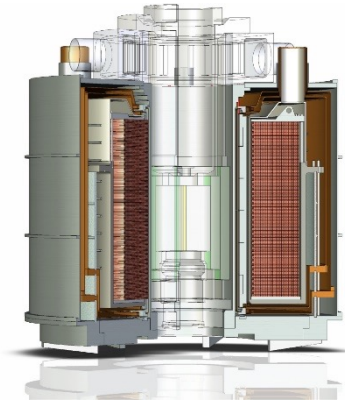
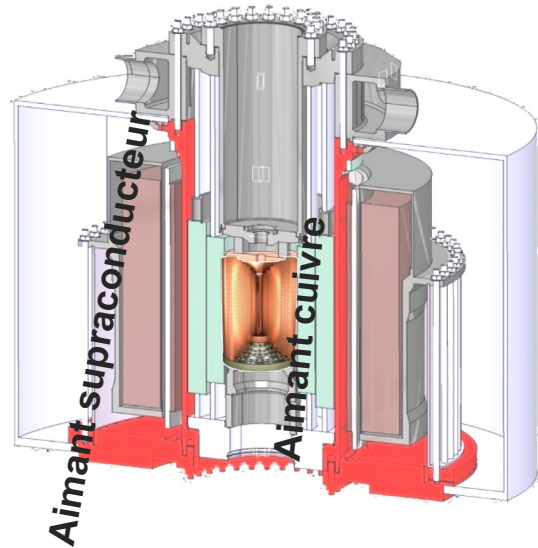
- Première acquisition sur une citrouille en 2022
- 5 heures d'acquisition, resolution de **0.4 mm**

Début des acquisitions sur un premier groupe de 20 volontaires
Les premières images seront officiellement dans quelques semaines



Courtesy CEA/Neurospin/Joliot

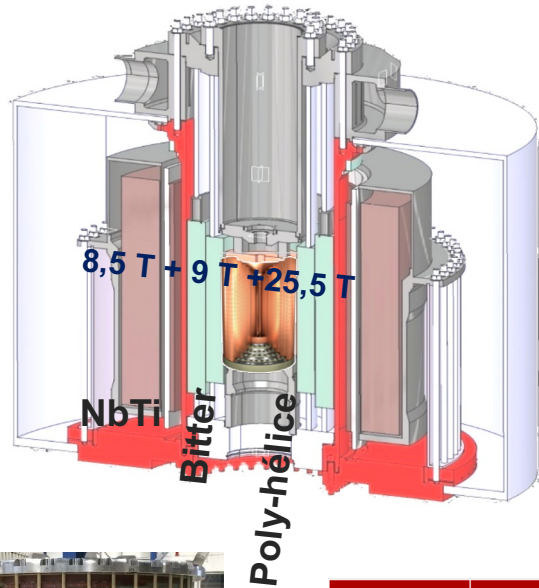
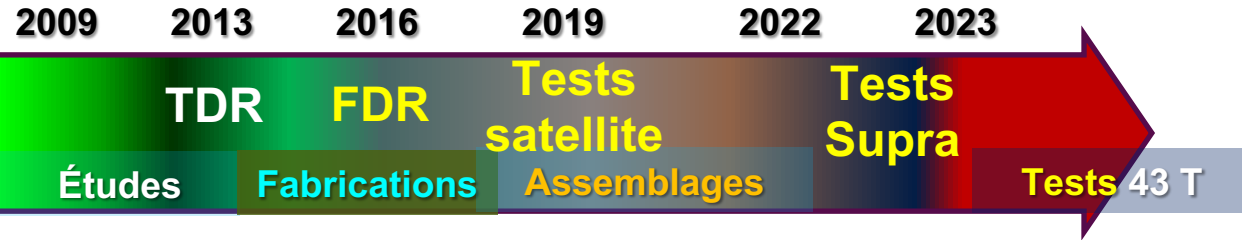
LES AIMANTS HYBRIDES (COMBINAISON AIMANTS RESISTIF + AIMANT SUPRACONDUCTEUR)



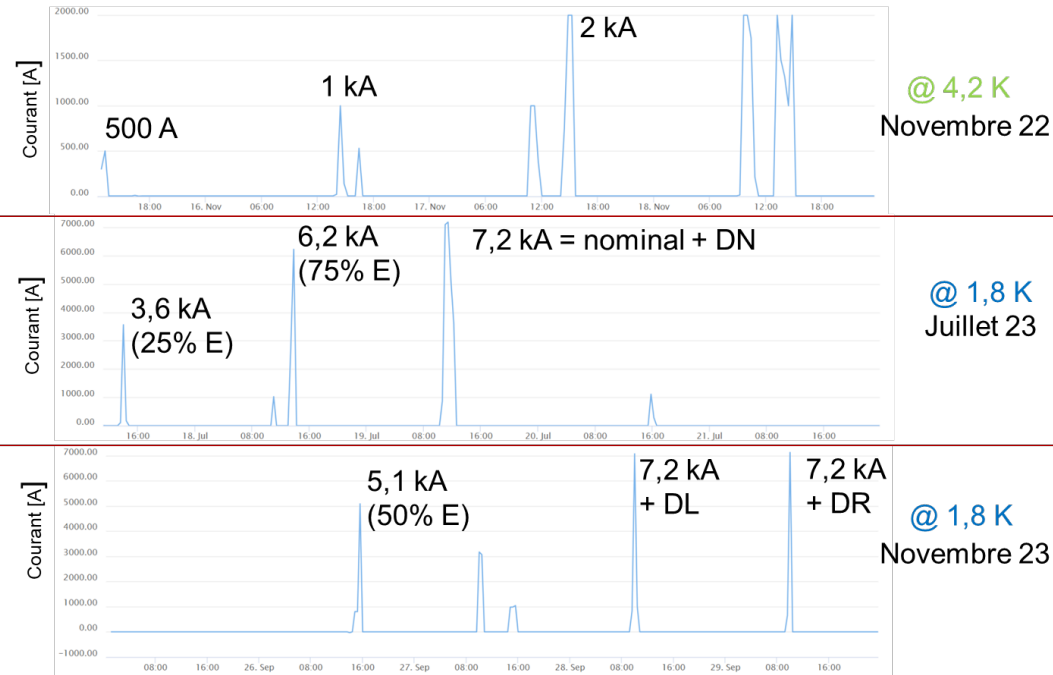
	Pays	France	Pays Bas	Chine	USA (Floride)
Ville		Grenoble	Nijmegen	Hefei	Tallahassee
Supra		NbTi	Nb3Sn	Nb3Sn	Nb3Sn
B_ Supra		8,5 T	12 T	12 T	11,5 T
B_ Résistif		34,5 T	33 T	33 T	33,5 T
B_ Hybride		43 T	45 T	45,2 T	45 T
Ø_interne		34 mm	32 mm	32 mm	32 mm
Puissance		24 MW	21 MW	28 MW	32 MW
T_fonc.		1,8 K	4,2 K	4,2 K	4,2 K
Date de début		2024	2024	2022	2001

L'AIMANT HYBRIDE DU LNCMI

NbTi – 1.8K

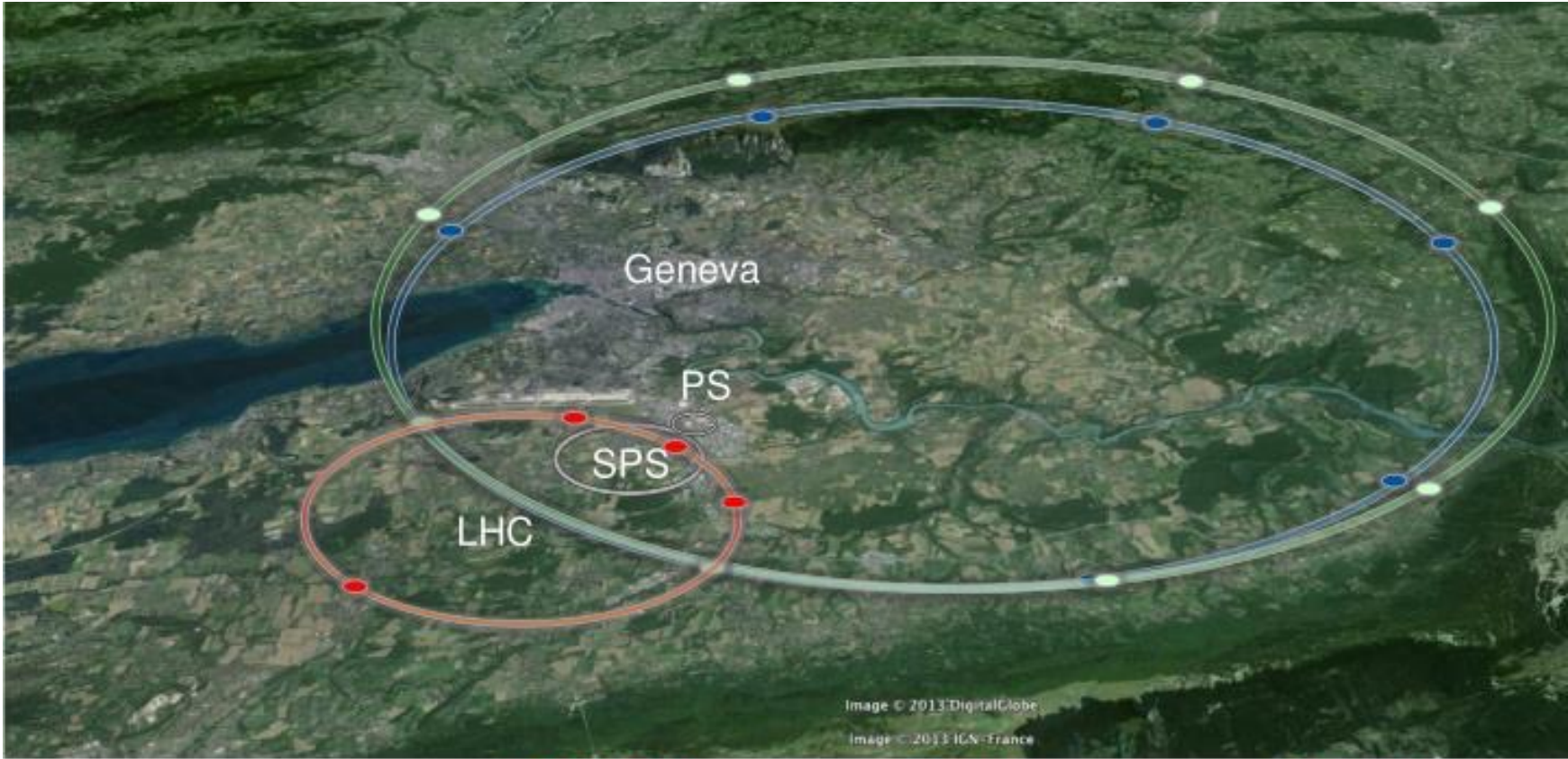


Grandeurs	Valeurs
In [kA]	7,2
Dim [mm ²]	18*13
$\sigma_{0,2\%}$ [MPa]	250
RRR	70
Lg [m]	37*260
Marge [K]	2



- Montée de l'aimant supra à 8,5T pour la première fois en novembre 2023
- Poursuite des tests en 2024, avec la montée des Bitters, puis des polyhélices

LE PROJET “FUTURE CIRCULAR COLLIDER”



Besoin
d'aimants à
haut champ
 Nb_3Sn ou HTS

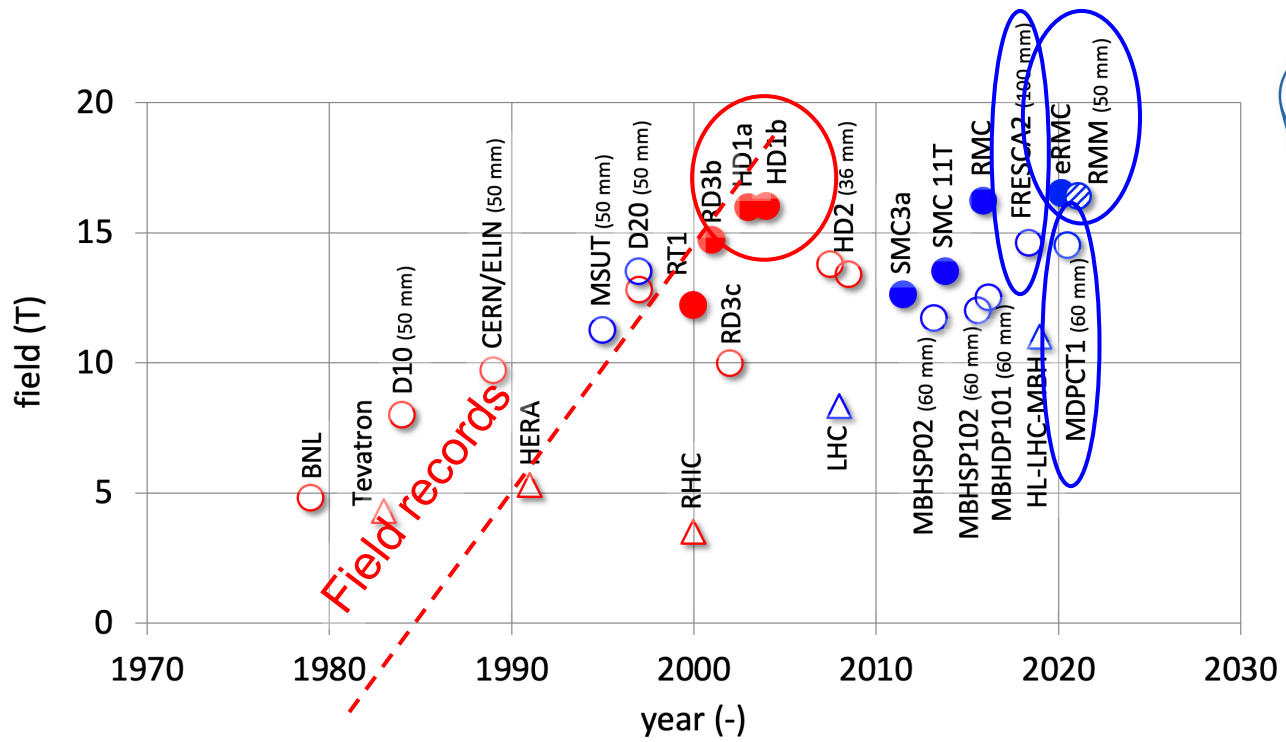
LHC
27 km, 8.33 T
14 TeV (c.o.m.)

HE-LHC
27 km, **20 T**
33 TeV (c.o.m.)

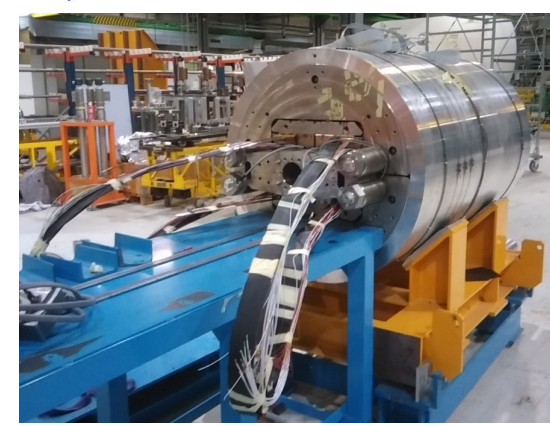
FCC-hh
80 km, **20 T**
100 TeV (c.o.m.)

FCC-hh
100 km, **16 T**
100 TeV (c.o.m.)

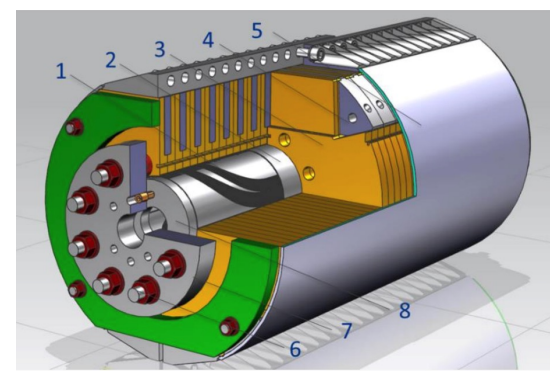
“Hall of Fame” Dipôles Nb₃Sn (objectif 16T)



2018: FRESCA2
(14.6 T at 1.9 K, 100 mm)



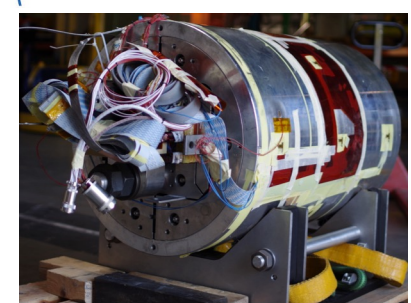
2020: MDPCT1
(14.5 T at 1.9 K, 60 mm)



2003: LBNL HD1
(16 T at 4.2 K)

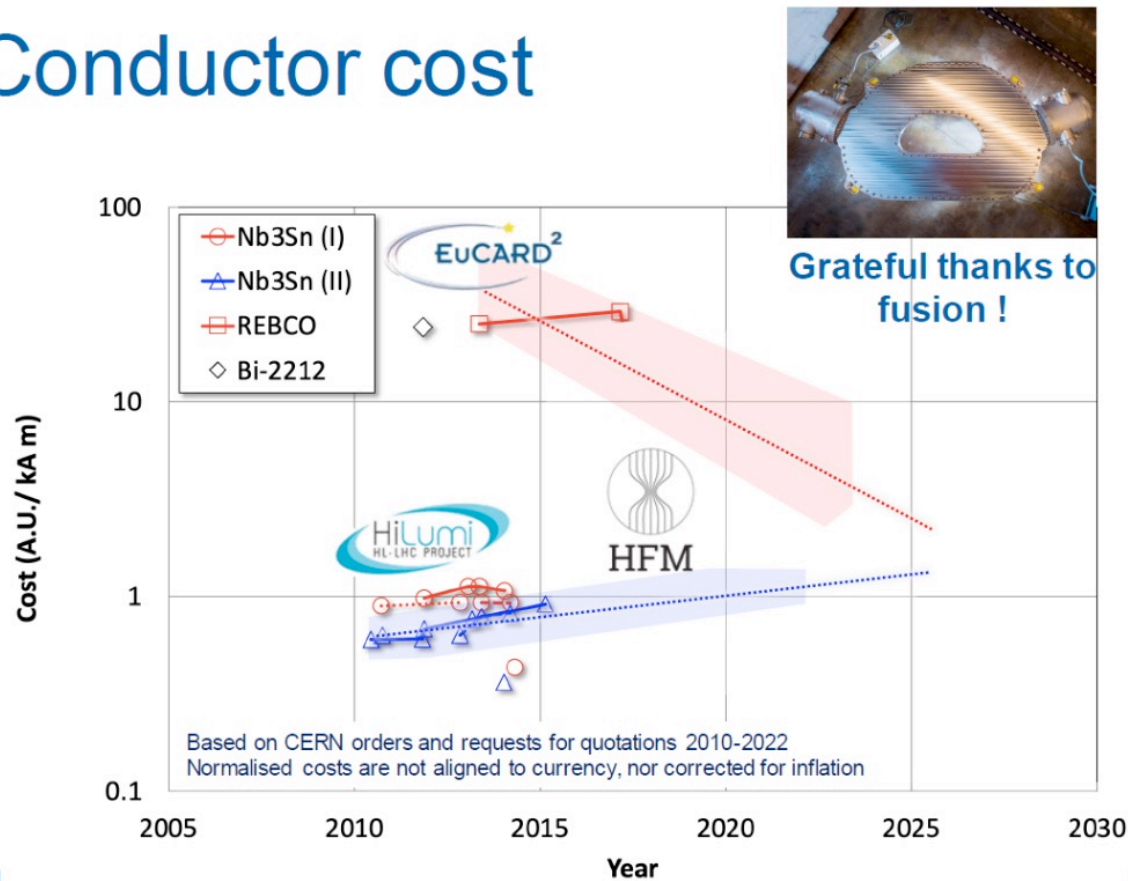


2020: CERN eRMC
(16.5 T at 1.9 K)



LE COÛT DES HTS: UN CHANGEMENT DE PARADIGME!

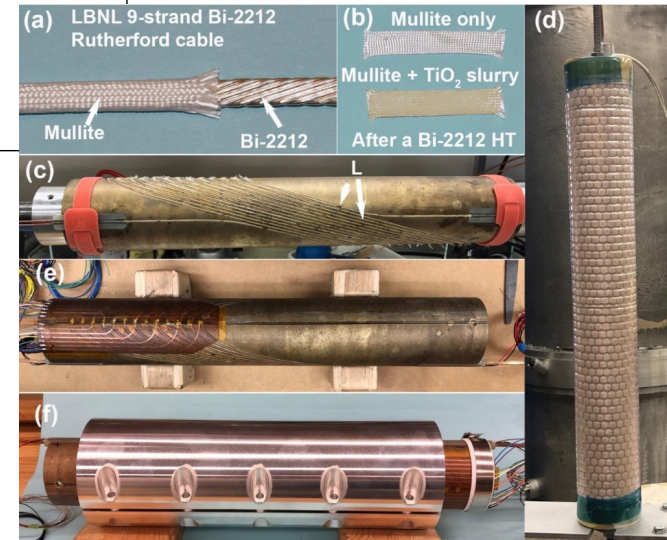
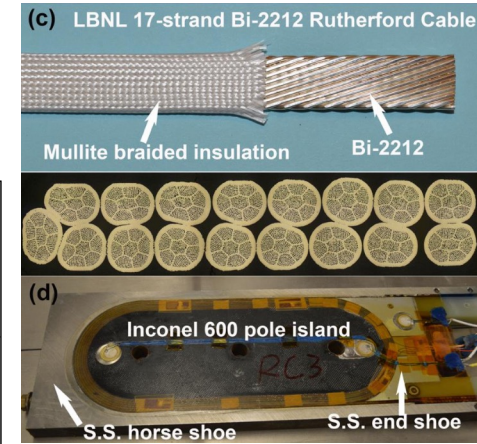
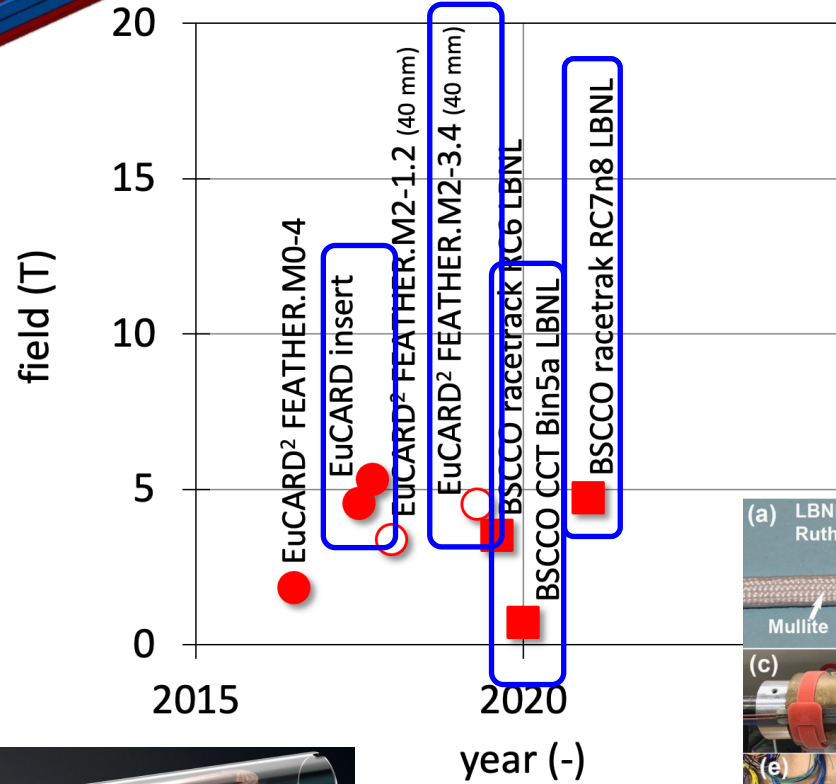
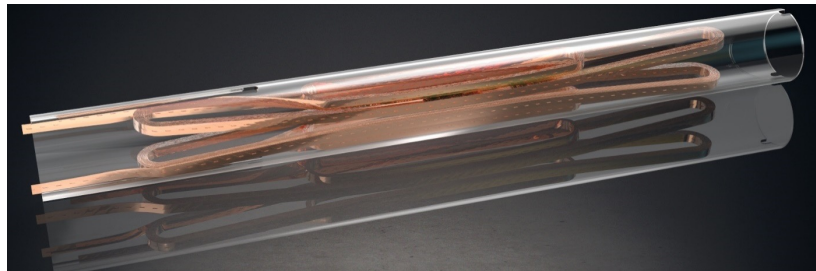
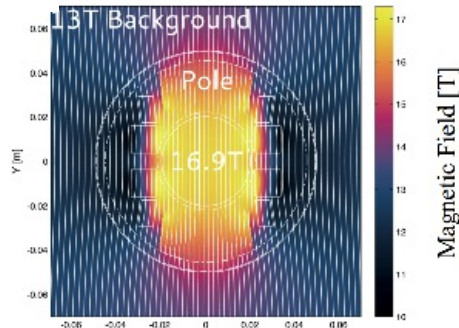
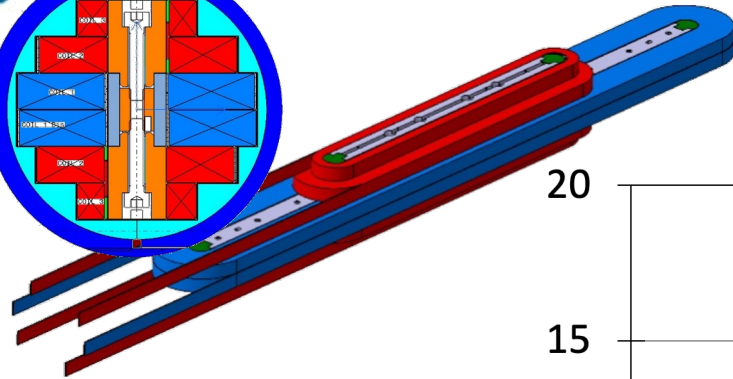
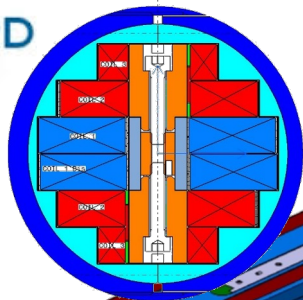
Conductor cost



Courtesy L. Bottura

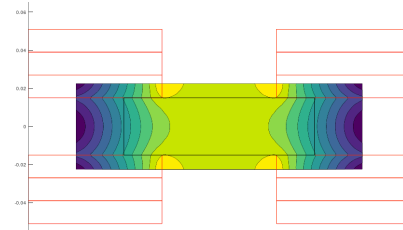
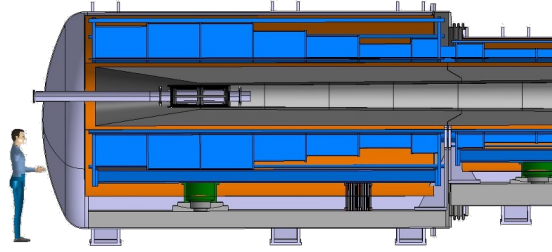
- Les gains en coût / performances ont toujours été liés aux grands projets (physique des particules, fusion) ou au développement du marché des aimants IRM/RMN
- On atteint maintenant un quasi plateau pour le NbTi et le Nb3Sn; impact du coût des matières premières
- Coût des matériaux HTS (ReBCO et BSCCO) encore très élevé mais gain attendu dans les prochaines années

DIPÔLES HTS (OBJECTIF 20 T)



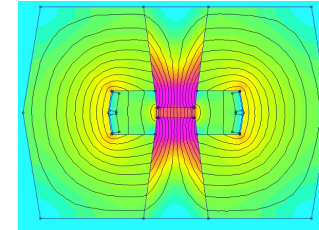
LE MUON COLLIDER

20 T, 200 mm



SC dipole

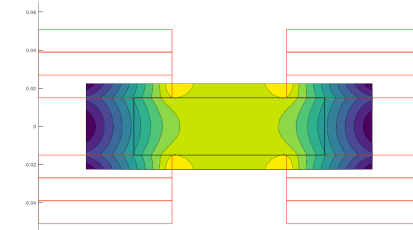
NC ± 1.8 T, 400 Hz
100 mm x 30 mm



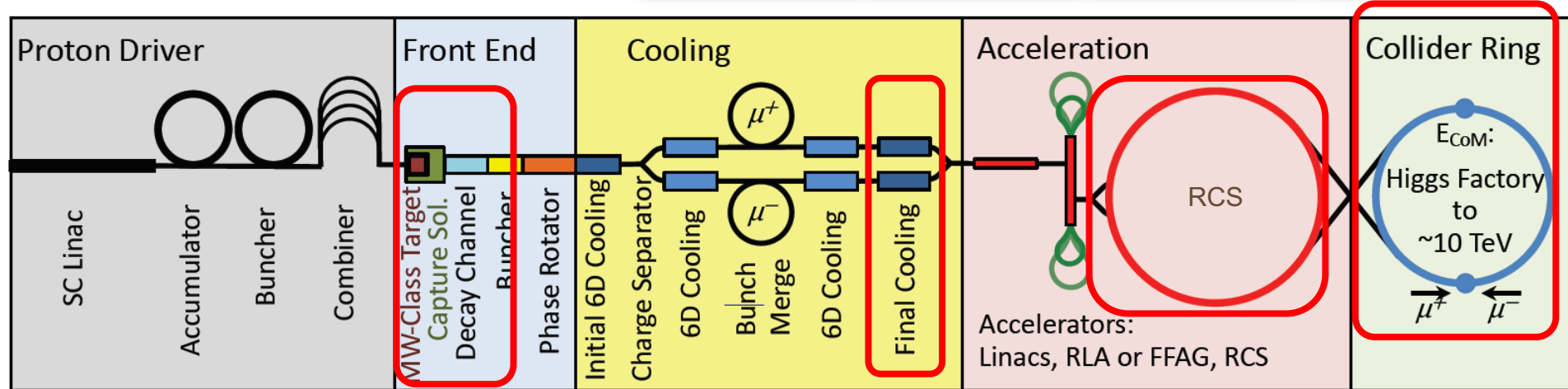
NC dipole

NC dipole

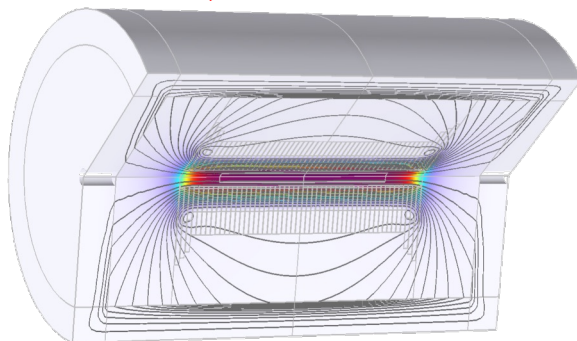
SC < 10T
100 mm x 30 mm



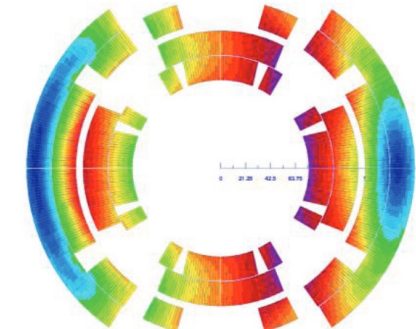
SC dipole



> 40 T, 60 mm

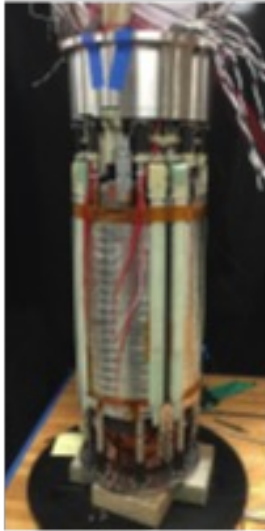


16 T peak, 150 mm



LES (PETITS) SOLENOIDES A TRES HAUT CHAMP

NATIONAL HIGH
MAGNETIC
FIELD LABORATORY

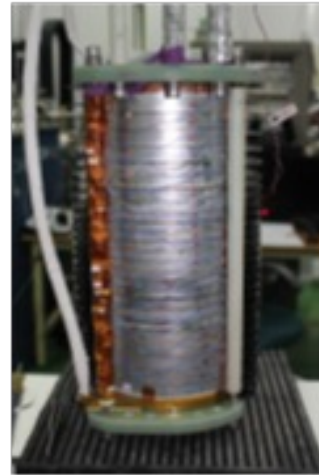


32T
17T HTS+ 15T LTS
ID 40mm



45,5T
14,5T HTS+ 31T LTS
ID 14mm

SUNAM



26,4T (HTS only)
ID 35mm

cea
SACLAY

LNCMI



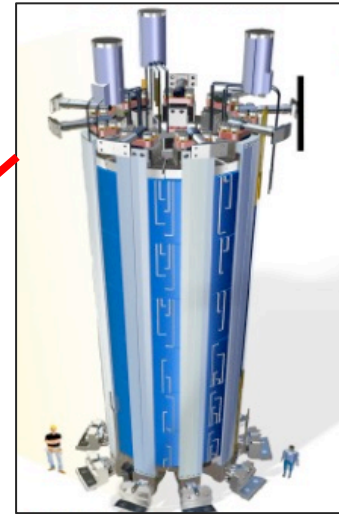
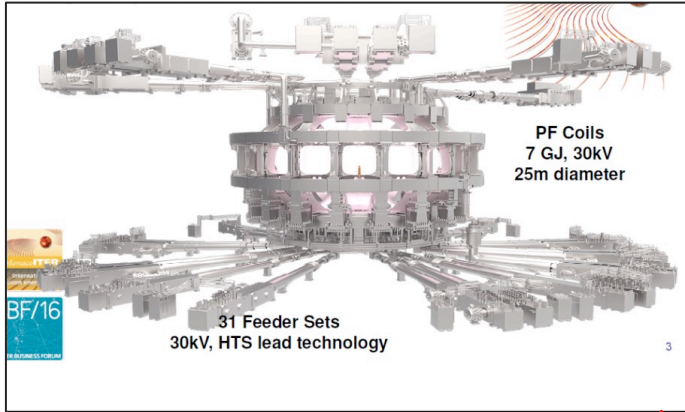
32,5T
12,5T HTS+ 20T res.
ID 50mm



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

Besoin pour le Muon Collider (“final cooling solenoid”): Objectif de champ $>30\text{T}$, diamètre intérieur de la bobine SC de 50mm pour le refroidissement final, aussi court que possible.

LE PROJET ITER: LES PLUS GRAND AIMANTS SUPRACONDUCTEURS JAMAIS CONSTRUITS



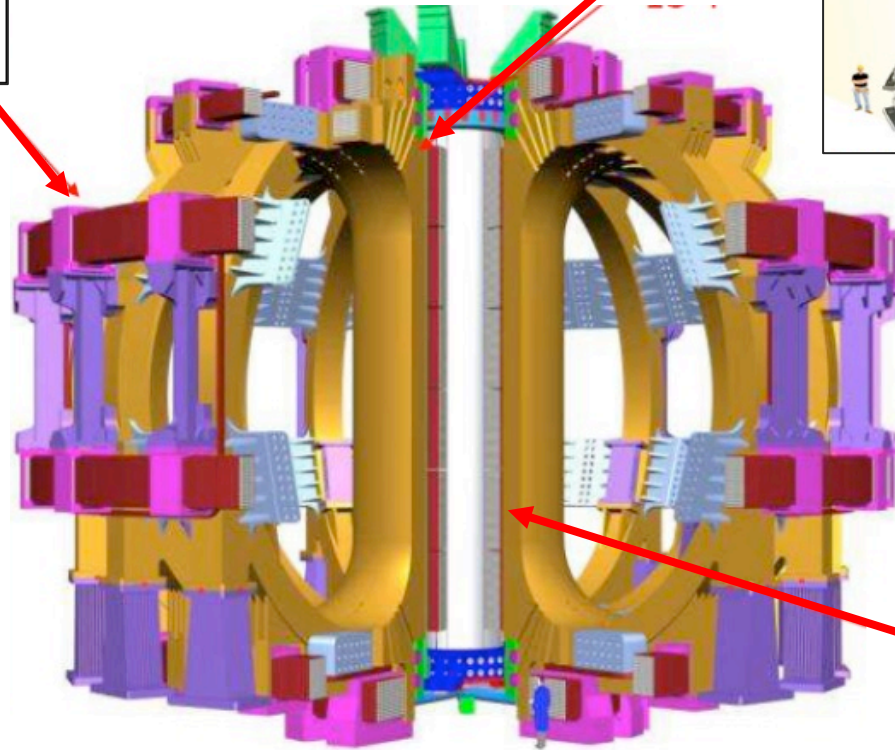
Solénoïde central

- 13T; 4.5K
- Nb₃Sn
- 132 tonnes



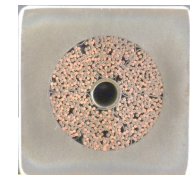
Bobines poloïdales

- 4-6T
- NbTi
- 244 tonnes



Bobines toroïdales

- 11.8 T (peak)
- Nb₃Sn
- 376 tonnes



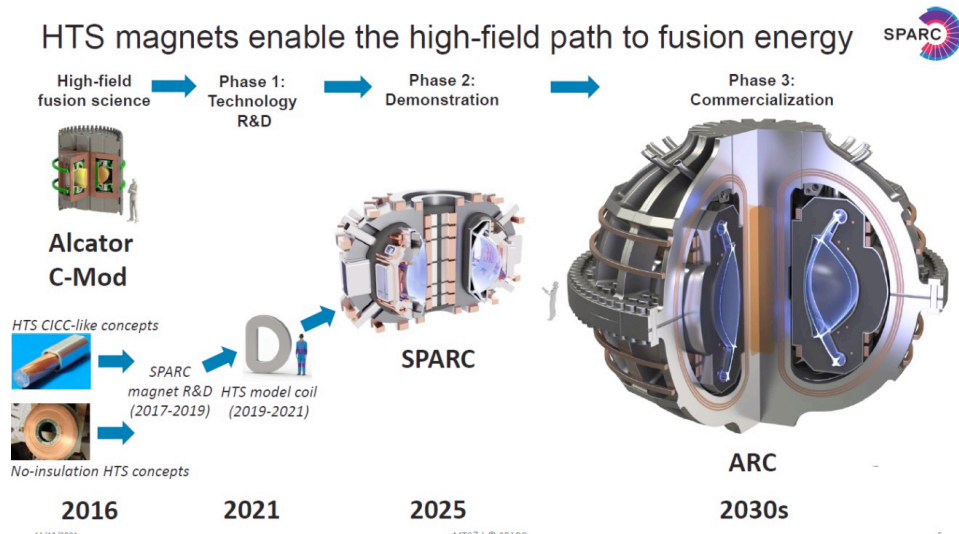
Et des composants HTS
(amenées de courant)


LES AIMANTS HTS ET LA FUSION

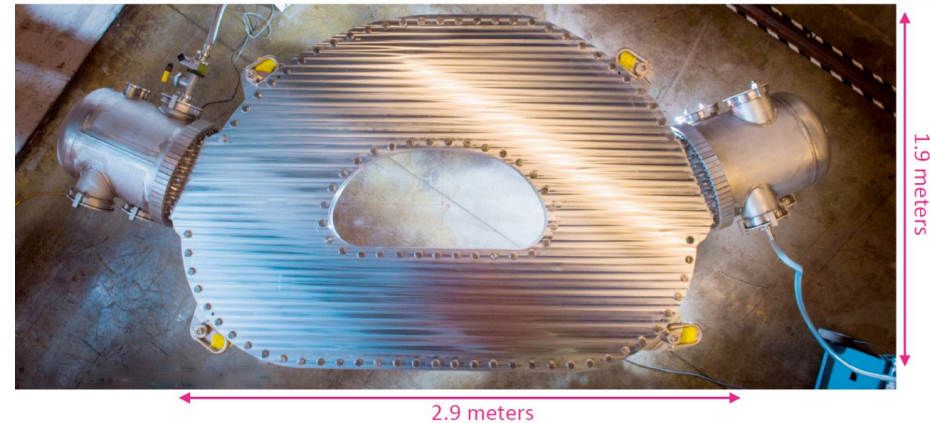


Plusieurs initiatives internationales explorent le potentiel des matériaux HTS pour la production d'énergie par fusion magnétique : ARC aux États-Unis, STEP au Royaume-Uni, Proxima Fusion en Allemagne, BEST en Chine, etc..

Exemple du projet ARC (MIT / Commonwealth Fusion Systems - USA)



The TFMC is the first NI large-scale high-field fusion magnet 
Targeting peak fields >20 T with simple manufacturing, novel cooling, passive quench handling



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

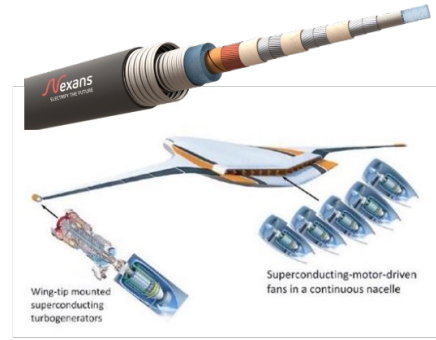
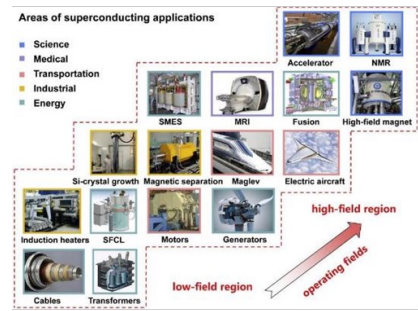
EN FRANCE: LE PEPR SUPRAFUSION



Programme de 50 millions d'euros sur 6 ans
Lancement annoncé en décembre 2023

More than 600 researchers
More than 20 partners from laboratories and universities
Strong industrial interest and support

Stimuler : le développement de la technologie HTS vers de futures applications sociétales à grande échelle
Utiliser : l'énergie de fusion nucléaire comme moteur de cette recherche et de cette innovation



EN CONCLUSION



- Les aimants à très haut champ sont en progrès continus. Les développements sont dépendants à la fois des **partenaires académiques** (physique des hautes énergies, fusion) et 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 reste aujourd'hui la technologie la plus avancée pour des aimants pour des gammes de champ de l'ordre de 12T à 16T, mais il faut poursuivre l'effort de R&D (production en série d'aimants d'accélérateur)**
- **La physique des hautes énergies a longtemps contribué à pousser les développements des aimants haut champ, mais elle a été remplacée par l'IRM/RMN et la fusion est aujourd'hui (en particulier sur la mise en œuvre des HTS et la diminution de leur coût)**
- **Il y a une émergence remarquable des HTS, mais là encore, il faudra encore beaucoup de R&D pour développer une technologie mature à grande échelle. Reste qu'on peut raisonnablement envisager des petits solénoïdes en HTS générant plus de 50T d'ici moins de 10 ans.**