



# DIPOLES À HAUT CHAMP POUR ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

Ezio Todesco

European Organization for Nuclear Research (CERN)

Technology Department

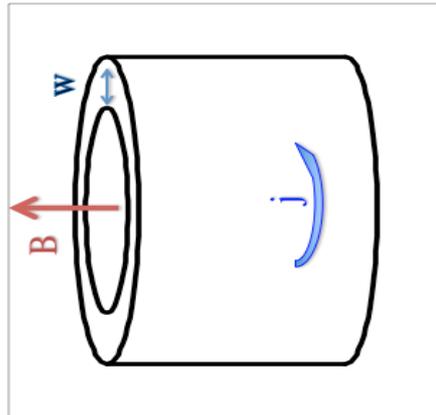
Magnets, superconductors and cryostat group

Remerciements aux collègues de la communauté des aimants d'accélérateur

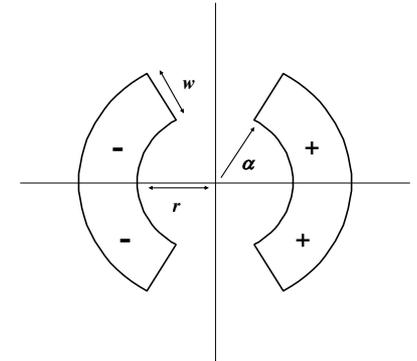
- Une courte histoire des aimants dipolaires en Nb-Ti
- Le Nb<sub>3</sub>Sn jusqu'à aujourd'hui
- HFM: les directions à prendre

# COMMENT FAIRE DES CHAMPS MAGNETIQUES

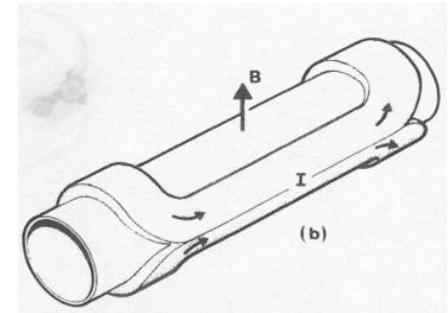
- Le champ magnétique d'un solenoïde est le **produit de la densité de courant et de l'épaisseur de la bobine**



$$B = \mu_0 j w$$



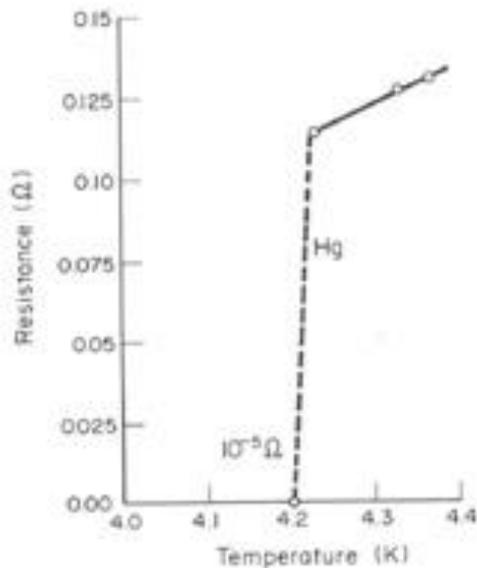
- Dans un dipole, on obtient la moitié  $B \approx \frac{\mu_0 j w}{2}$
- La constante  $\mu$  est très petite ( $\approx 10^{-6} \text{ T m/A}$ )



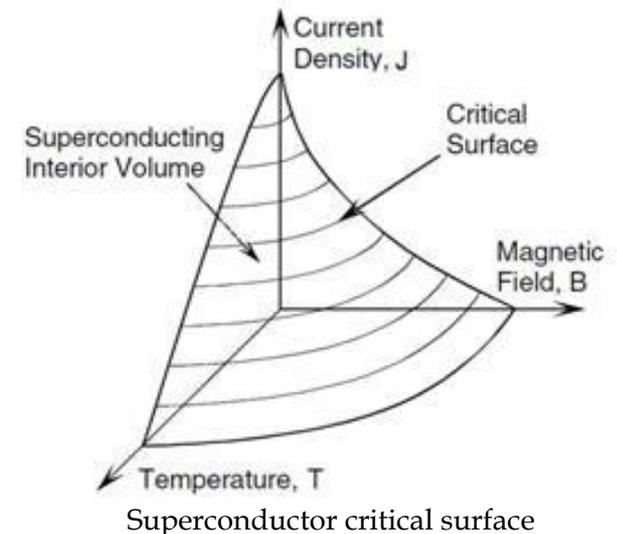
$$B[\text{T}] \approx 0.00063 j [\text{A/mm}^2] w [\text{mm}]$$

# LE GRAND BOND DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ

- Les conducteurs normaux **peuvent transporter 2-10 A/mm<sup>2</sup>**
  - Pour avoir un champ de ~ 8 T, on aurait besoin de 1.2 m - 6 m d'épaisseur de bobine !  
Enormes dimensions transversales, qui demandent un tunnel plus large, logistique, ...
- **Les supraconducteurs peuvent transporter une densité de courant 100 fois plus large (et sans dissipation) – typiquement ~500 A/mm<sup>2</sup>** (courant/surface de la bobine isolée)
  - Découverte en 1911, mais 50 années se sont écoulées avant d'avoir des aimants produisant des teslas



Heike Kamerlingh Onnes, Dutch  
(1853 -1928) Nobel prize 1913



# MY NAME IS BOND ...

- 1960s: Les premiers solenoides supraconducteur qui donnent  $\sim 1$  T
- Les aimants supraconducteurs rentrent rapidement dans l'imaginaire collectif

Le méchant  
(C. Lee)



James Bond  
(R. Moore)

G. Hamilton, "A007 - The man with the golden gun" EON production (1974)

# LES REGIONS D'INTERACTION DU ISR

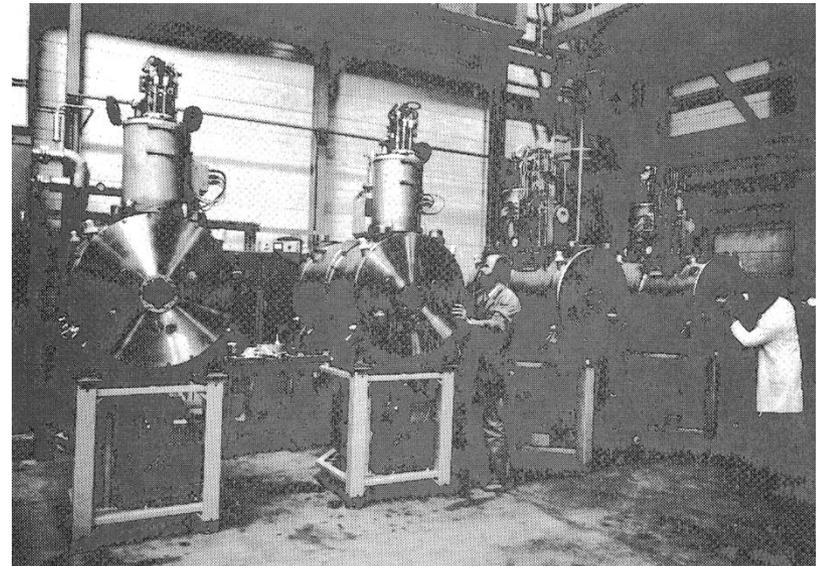
- Quelques années plus tard, **les premiers aimants supraconducteurs sont installés dans un collisionneur**: ISR (après des efforts aux USA, Isabelle)
- Aimants quadrupolaires in Nb-Ti, **avec un champ dans le supra >5 T**

THE EIGHT SUPERCONDUCTING QUADRUPOLES FOR THE ISR HIGH-LUMINOSITY INSERTION

by

J. Billan, K.N. Henrichsen, H. Laeger, Ph. Lebrun, R. Perin, S. Pichler, P. Pugin,  
L. Resegotti, P. Rohmig, T. Tortschanoff, A. Verdier, L. Walckiers, R. Wolf

Presented at XIth International Conference on High Energy Accelerators,  
CERN, Geneva, July 7 - 11, 1980



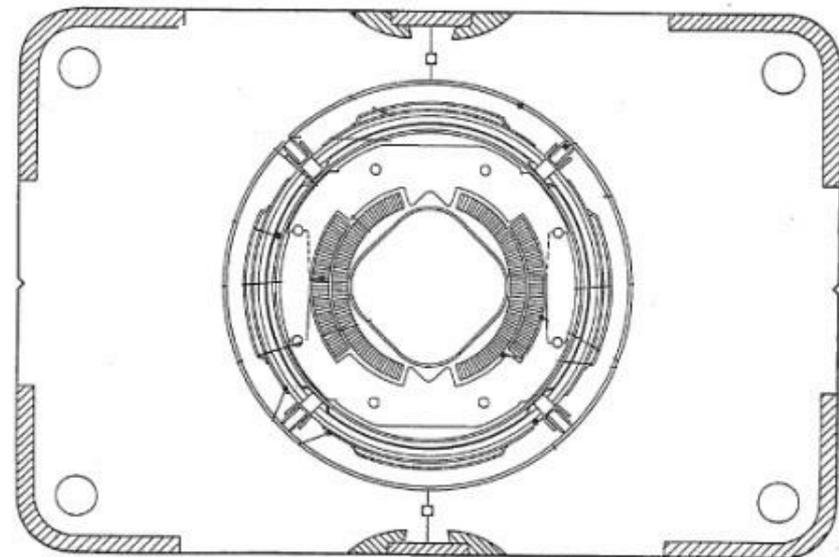
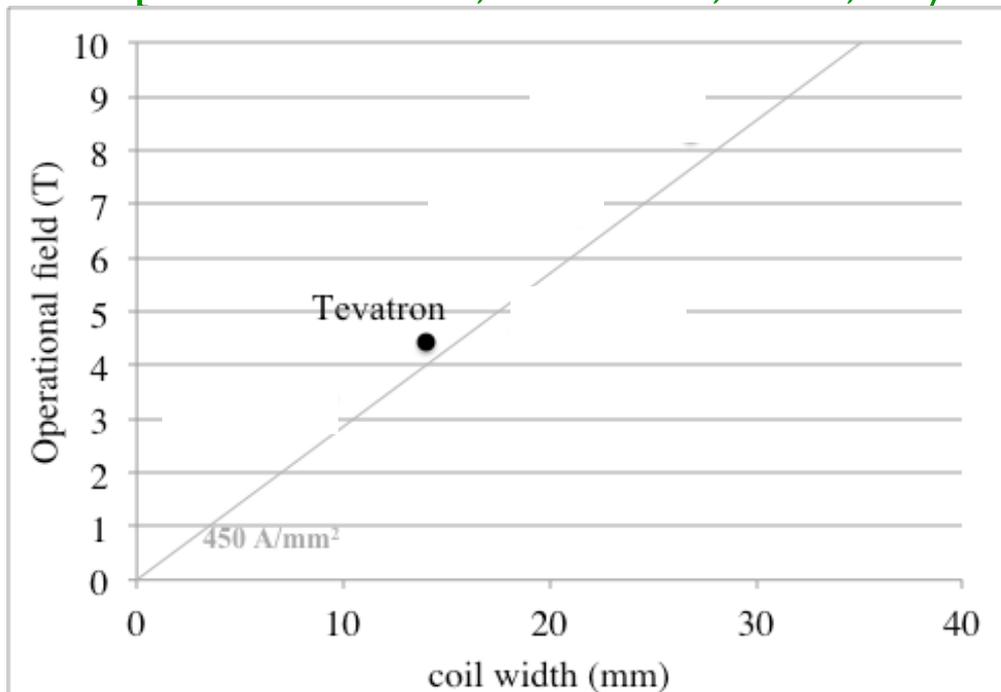
- Le résultat est une augmentation de la luminosité de ISR >10
  - 40 années plus tard ... le même parcours est suivi par HL-LHC, avec le Nb<sub>3</sub>Sn

- Densités de courant **de plusieurs centaines d'ampère par mm<sup>2</sup>** sont **un défi** pour les aimants supraconducteurs
  - La condition au contour imposée par les dimensions transversales est très exigeante
    - Les autres applications utilisent des valeurs moins importantes ...
    - ... mais présentent d'autres défis, comme des énormes dimensions (ATLAS, CMS) et/ou un champ très rapidement pulsée (ITER)

	Densité de courant globale (A/mm <sup>2</sup> )	Densité de courant dans le supra (A/mm <sup>2</sup> )	Rampe	Champ dans le supra
Tevatron dipole	360	1550	statique	4.7
LHC dipole	360/440	1260/1820	statique	8.6
ATLAS BCT	30	950	statique	3.9
ITER (TF & CS)	20 to 40	150	pulsée	5 to 13

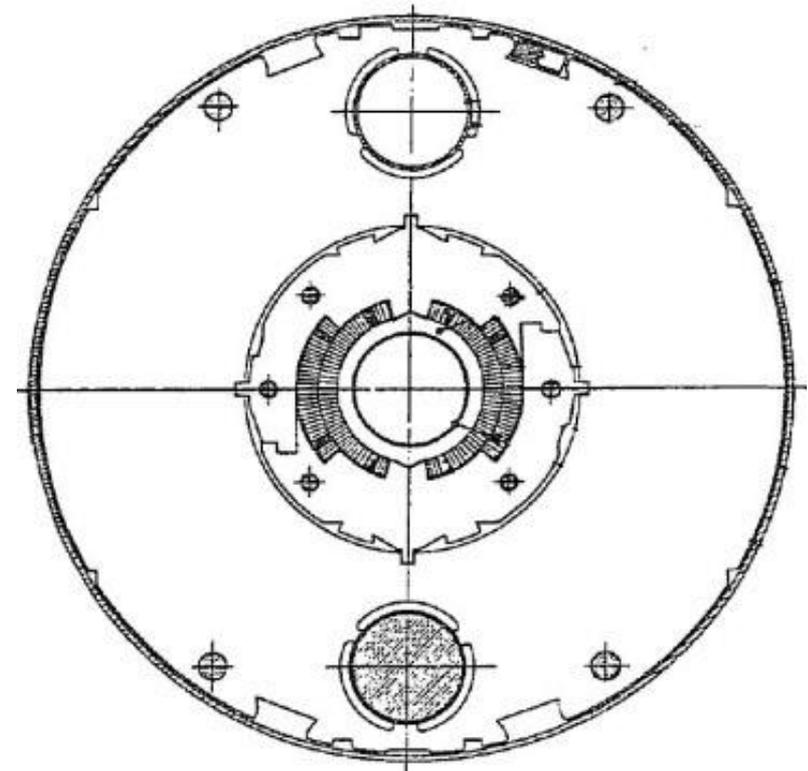
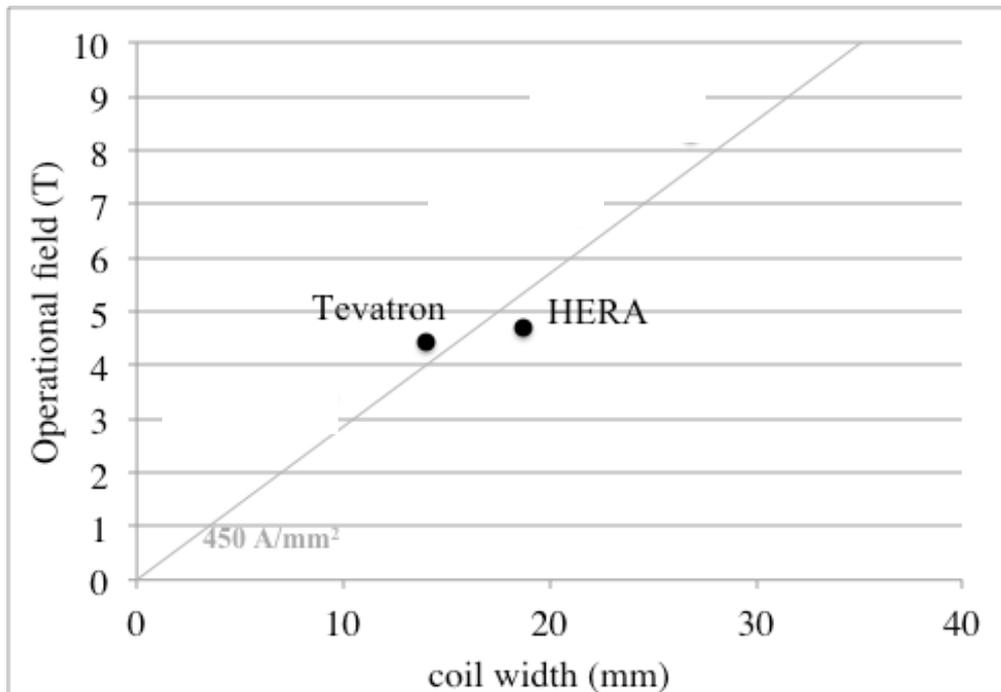
- L'histoire des aimants supraconducteurs pour accélérateurs est un chemin sur la ligne 450 A/mm<sup>2</sup> (3 T par 10 mm d'épaisseur de bobine): plus d'épaisseur, plus de champ magnétique

- 1980-1986: les aimants dipolaires du **Tevatron avec 4.3 T** sont les premiers aimants principaux installés dans un collisionneur
    - 774 dipoles, longueur de 6-m, production à FNAL
- [R. Hanft et al., TM-1182, 1630, 03/1983]



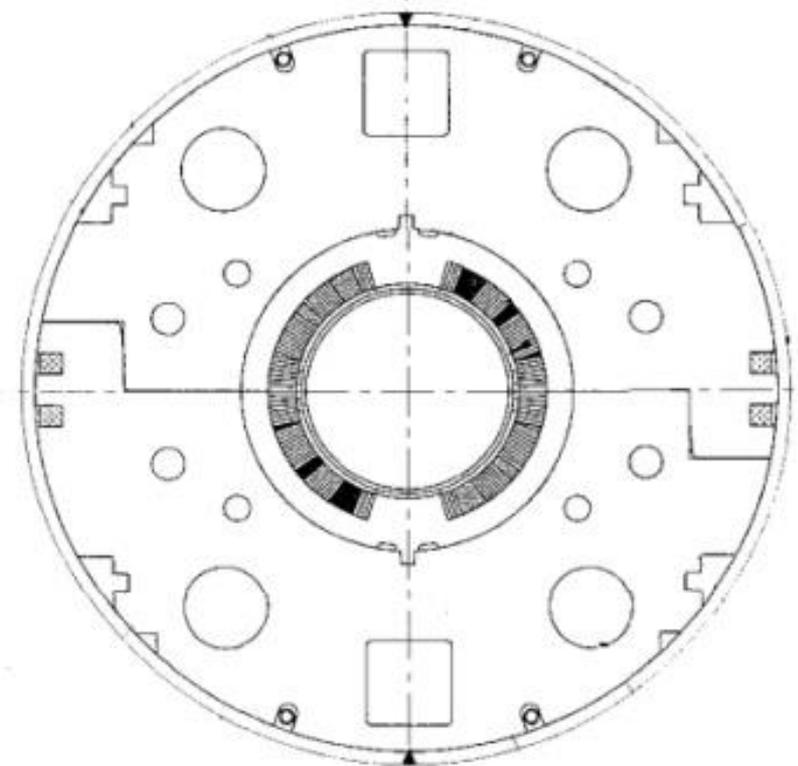
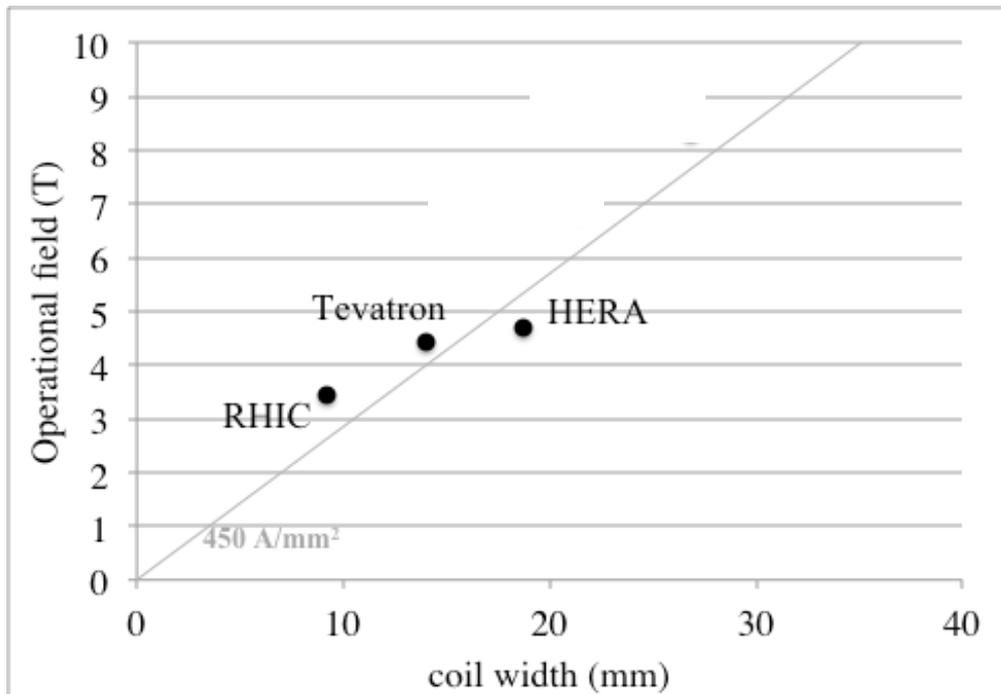
Tevatron dipole cross-section

- 1985-1990: les aimants dipolaires de HERA dépassent la barrière de 4.5 T
  - 454 dipoles, longueur de 9 m, production industrielle  
[R. Meinke, IEEE Trans. Appl. Supercond. 27, 1728 (1991)]

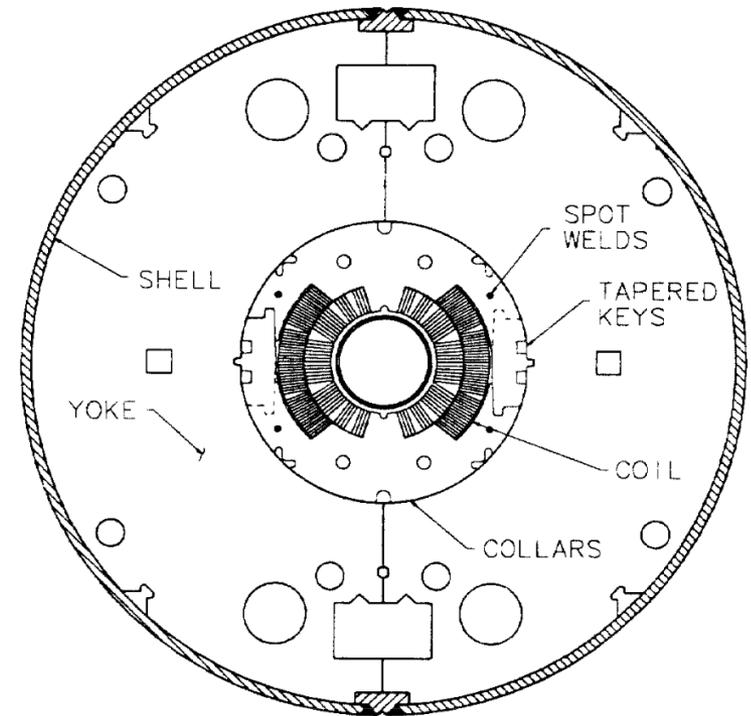
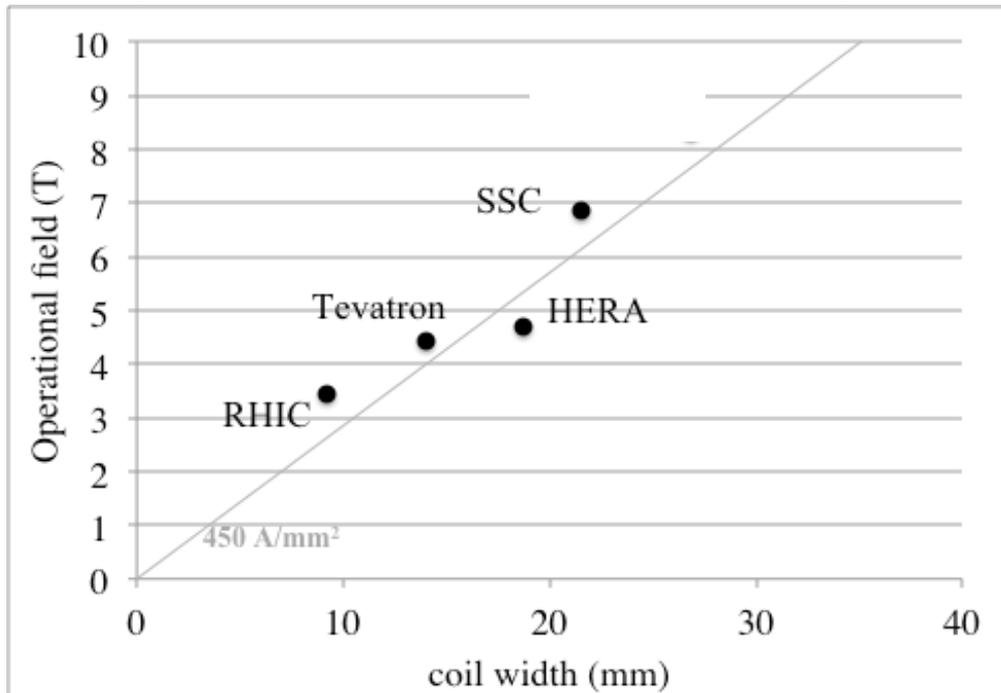


HERA dipole cross-section

- 1994-1996: les aimants dipolaires de RHIC avec 3.5 T explorent l'option «low-cost»
  - 296 dipoles, longueur de 9.5 m, production industrielle  
[M. Anerella et al., Nucl. Instrum. Methods A 499, 280 (2003)]

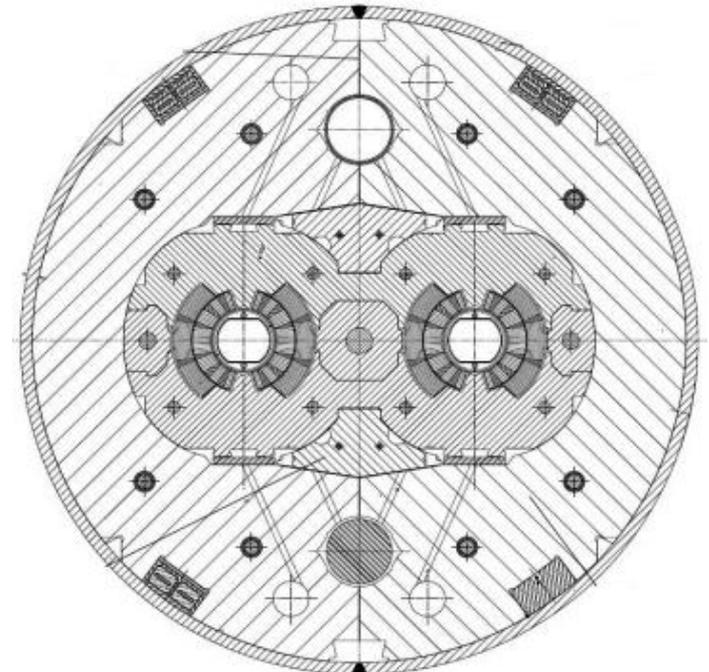
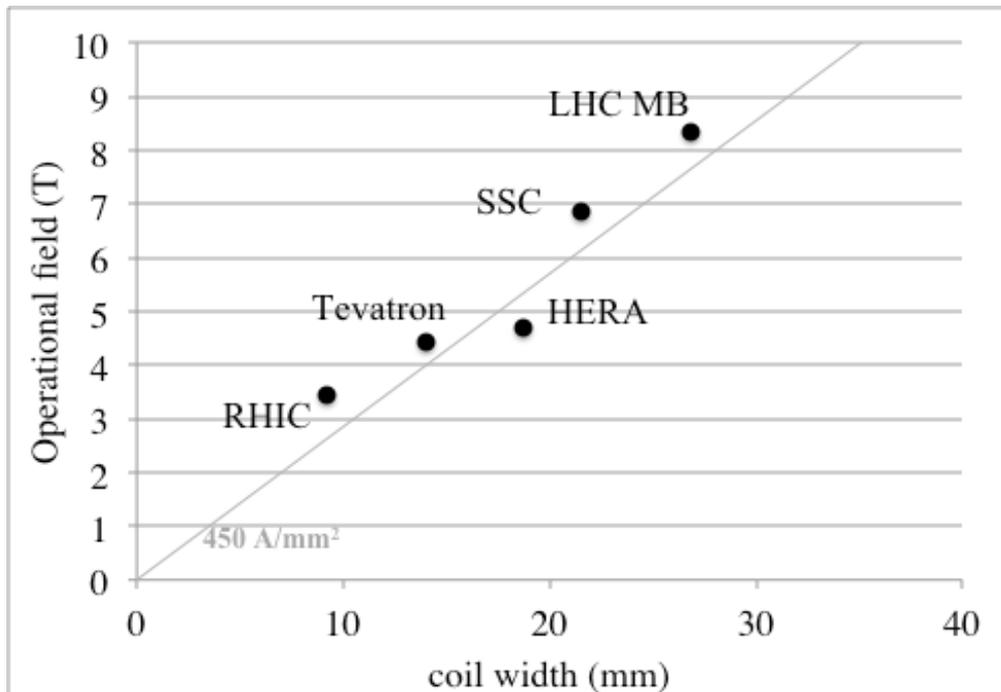


- 1984-1995: les prototypes du SSC dépassent la barrière de 6.5 T
    - 19 dipole prototypes, longueur de 17 m avec ouverture de 50 mm
    - 15 dipole prototypes, longueur de 15 m avec ouverture de 40 mm
- [A. Devred et al., SSCL-P-82 1992]



SSC dipole cross-section

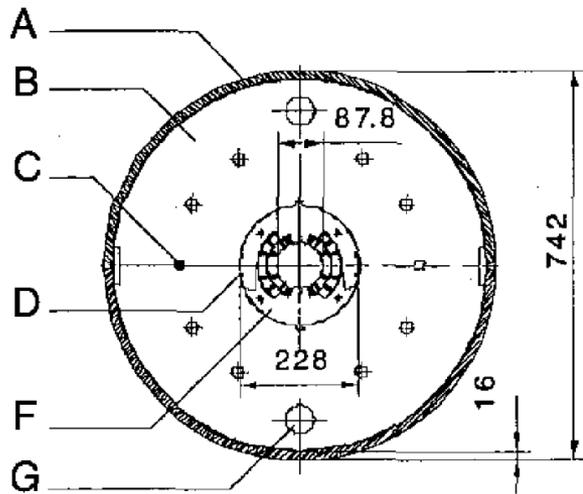
- 2000-2005: les dipôles du LHC dépassent la barrière des 8 T
  - 1278 dipôles, longueur: 14.3 m, production industrielle - vers la limite du Nb-Ti
    - Première opération à 1.9 K, d'après l'expérience de Tore Supra
- [R. Perin, in Encyclopedia of Applied Superconductivity (IOP, London, 1998) 919-950 and L. Rossi, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13, 1221 (2003) ]



LHC dipole cross-section

- Une courte histoire des aimants dipolaires en Nb-Ti
- Le Nb<sub>3</sub>Sn jusqu'à aujourd'hui
- HFM: les directions à prendre

- Le dipole Fresca en Nb-Ti **dépasse la barrière des 10 T**  
(10.07 T)



A) Shrinking Cylinder    B) Yoke    C) Alignment Key  
D) Collar Key    F) Collars    G) Heat Exchanger Hole

Fresca cross-section

[D. Leroy, et al, IEEE TAS 10 \(2000\) 178](#)

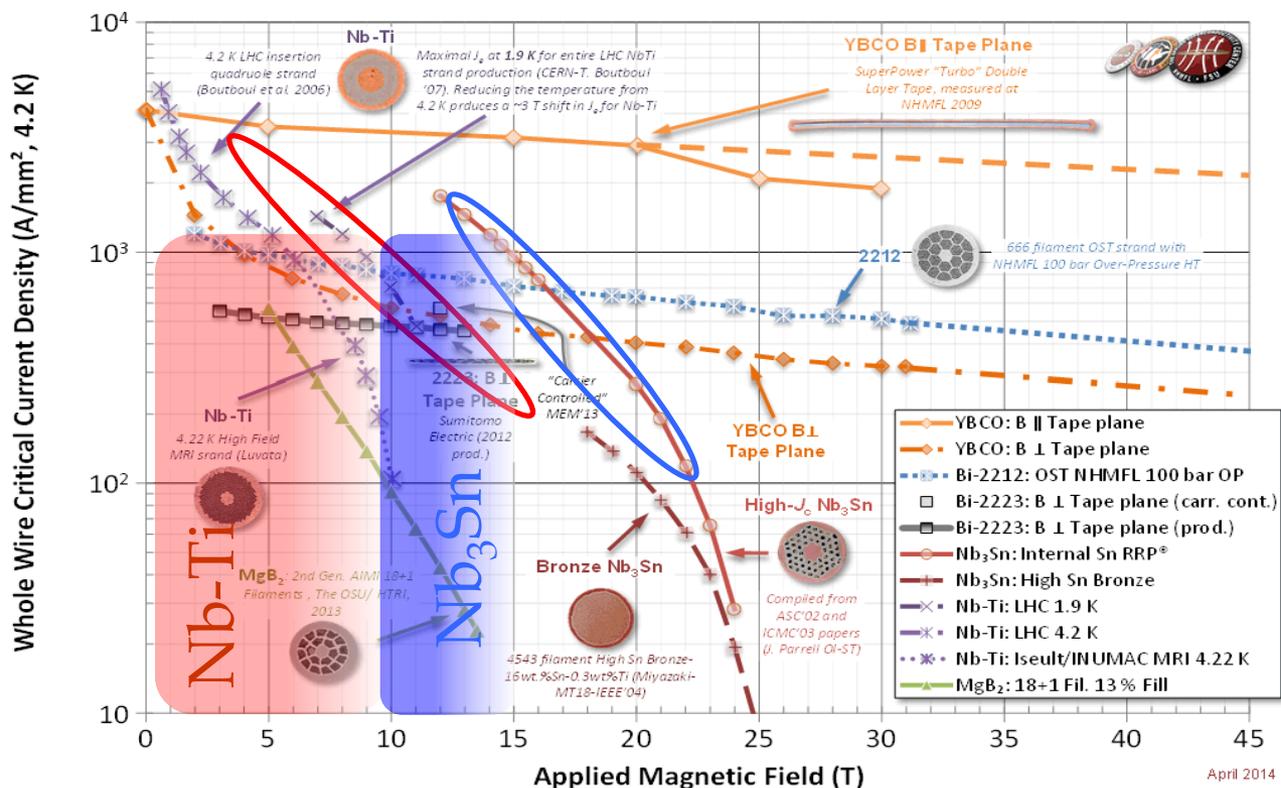


Iseult solenoid

[P. Vedrine, et al. IEEE TAS 18 \(2008\) 868](#)  
[L. Quettier, et al. IEEE TAS 30 \(2020\) 4400604](#)

- Pour les aimants d'accélérateur en Nb-Ti, étant donnée l'optimization coût/dimension, c'est le champ ultime
- Mais un solénoïde Nb-Ti de 11.7 T est possible (CEA, Iseult)

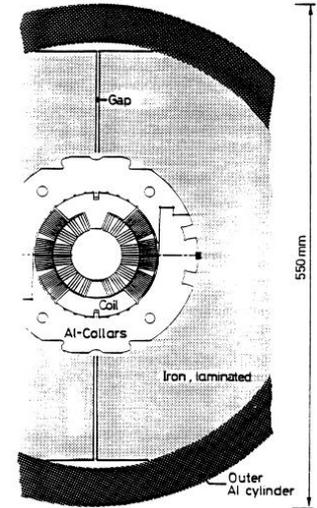
- Pour obtenir  $\sim 500 \text{ A/mm}^2$  dans la bobine il faut avoir  $\sim 1500 \text{ A/mm}^2$  dans le supraconducteur
  - Nb<sub>3</sub>Sn peut marcher aujourd'hui dans l'intervalle 10-15 T (HL-LHC strand)
  - HTS est un nouveau monde avec des nouvelles promesses et des nouveaux défis - non traité ici



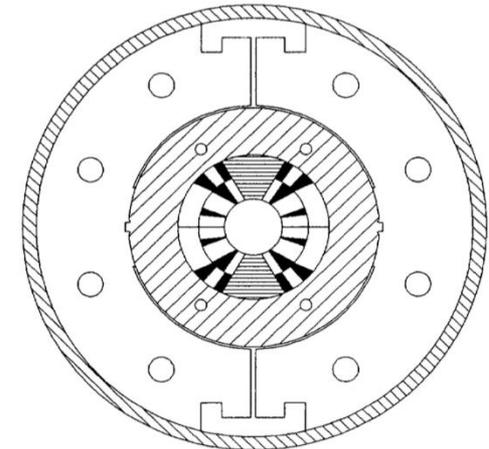
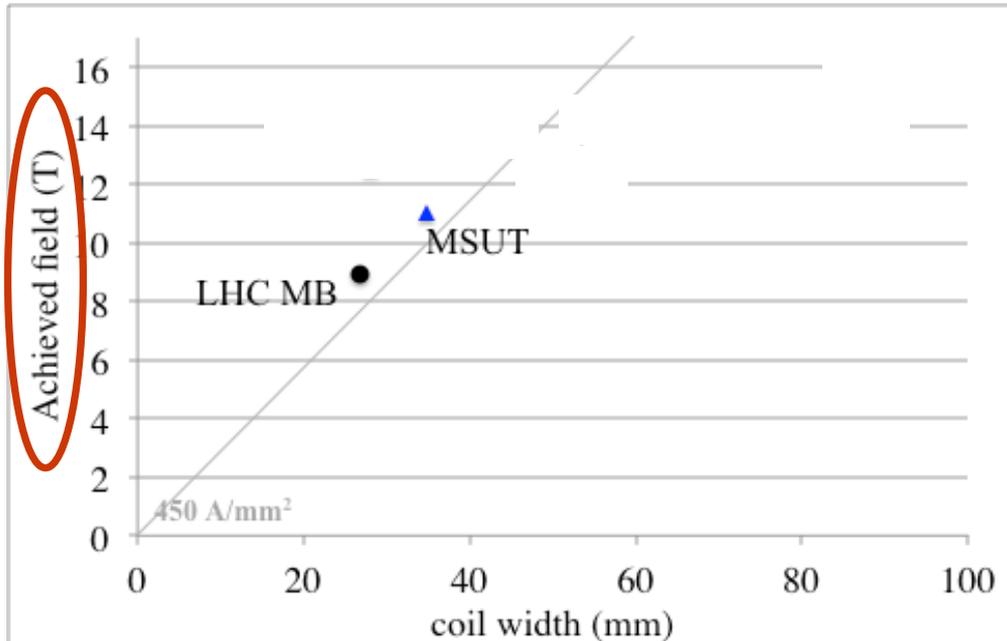


# LE LONG CHEMIN DE RECORDS EN Nb<sub>3</sub>Sn

- 1989: CERN Elin dipole, atteint **9.5 T** à 4.3 K
  - C'était l'option Nb<sub>3</sub>Sn pour LHC
- 1992-97: MSUT atteint **11.3 T** à 4.5 K, et 11.5 T à 1.9 K  
25 ans plus tard
- Très important: on parle **du champ obtenu**
  - Les dipôles longs du LHC obtiennent 9 T, un des courts jusqu'à 9.96 T

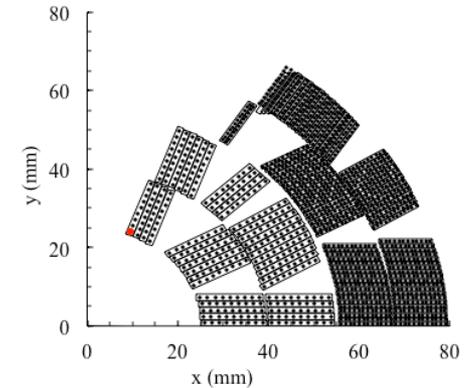


CERN-ELIN cross-section  
[S. Wenger, et al., IEEE TAS 25 \(1989\)](#)

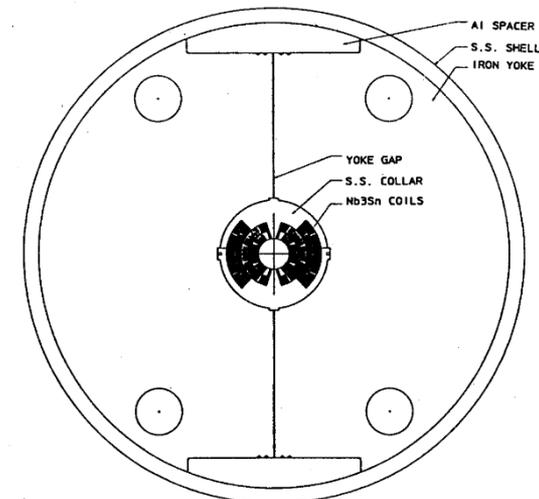
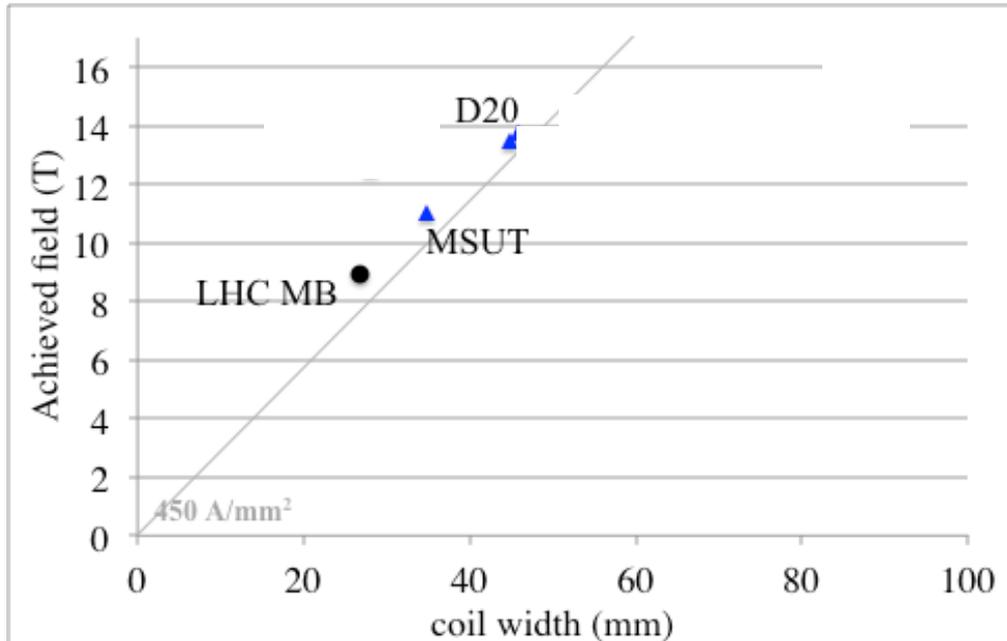


MSUT cross-section  
[A. Den Ouden, et al. IEEE TAS 7 \(1997\)](#)

- 1993-1997: D20 atteint **13.5 T** à 1.8 K (suivi par une dégradation)
  - Bobine très complexe avec quatre couches
  - *D. dall'Orco, et al. IEEE TAS 3 (1993)*
  - *A. McInturff, et al, Particle Acc. Conf. (1997)*

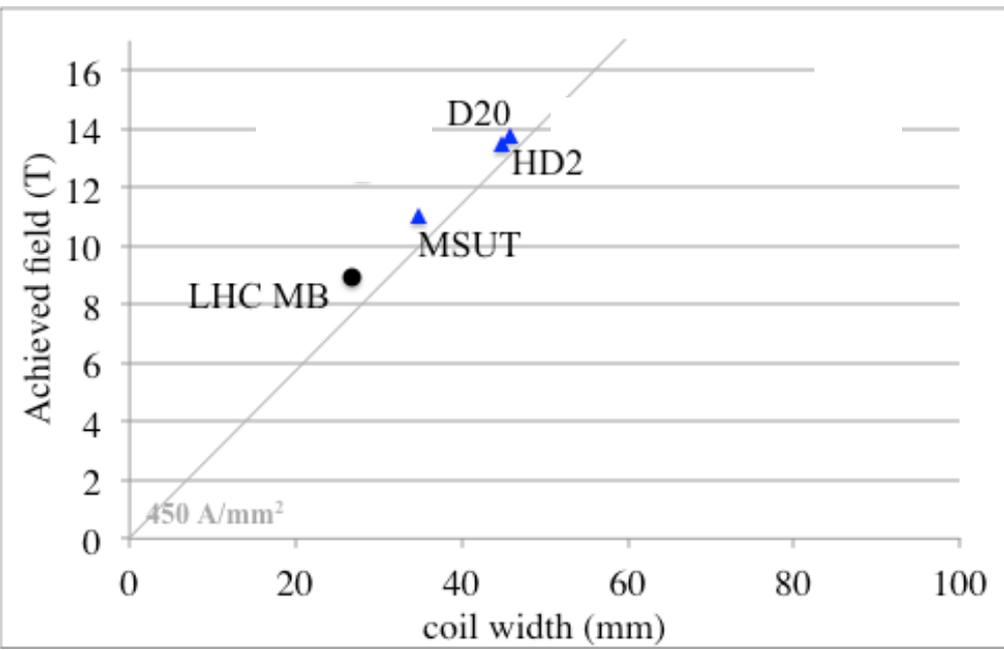
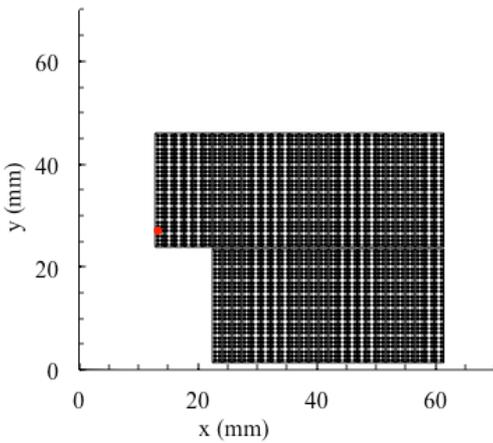


D20 coil cross-section

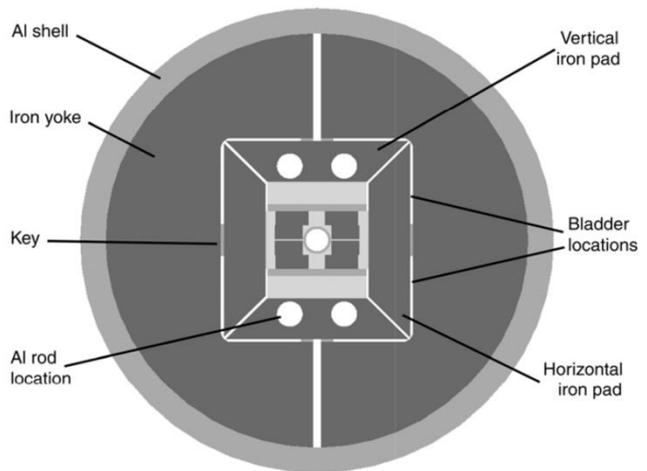


D20 cross-section

- 2005-2010: LBNL HD2 atteint **13.8 T** à 4.5 K
  - Un design fortement innovant: «block coils, flared ends»
  - Malheureusement, l'aimant n'a jamais été testé à 1.9 K
  - G. L. Sabbi, et al. *IEEE TAS* **15** (2005) 1128

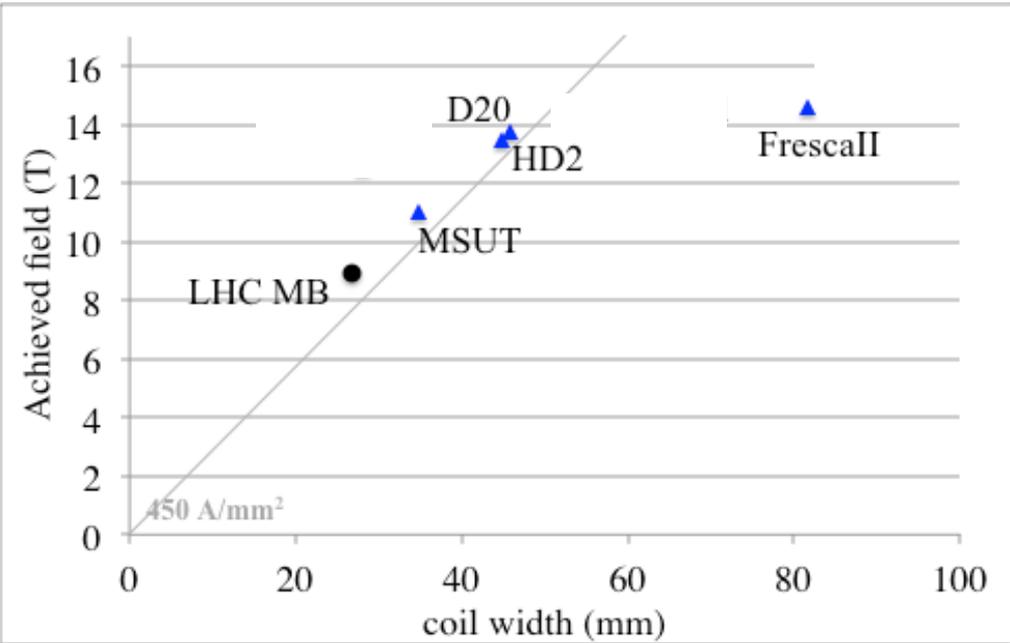


HD2 coil cross-section

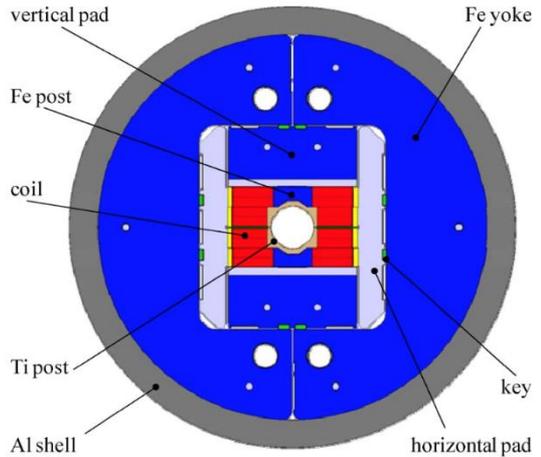


HD2 cross-section

- 2012-2019: FrescaII atteint **14.5 T** à 1.9 K
  - Exploration des tailles de bobines très grandes
  - Premier block avec quatre couches
  - Collaboration CEA-CERN
  - **A. Milanese, et al, IEEE TAS 22 (2012)**
  - **G. Willering, et al, IEEE TAS 29 (2019)**



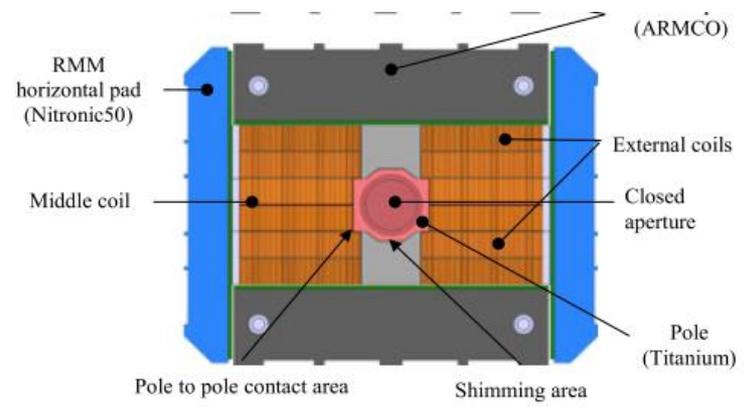
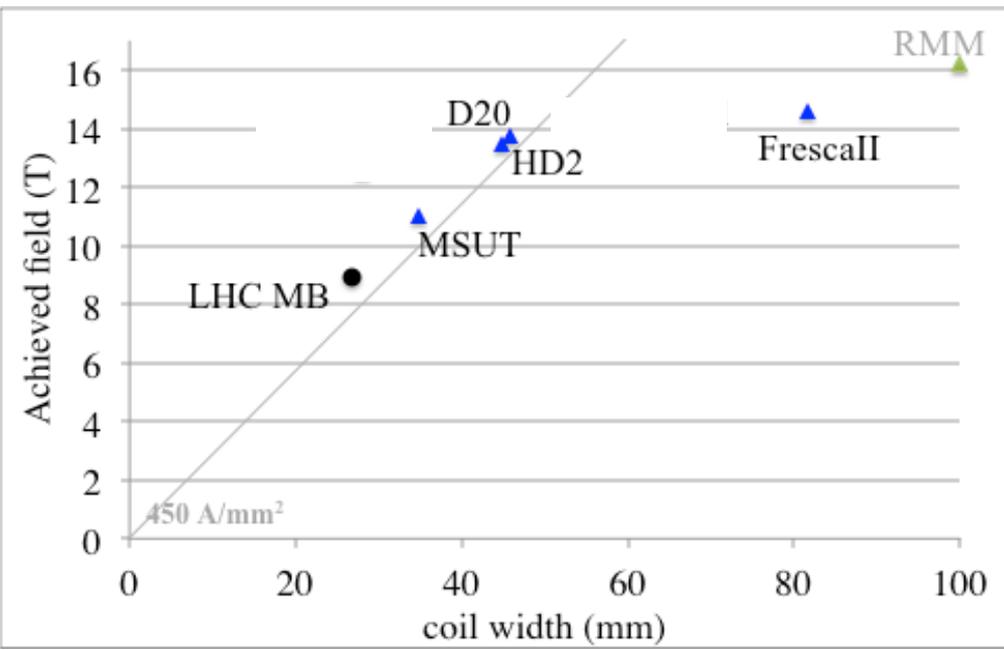
FrescaII coil cross-section



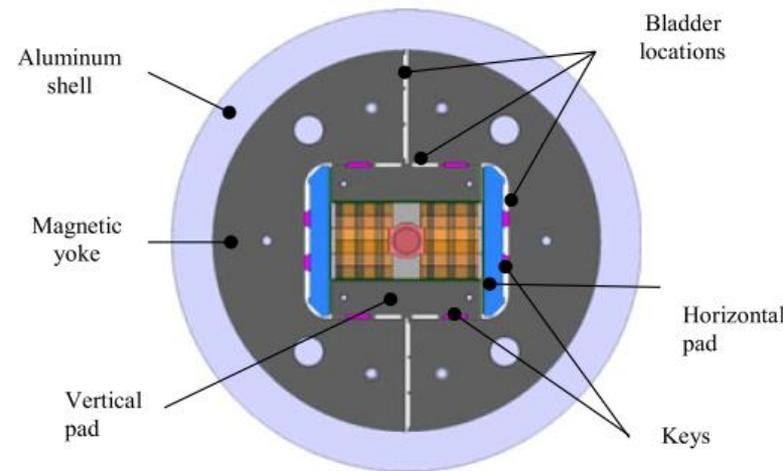
FrescaII cross-section

# LE LONG CHEMIN DE RECORDS EN Nb<sub>3</sub>Sn

- 2016-2022: RMM **atteint 16.4 T à 1.9 K** (mais sans la complexité de têtes)
    - Premier design avec 3 couches
- [\[S. Izquierdo Bermudez, et al., IEEE TAS 27 \(2017\) 4002004\]](#)



RMM coil cross-section

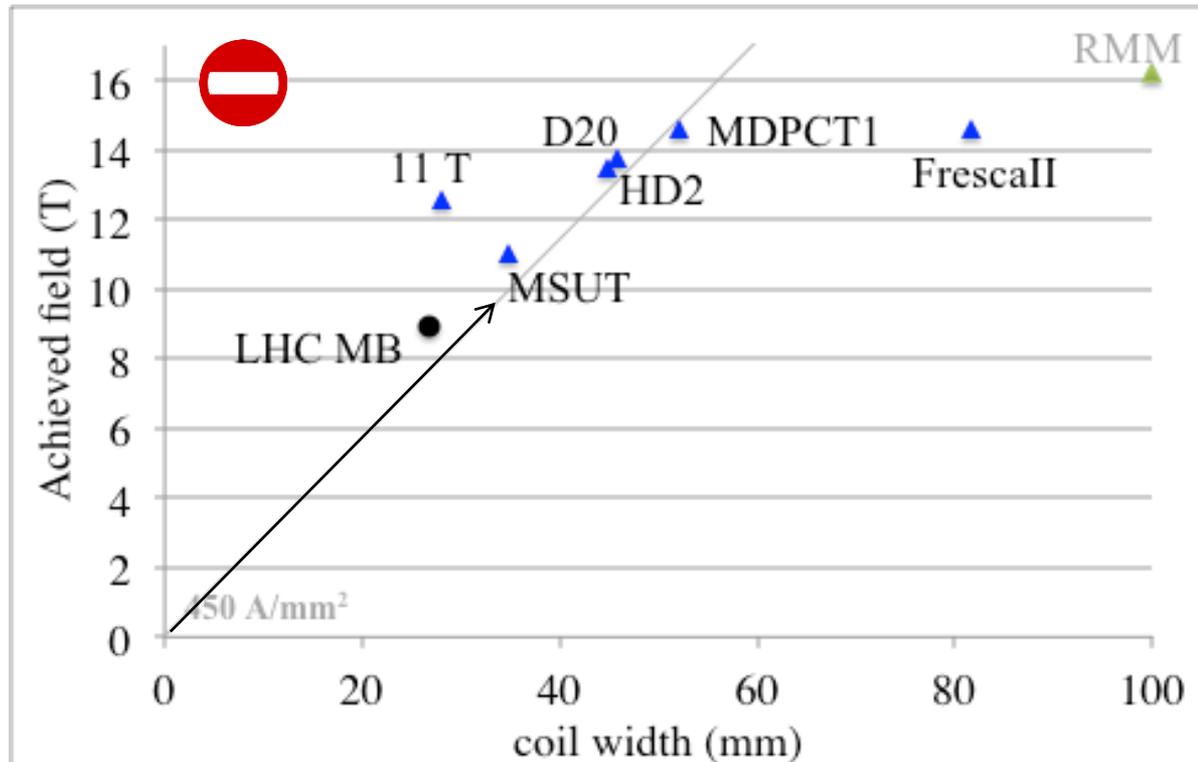


RMM cross-section

- Une courte histoire des aimants dipolaires en Nb-Ti
- Le Nb<sub>3</sub>Sn jusqu'à aujourd'hui
- HFM: les directions à prendre

# LA DIRECTION? TOUT DROIT

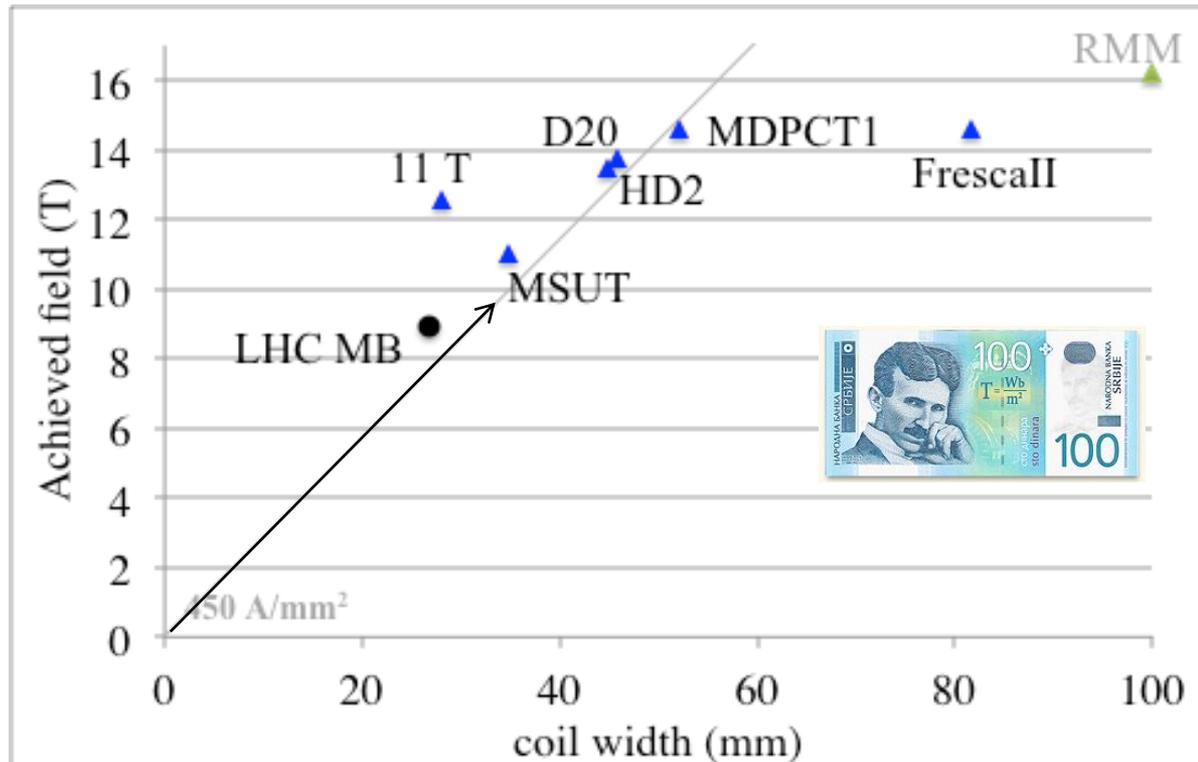
- Deux raisons empêchent de dépasser de manière significative les  $450 \text{ A/mm}^2$ 
  - **Protection** et **mécanique**



**Important: le graphique montre le champ obtenu**  
 Le champ opérationnel doit être au moins 10% plus petit!

# LA DIRECTION? TOUT DROIT

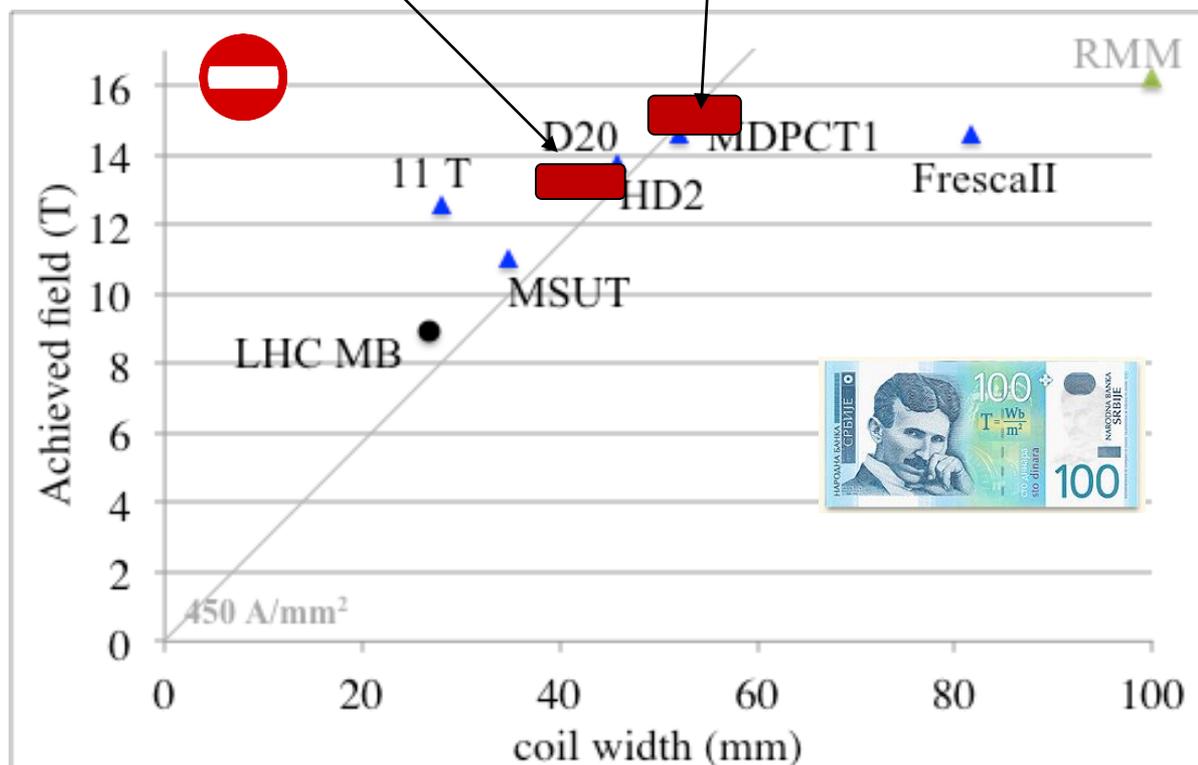
- D'un autre côté, des épaisseurs de bobines **très importantes rendent le coût et les dimensions non viables**
  - Après l'histoire des records, voici aussi dans le graphique deux projets importants: le 11 T du HL-LHC et le 4 couches  $\cos\theta$  du FNAL MDPCT1



**Important: le graphique montre le champ obtenu**  
 Le champ opérationnel doit être au moins 10% plus petit!

# LA DIRECTION? TOUT DROIT

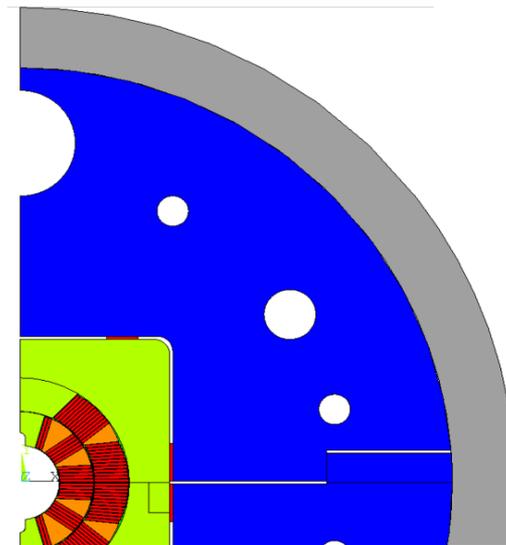
- HFM vise un dipole à 12 T dipole et un dipole à 14+ T (champ d'opération)
  - Dans le graphique, une indication du champ à obtenir pour opérer à 12 T et à 14+ T



**Important: le graphique montre le champ obtenu**  
 Le champ opérationnel doit être au moins 10% plus petit!

# LE DIPOLE 12 T

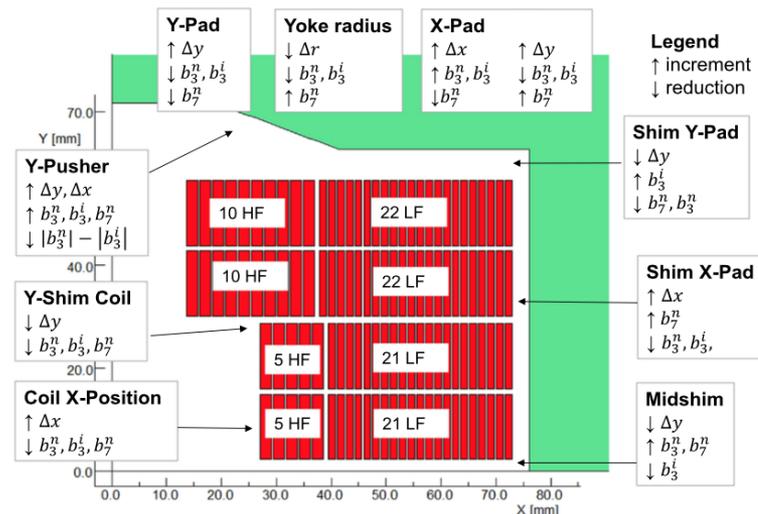
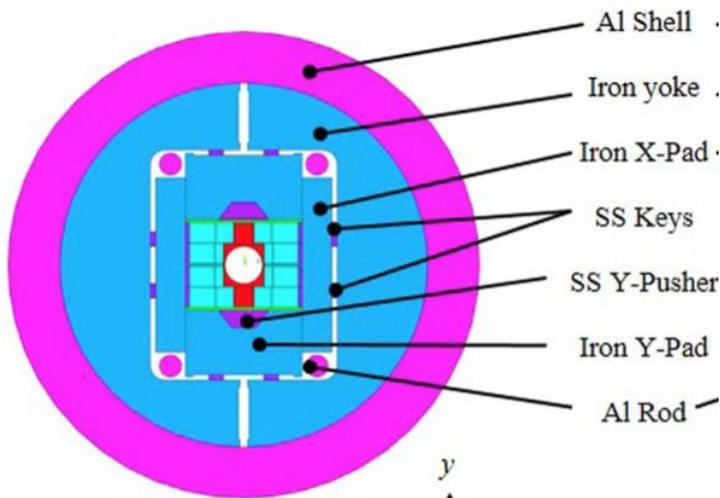
- Le dipole 12 T: on peut l'obtenir aujourd'hui avec deux couches et une bobine  $\cos \theta$ 
  - C'est la technologie la plus proche de HL-LHC
  - On peut l'obtenir avec le conducteur du HL-LHC
- Collaboration avec INFN (Falcon D, [S. Farinon](#), [M. Sorbi](#), [A. Valente](#), ... et al.)
  - Large cable ( $\sim 22$  mm largeur), structure «bladder and key»
- Le CERN développe aussi un design et plusieurs modèles ([D. Perini et al](#))
  - Et un long prototype ( $\sim 5$  m)



FalconD cross-section [[A. Pampaloni, et al. IEEE TAS 32 \(2022\) 4000605](#)]

# LE DIPOLE 14+ T

- Le dipole 14+ T: le champ ultime pour Nb<sub>3</sub>Sn
  - Trois options (étudiés dans Eurocircle)
  - Un aimant **HD2-like**, avec une grande largeur de câble (CERN)
  - Un aimant « **common coil** » (CIEMAT)
  - Un aimant basé sur le « **coil stress management** » (PSI/CHART)
  - Le racetrack R2D2: un premier pas vers le « **graded block dipole** » F2D2 (CEA)

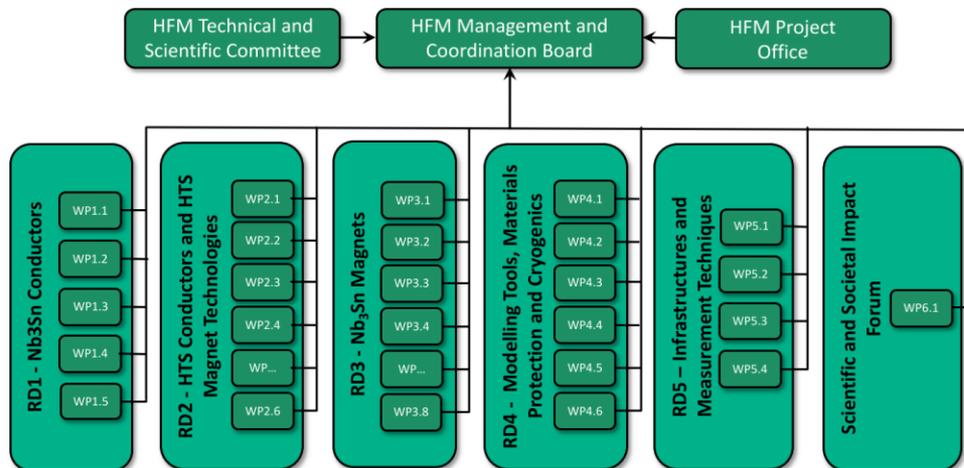




# EUROCIRCLE AND HFM

- Les études commencèrent avec Eurocircle, avec un objectif de 16 T [[D. Tommasini, IEEE TAS 27 \(2017\) 4000405](#)]
  - Network du CERN avec plusieurs collaborations
- Le project HFM (High Field Magnets) a été lancé récemment (L. Bottura, and A. Siemko since 2022)
  - Stratégie du groupe TE-MSD définie in EDMS 2680109 (A. Devred, A. Ballarino)
  - Important: il y a une partie HTS, non présentée ici
  - **Main goals for 2022-2026**
    - **Demonstrate Nb<sub>3</sub>Sn potential above 14T** and in terms of ultimate performance (target 16T)
    - **Develop Nb<sub>3</sub>Sn magnet technology for collider-scale production through robust design**, industrial processes and cost reduction (benchmark 12 T)
    - **Explore and demonstrate suitability of HTS conductors for building accelerator magnets** performing beyond the reach of Nb<sub>3</sub>Sn

- HFM: au-delà des dipôles 12 T et 14+ T, d'autres activités complémentaires
  - Conducteur: amélioration du jc de 50% par rapport à HL-LHC, cohérent avec la proposition de 2015 [[L. Bottura, A. Ballarino IEEE TAS 25 \(2015\)](#)],
  - Conducteur: pas seulement jc, mais aussi une amélioration des propriétés mécaniques
  - Activités sur l'isolation, l'imprégnation pour avoir une technologie applicable à 4000 aimants
  - ... et beaucoup plus



- **Main goals:**

- Pursue Nb<sub>3</sub>Sn conductor R&D with targets to **develop the HFM class conductors** with above state-of-the-art performance and robustness, in particular regarding the mechanical properties as well as optimized cost of conductors and hence accelerator magnets
- Perform R&D to **improve mechanical properties Nb<sub>3</sub>Sn conductors** (parameters t.b.d.)
- Perform R&D to increase **Jc performance** (to ~1500 A/mm<sup>2</sup> at 16T, i.e. ~50 % above state-of-the-art)
- **Industrialize HFM R&D wires, including new suppliers**
- **Procure HL-LHC class wire and cable** for the magnet program, including extensive characterization measurements

# CONCLUSIONS

- Les aimants dipolaires pour accélérateurs sont une application très spéciale: **très grande densité de courant**, et une dimension transverse très compacte (<1 m)
- L'histoire des dipôles pour accélérateurs est un chemin sur la ligne des  $\sim 450 \text{ A/mm}^2$  dans la bobine isolée
- Le projet HFM prépare le futur des collisionneurs de hadrons du CERN, avec un **dipôle 14+T**, et une étape intermédiaire à 12 T
- La contribution française, depuis des nombreuses années, est basée sur un **approche visionnaire**, avec un fort soutien au « block design » depuis plus de 10 ans, et continue dans cette direction, en synergie avec le CERN

- A couple of technical remarks on how I built the plot in slides 19-23
  - Coil width is the « equivalent coil width » i.e. wedges are removed
    - That's why for LHC dipole we have 28 mm and not 31
    - I was obliged to be able to compare block coils as HD2, FrescaII and RRM
  - Field is the nominal field – this does not mean that some (or all) magnets achieved much more
    - For the LHC dipole I put 7 TeV and not 7.5 TeV
    - For BNL case, for instance, magnet have a large margin and can reach higher values – they were so confident that they installed without testing

- A couple of technical remarks on how I built the plot in slides 19-23
  - The line of  $450 \text{ A/mm}^2$  corresponds to the case of an ironless magnet – therefore it is there just to guide the eye and give an order of magnitude
  - If a magnet sits on the  $450 \text{ A/mm}^2$  line, it does not mean that this is its actual overall current density as the presence of iron reduces the current
  - In some magnets, grading is used, so for instance in the LHC dipole inner layer is at  $360 \text{ A/mm}^2$  and outer layer is at  $440 \text{ A/mm}^2$  – obviously this complexity is not visible in the plot

- A couple of technical remarks on how I built the plot in slides 25
  - Coil width is the « equivalent coil width » i.e. wedges are removed as in the previous case
  - Field is the achieved bore field
    - In case of several magnets I put the best
    - I am obliged to put achieved field since in some short models the « nominal » is not defined
    - This does not mean that one can build an accelerator with this value of field – there has been some confusion in the community between maximum achieved and operational
    - I am plotting bore field and therefore I could not include the quadrupoles – in particular the Nb<sub>3</sub>Sn MQXF
    - To include also the quadrupole one would need to plot the conductor peak field, but I considered this too complex for the aim of these slides