

# Cours de Magnétisme

Conception, Simulation, Réalisation et  
Mesures

un beau chemin pour les éléments  
magnétiques

**Aimants classiques**



Antoine DAËL  
CEA/DSM/DAPNIA/SACM  
antoine.dael@cea.fr



## Objectif du cours de magnétisme

- Nous rencontrons sur les accélérateurs de particules et sur les expériences de physique de très nombreux aimants « classiques » ou aimants supraconducteurs.
- L'objectif du cours est de faire comprendre: les principes de conception, les techniques de dimensionnement et la technologie de construction de ces aimants.
- Les éléments de ce cours sont complémentaires des cours de J.L.BIARROTTE, J.M. FILHOL et J.M.DECONTO



## Plan du cours sur le magnétisme

- Généralités sur le magnétisme
- Le Solénoïde
- Les aimants d' accélérateurs « classiques »
- Généralités sur la supraconductivité
- Les aimants supraconducteurs dans le projet LHC
- Les nouveaux projets



## BIBLIOGRAPHIE

CERN ACCELERATOR SCHOOL : mesures magnétiques , physique générale des accélérateurs, lumière synchrotron , supraconductivité , CAS

- La Bible : « Magnétostatique » de E. Durand.
- Martin N. Wilson : Superconducting Magnets
- P.Tixador : « Les supraconducteurs »

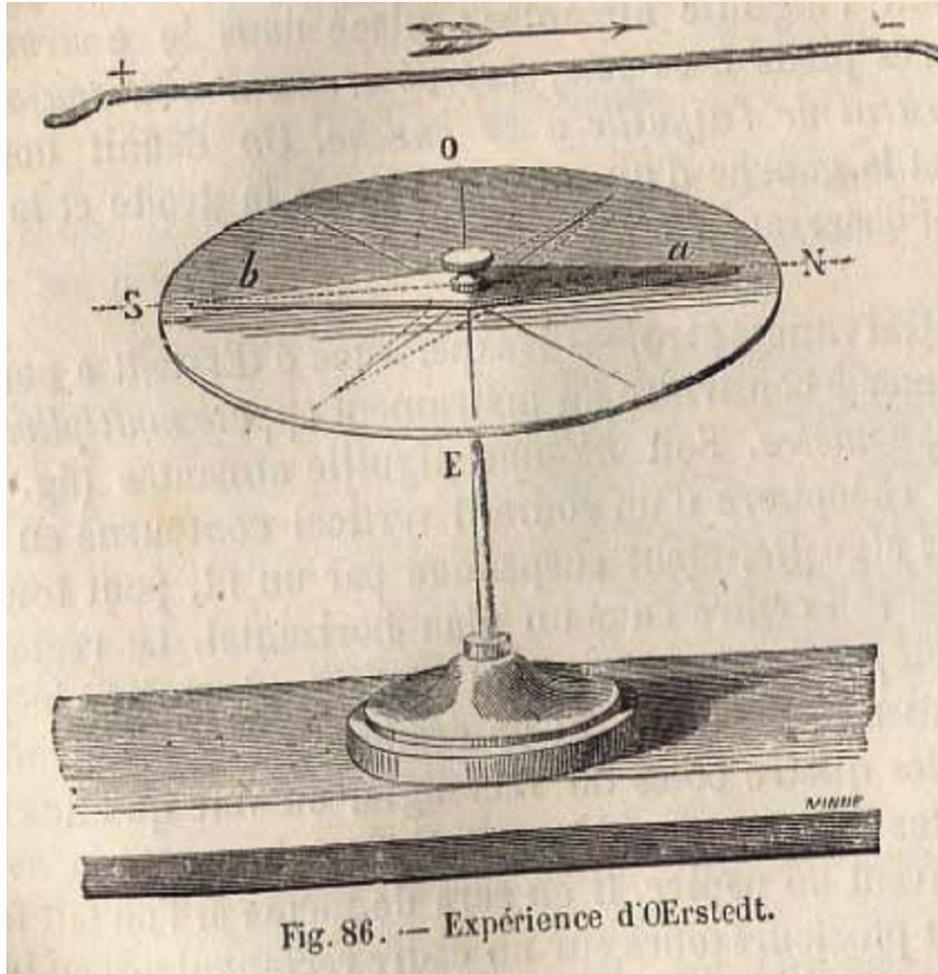


## Généralités sur le magnétisme

- Champ créé par un courant rectiligne: expérience de H.C.Oersted , définition de l' Ampère.
- Champ créé par une spire circulaire
- Définition des tubes de flux , équivalence aimants permanents.
- Champ du solénoïde: solénoïde mince ,solénoïde épais , efforts magnétiques



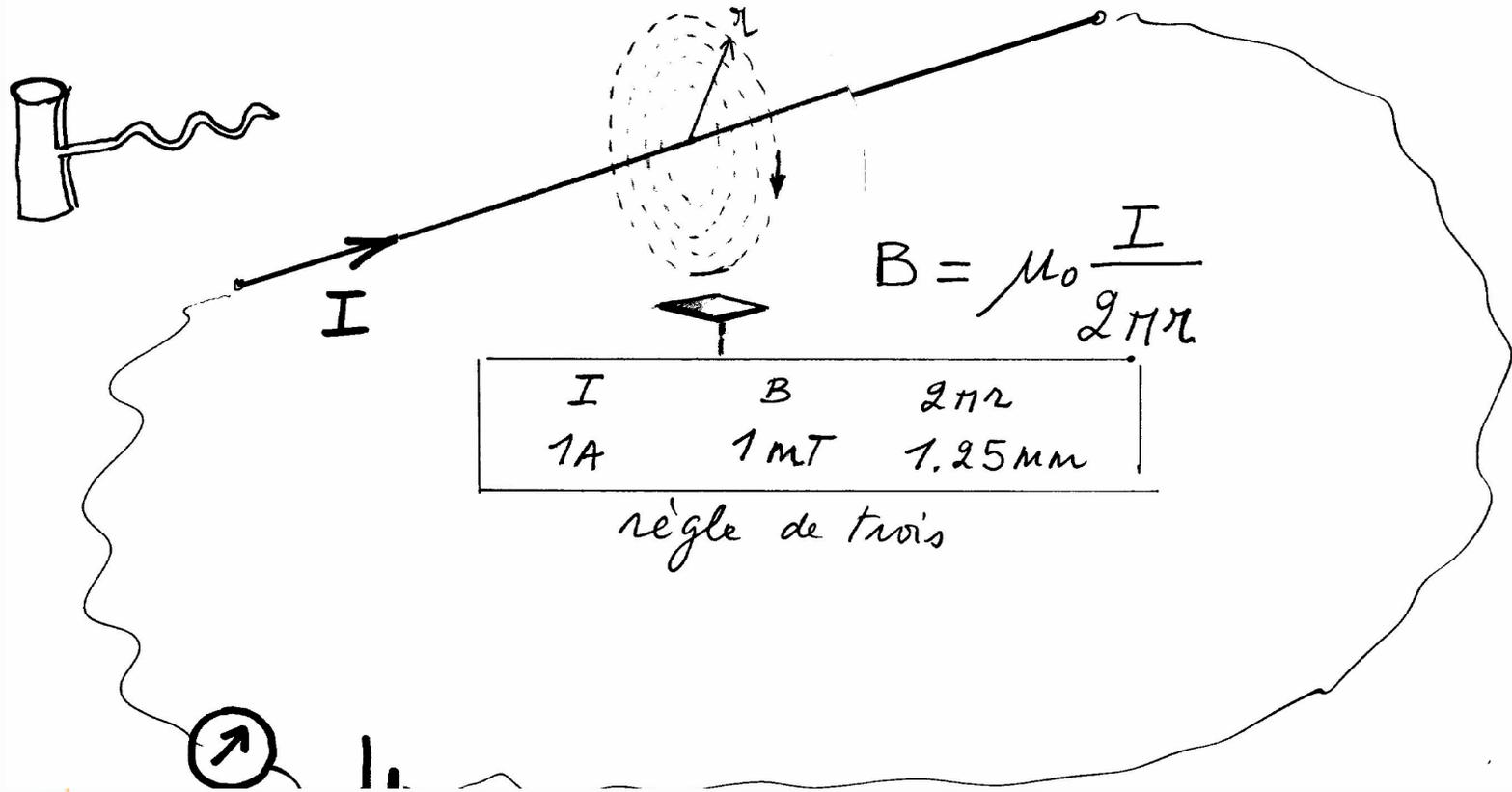
## Expérience de J.C.Oersted (1820)



# Expérience de H.C. Oersted

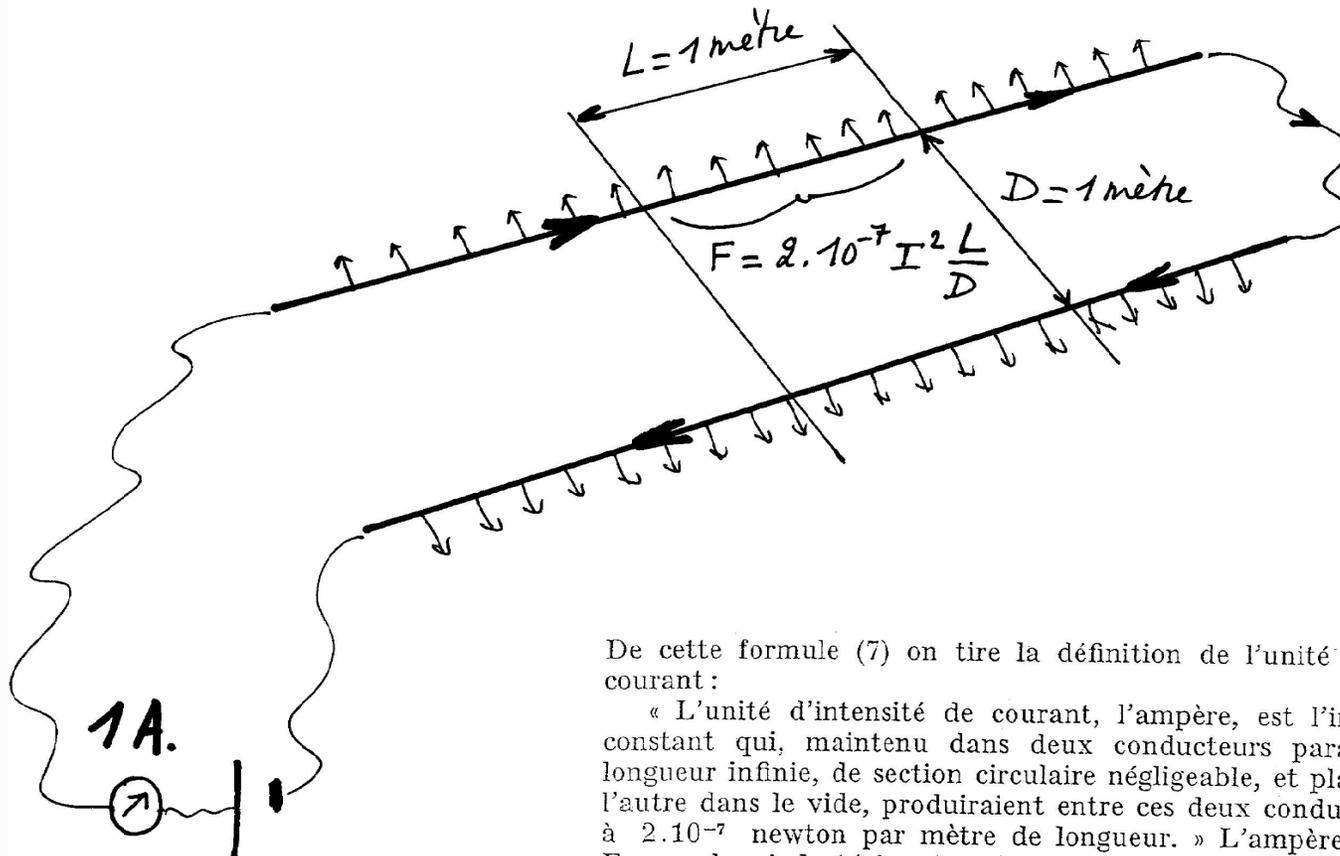
(juillet 1820)

boussole



# Expérience de André Marie AMPÈRE

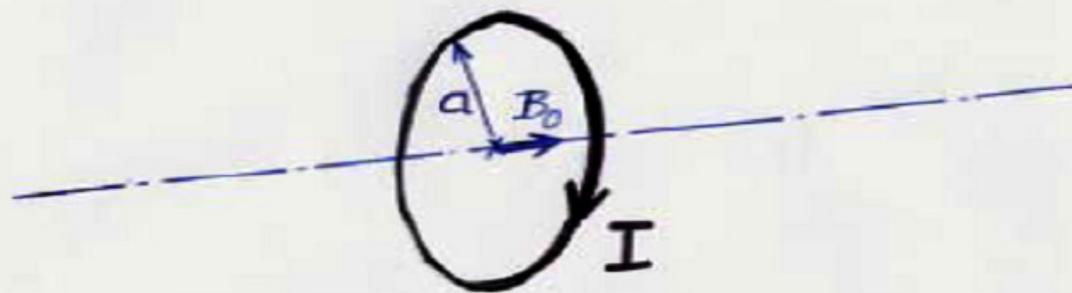
~ 1820



De cette formule (7) on tire la définition de l'unité MKSA d'intensité de courant :

« L'unité d'intensité de courant, l'ampère, est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable, et placés à 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produiraient entre ces deux conducteurs une force égale à  $2 \cdot 10^{-7}$  newton par mètre de longueur. » L'ampère est l'unité légale en France depuis le 14 janvier 1948.

# Champ d'une spire circulaire de rayon $a$



$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2a}$$

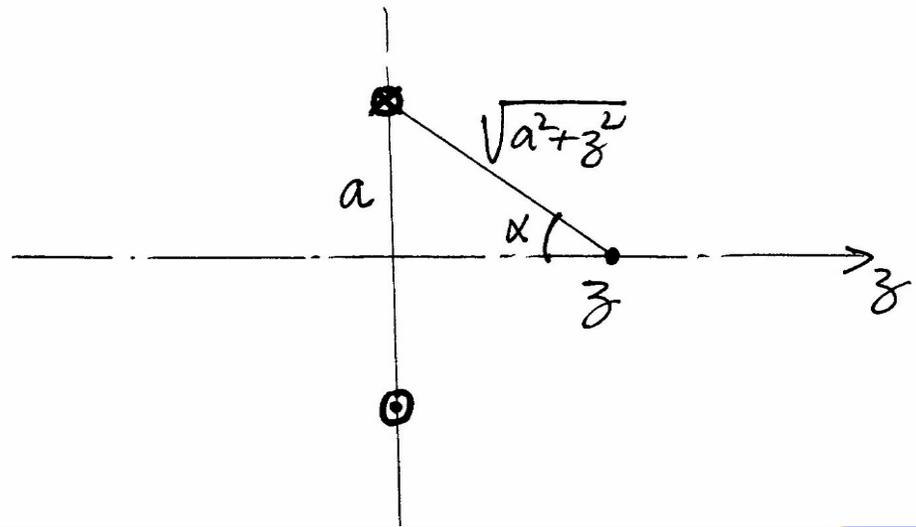
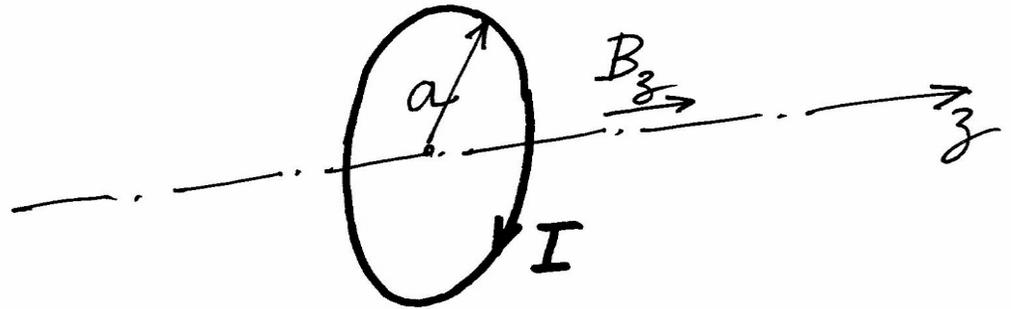
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

diamètre

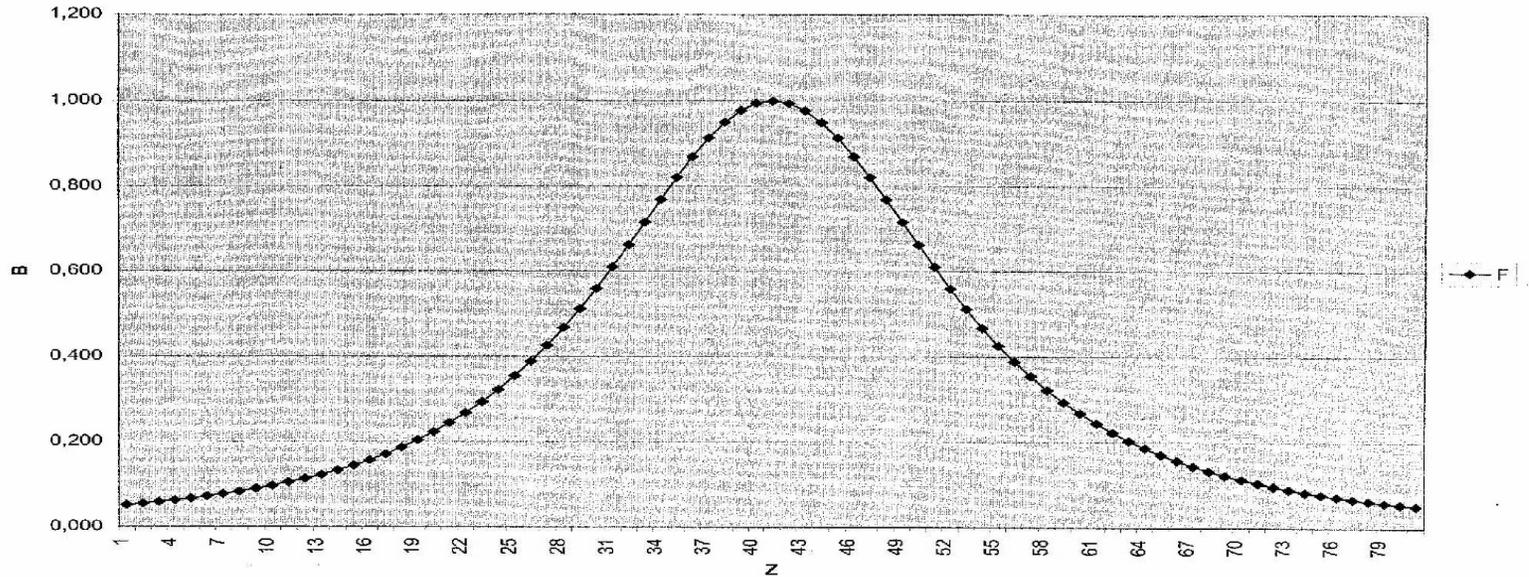
$I$	$B_0$	$2a$
1A	1mT	1.25mm

# Champ d'une spire circulaire

$$B_z = B_0 \sin^3 \alpha$$



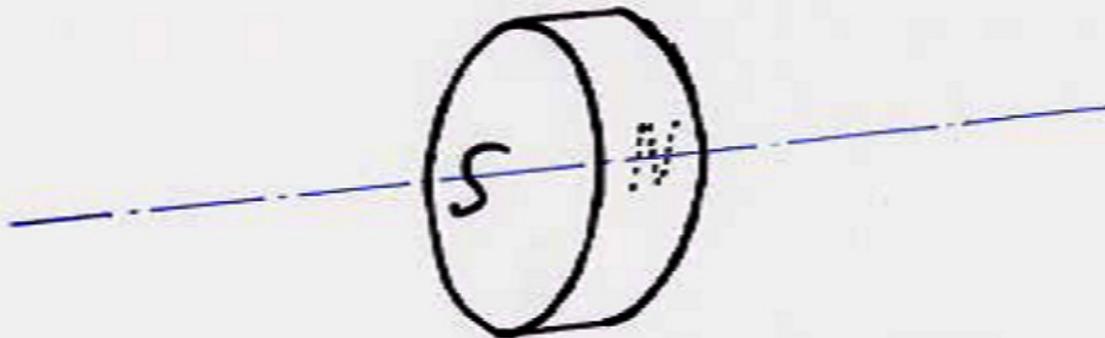
# Champ d'une spire circulaire



APPLICATION du théorème d'Ampère

$$\int H dl = NI$$
$$\int_{-\infty}^{+\infty} B_z dz = \mu_0 NI$$

Champ d'une spire circulaire  
équivalence aimant permanent

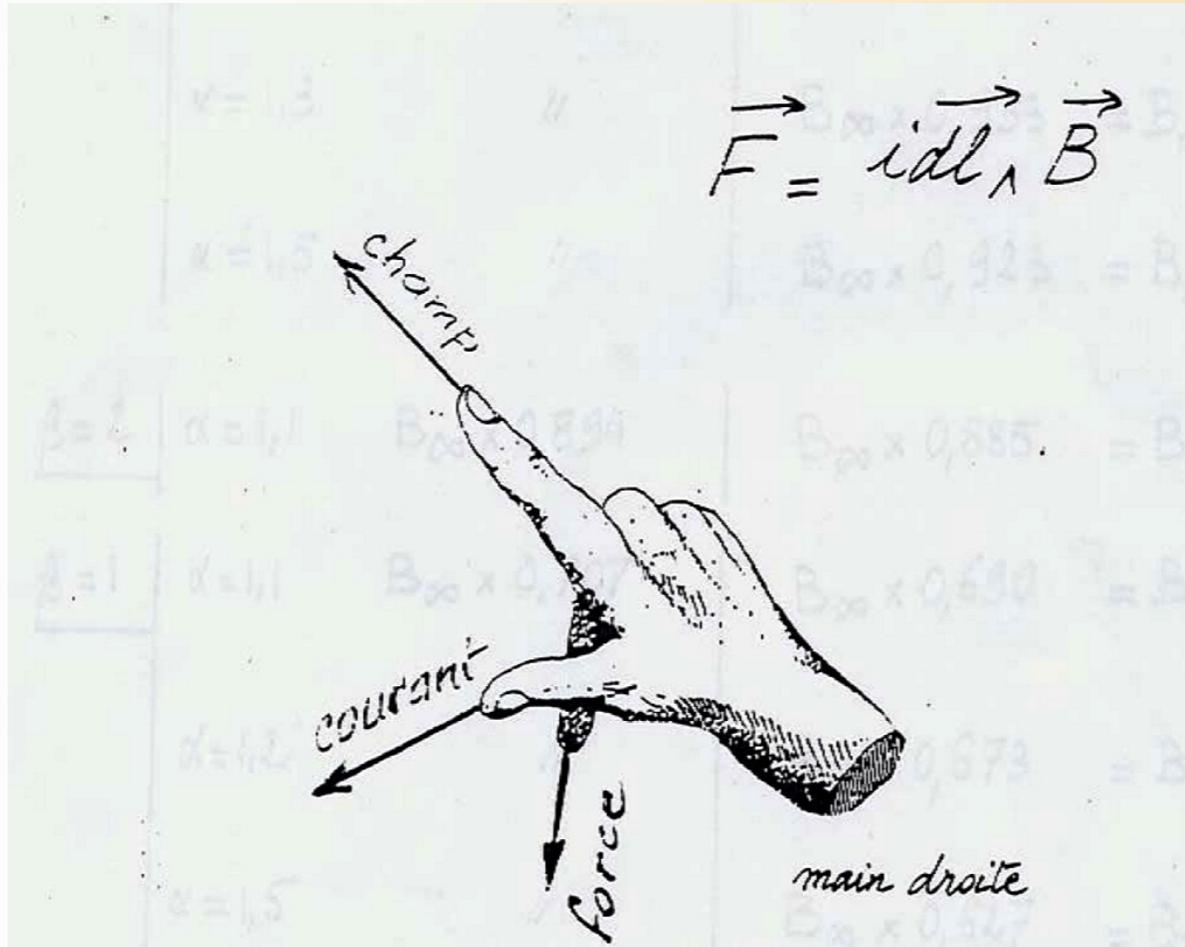


Le flux sort du pôle Nord et va  
du Nord au Sud à l'extérieur de l'aimant



## Règle des 3 doigts de la main droite ( théorème de Laplace)

$$F = BiL$$

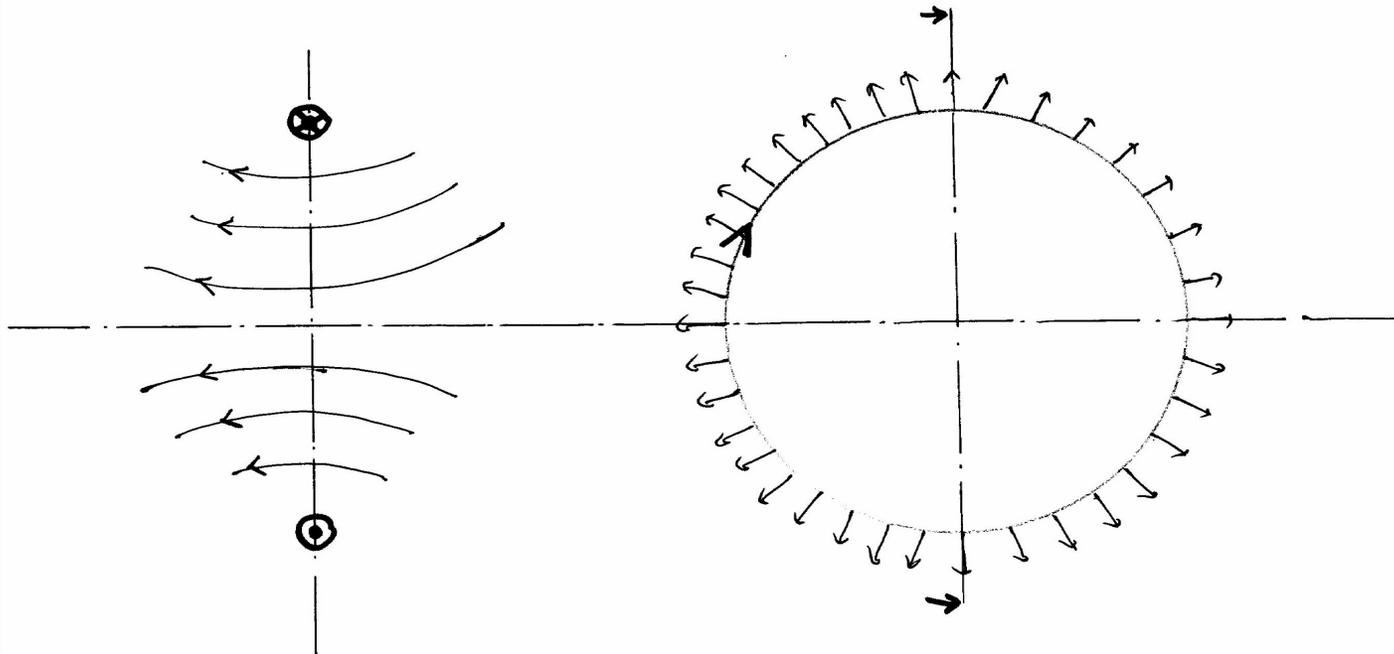


## « Hoop stress »

Forces sur les conducteurs

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

cas de la spire circulaire



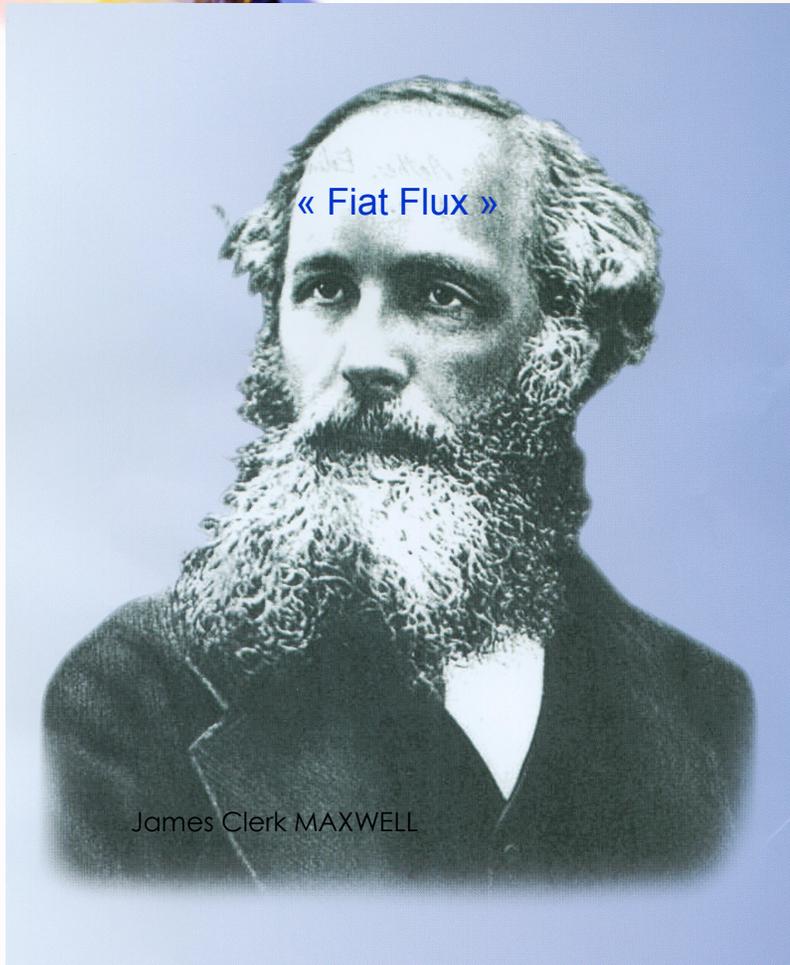


## Définition des tubes de flux

- 1. Le flux est « conservé dans des tubes » et ces tubes doivent se refermer sur eux mêmes.
- 2. La forme des tubes obéit à des lois physiques « très contraignantes »: les équations de Maxwell sont la traduction mathématique de ces lois.
- 3. «  $B$  » est la densité de flux: «  $B$  » croit quand le tube de flux se rétrécit; «  $B$  » décroît quand le tube de flux s'élargit.
- 4. Application pratique : champ d' une spire circulaire



## Les équations de Maxwell



- Du matin au soir, nous obéissons aux équations de Maxwell pour créer du champ magnétique.
- Le champ magnétique est au cœur du fonctionnement des accélérateurs

# Equations de Maxwell

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

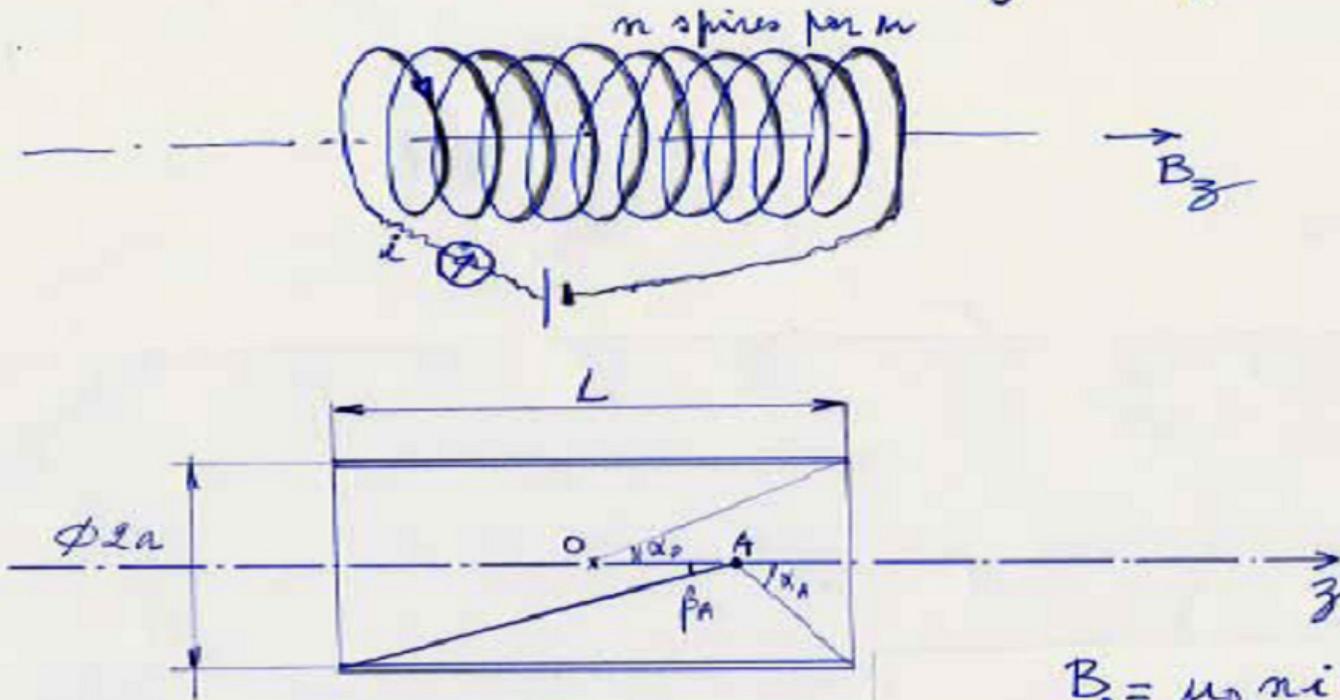
$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{E} = - \operatorname{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$$

## Champ du Solénoïde mince

Solénoïde mince de longueur finie



$$B_0 = \mu_0 n i \cos \alpha_0$$

(  $L \rightarrow \infty$   $B_0 \rightarrow \mu_0 n i$  )

à l'intérieur  $B_A = \frac{\mu_0 n i}{2} (\cos \alpha_A + \cos \beta_A)$



## Champ du Solénoïde épais

- Les formules de champ deviennent compliquées
- Notion de Peak field
- Point de Lehmann
- Compréhension des efforts magnétique internes
- Notion de pression magnétostatique



## Solenöide épais

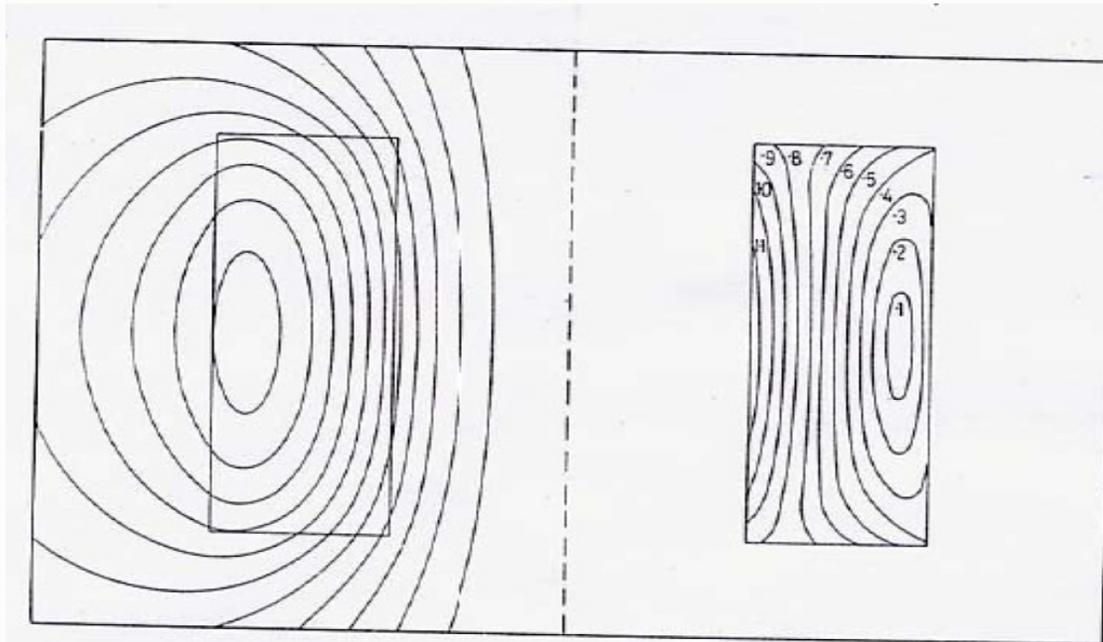
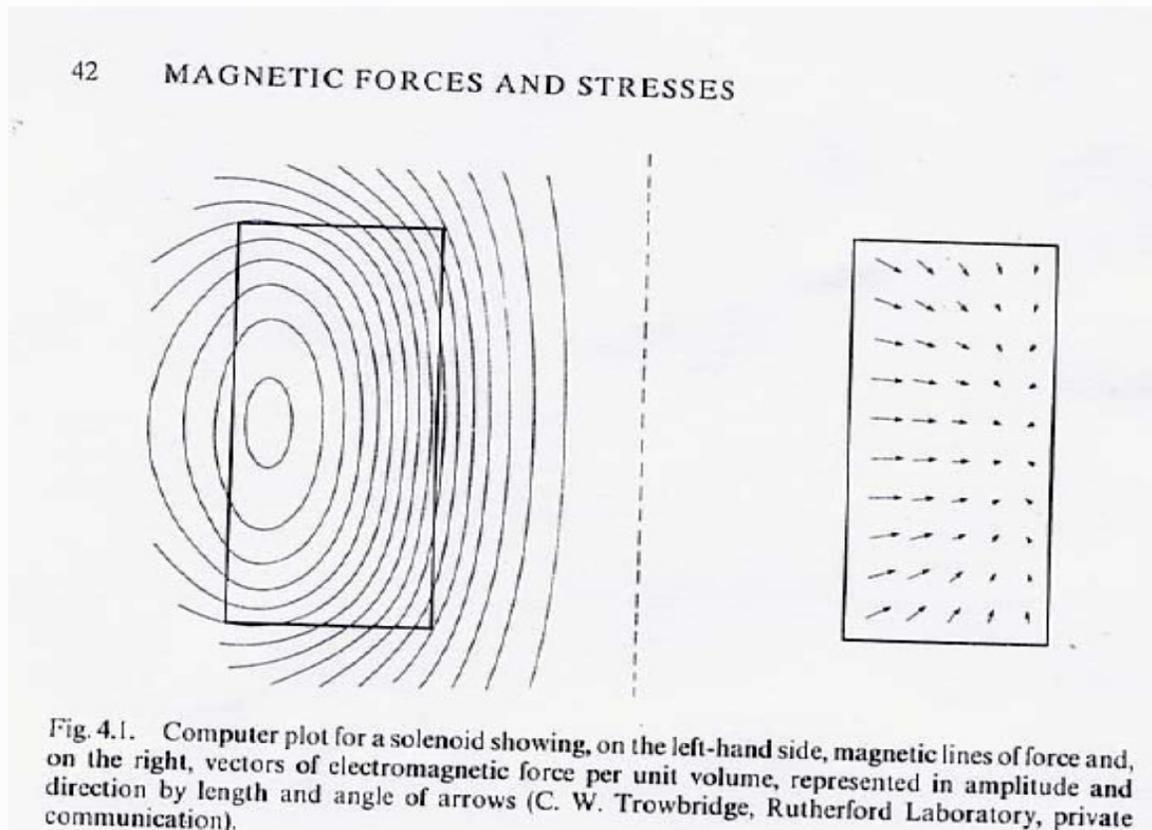


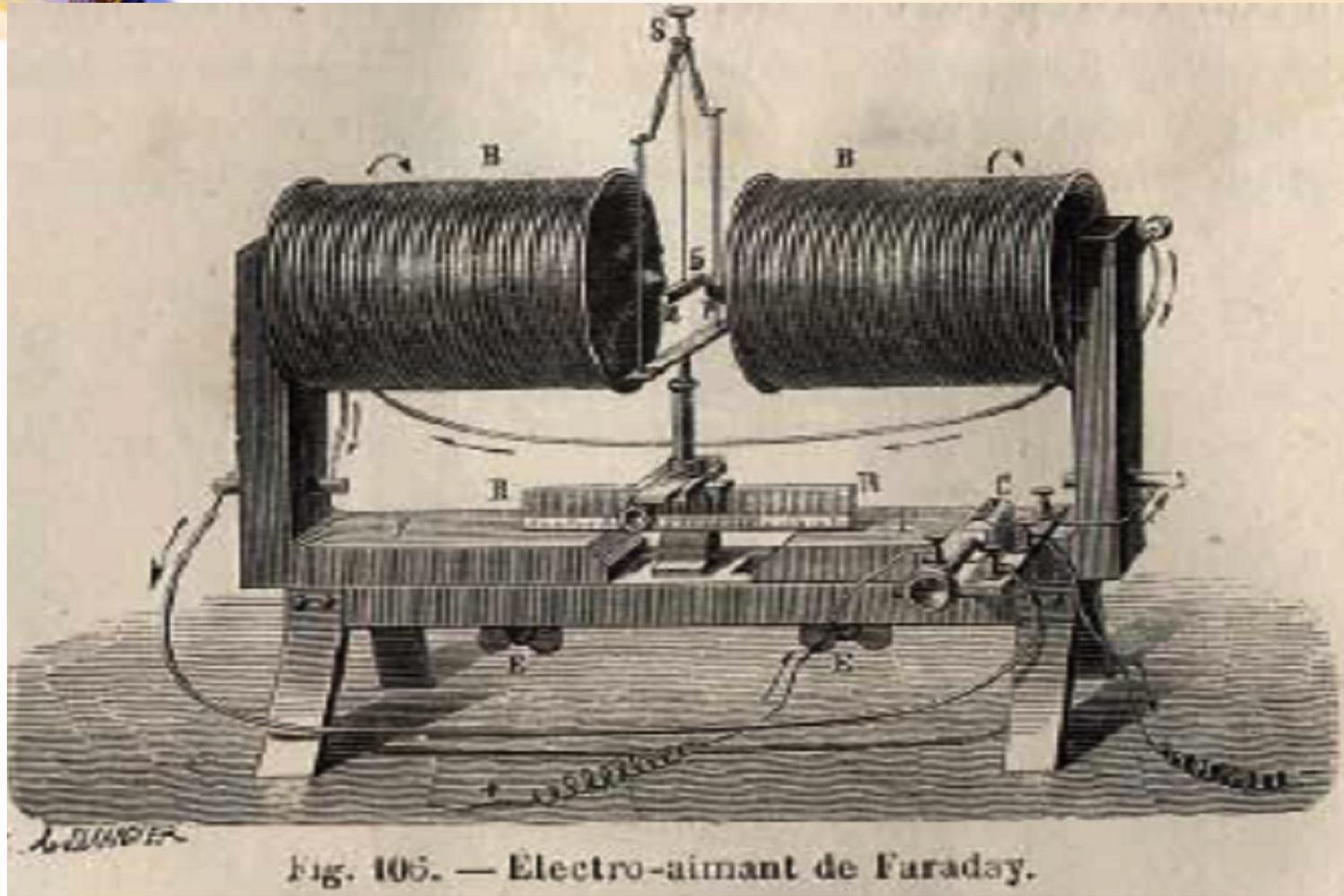
Fig. 3.6. Computer plot of the field in a simple solenoid showing, on the left hand, magnetic lines of force and, on the right hand contours of constant field intensity  $|B|$  relative to the central field  $B_0$  (C. W. Trowbridge, Rutherford Laboratory, private communication).



## La compréhension des forces est primordiale



## Circuit magnétique avec fer





## Rôle du circuit magnétique

- Le rôle du circuit magnétique est de canaliser le flux dans la partie « culasse de retour ».
- On cherche à « travailler » avec  $B_{fer}$  inférieur à 1.7T
- Pour remplir ce rôle l'acier doit présenter une perméabilité magnétique très élevée.
- Le rôle du circuit magnétique est aussi de créer la forme des équipotentielles dans la partie polaire.
- Pour remplir ce rôle l'acier doit être usiné ou découpé avec grande précision.
- Les tolérances mécaniques sont inférieures ou égales à la dizaine de microns

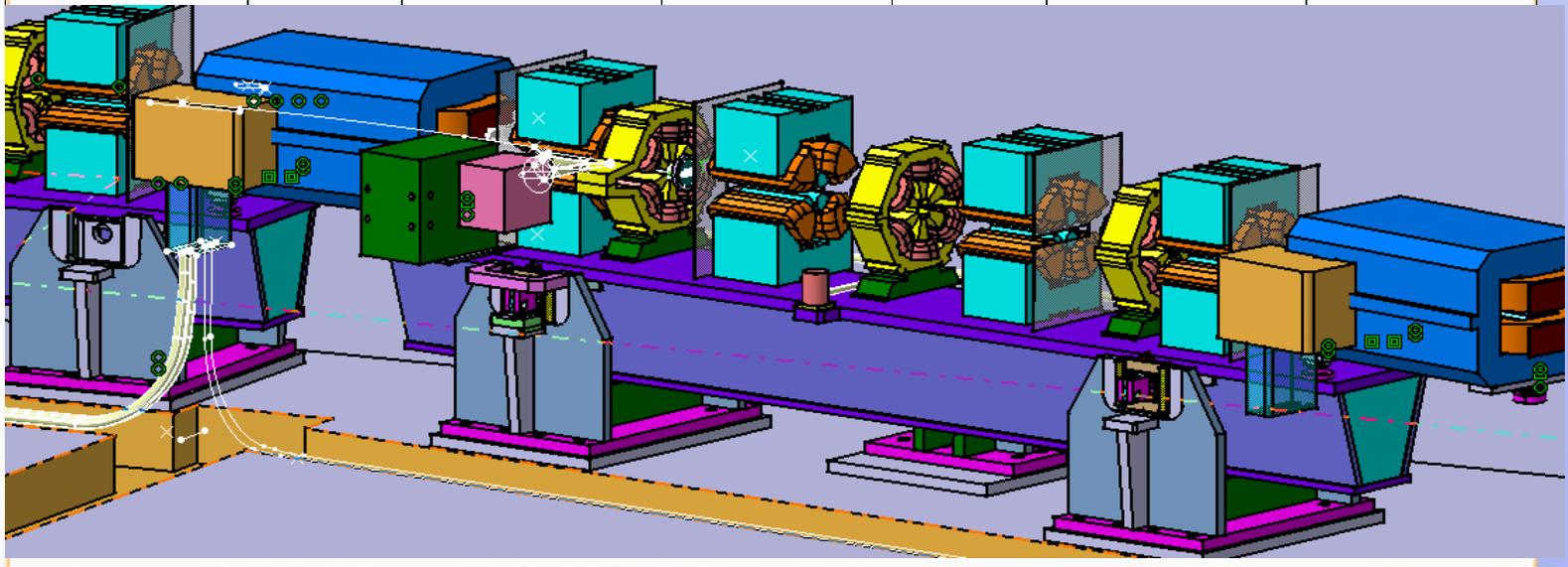


## Les différents aimants d' accélérateurs

- Électroaimant dipolaire: structure, lignes de flux , aspect technologique.
- Électroaimant quadrupolaire: structure, lignes de flux , aspect technologique.
- Électroaimant sextupolaire: structure, lignes de flux , aspect technologique.

# Tableau des aimants SOLEIL

	RING			BOOSTER		
	Dipoles	Quadrupoles	Sextupoles	Dipoles	Quadrupoles	Sextupoles
Number	32	160	120	36	44	28
Force	1.71 T	19et 23 T/m	320 T/m <sup>2</sup>	0.74 T	11 T/m	16 T/m <sup>2</sup>
Length(mm)	1052	320 ou 460	160	2160	400	150





## Electroaimant dipolaire

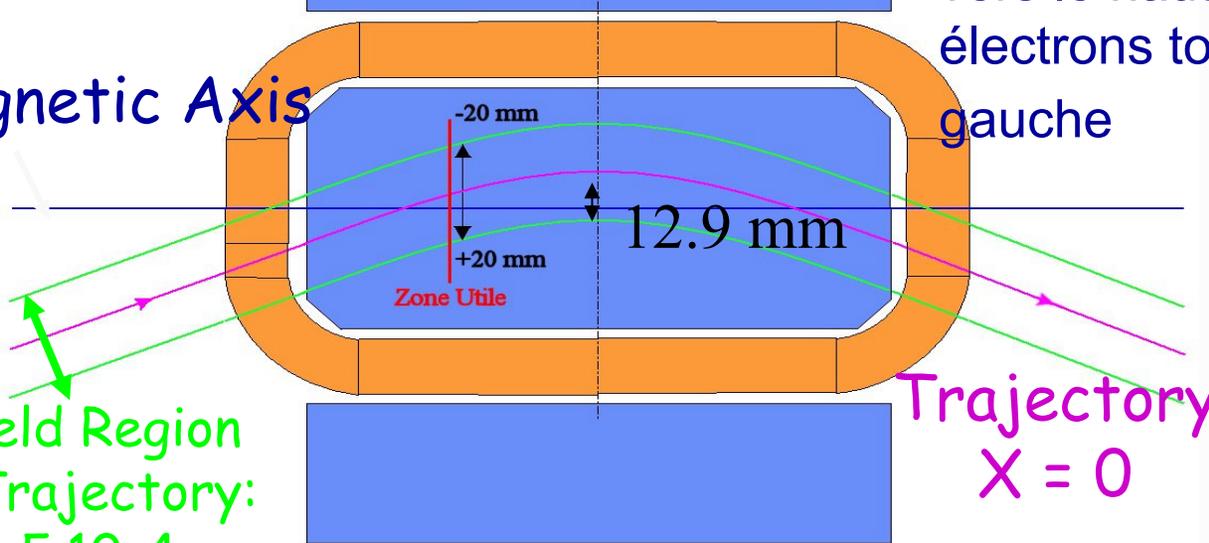
- Structures
- Lignes de flux
- Aspect technologique



Dipole

Quand le champ est vers le haut, les électrons tournent à gauche

Magnetic Axis



Good Field Region around Trajectory:  $DB/B < 5 \cdot 10^{-4}$

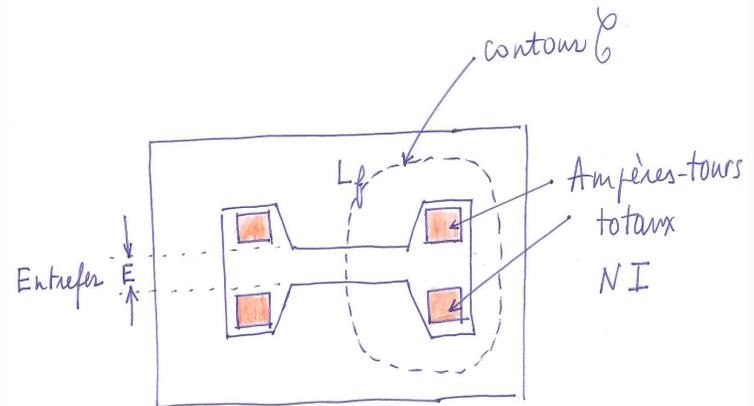
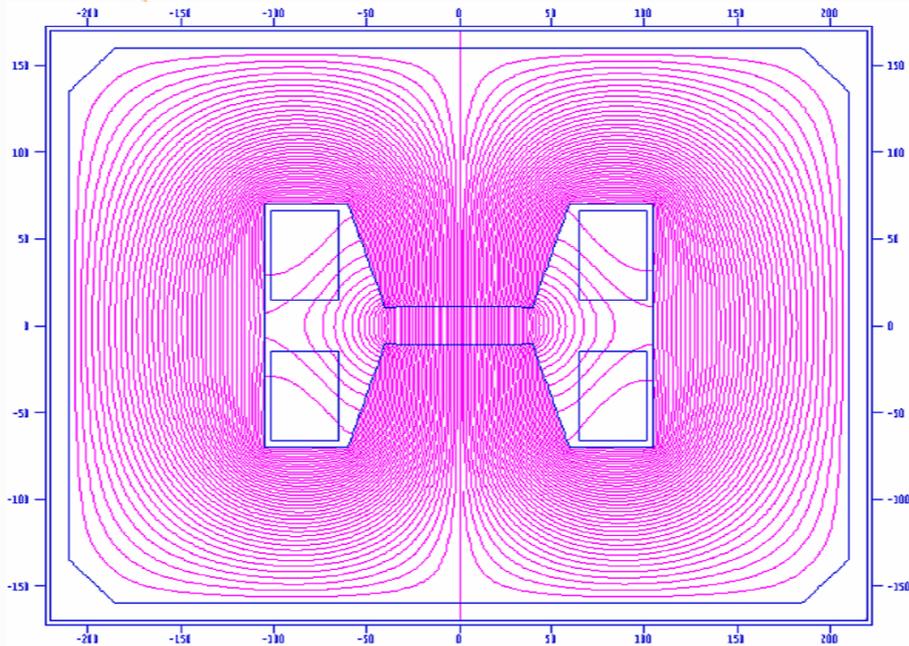
Trajectory  $X = 0$

Les principales caractéristiques sont :

Nominal induction :	1.71	teslas
Entrefer:	37.00	mm
Rayon de courbure :	5360.00	mm
Angle de déflexion :	11.25	degrés



## Tubes de flux d'un dipôle (dipôle booster SOLEIL)





## Tracé des tubes de flux d' un dipôle

- Considérons un circuit magnétique : air+fer
- Prenons l'exemple d'un aimant en **H**
- Le flux va du Nord au Sud dans l'entrefer et sort perpendiculairement à la surface du pôle
- Le flux est canalisé dans des tubes
- Ces tubes se referment sur eux-mêmes
- Il y a un flux supplémentaire dû aux bobines
- Les logiciels de calcul établissent la carte complète de **B**



## Détermination des ampères-tours

Théorème d'Amperé :

$$\int_{\mathcal{C}} H dl = NI$$

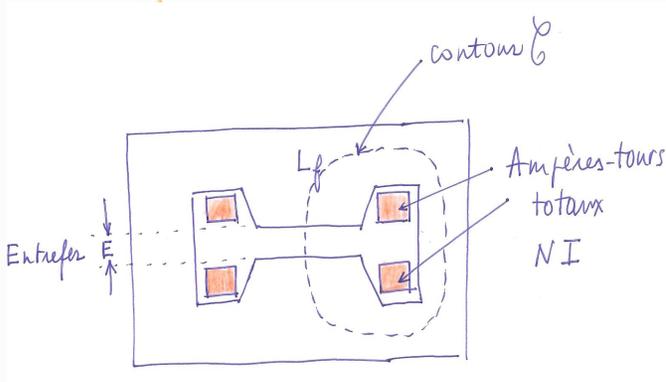
$$\int_{\text{air}} H dl + \int_{\text{fer}} H dl = NI$$

$$\frac{B_0}{\mu_0} \times E + \frac{B}{\mu_2 \mu_0} L_f = NI$$

$\mu_2 \# 500$

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{E}$$

1 A      1 mT      1.25 mm





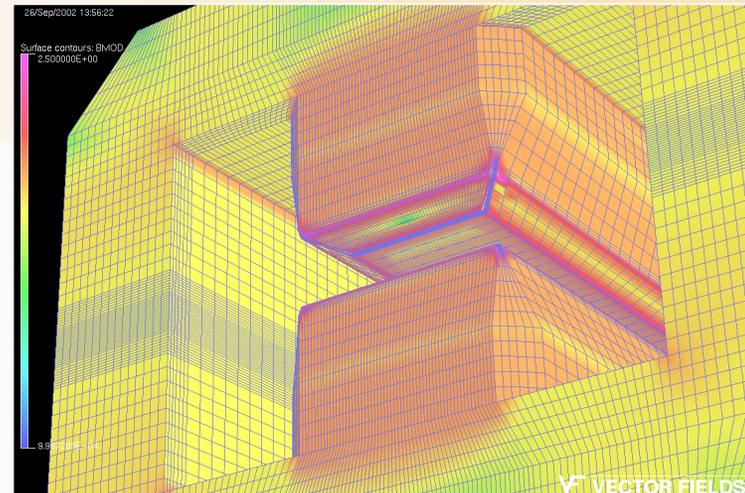
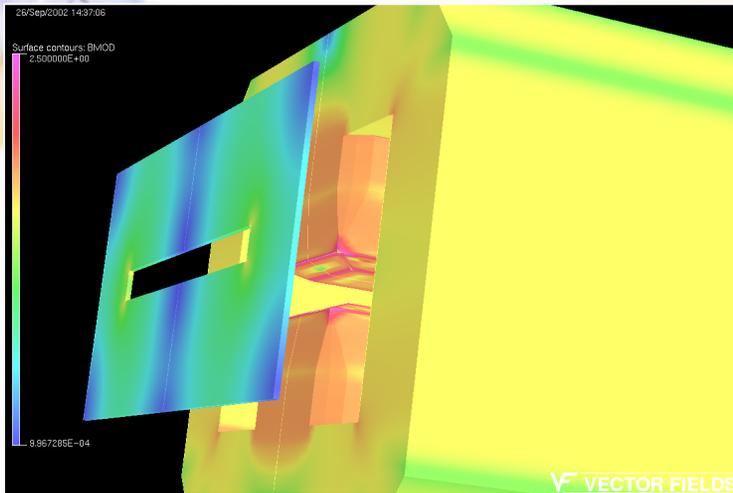
## Le chanfrein latéral et le chanfrein d'extrémité



Le chanfrein latéral est utilisé pour limiter la saturation.

Le chanfrein d'extrémité est utilisé pour ajuster la longueur magnétique

## Conception magnétique des dipôles



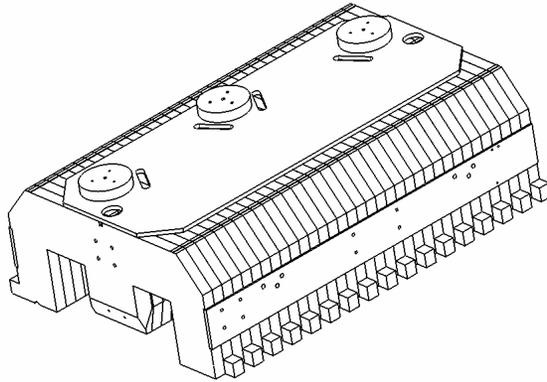
**Le logiciel utilisé dans cet exemple pour calculer le champ magnétique est « TOSCA3D » de la Société VectorFields.**

**La structure en « H » permet de limiter la saturation et de produire un champ symétrique.**

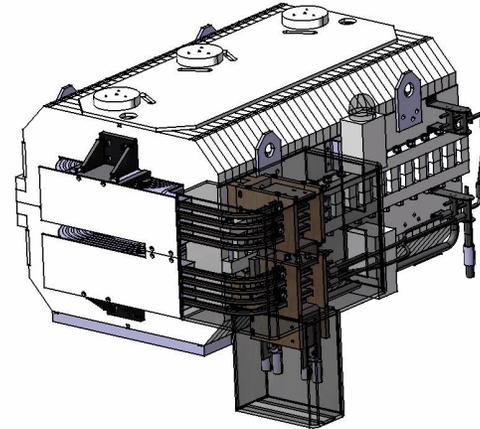
**Le circuit magnétique est magnétisé par des bobines de cuivre non représentées ci-dessus et parcourues par un courant continu de 600A.**



## Magnet construction



Vue isométrique  
Echelle : 1:5



construction reference scenario.

1.mm laminations in soft iron

- Collage des laminations sous pression
- Soudure extérieure des demi-culasses
- Usinage des chanfreins d'extrémité et des références



## Spécifications de l'acier

1. Mode d'élaboration
2. Caractéristiques chimiques
3. Caractéristiques magnétiques: contrôle de la courbe de perméabilité par échantillons toriques , contrôle du champ coercitif
4. Pour les aciers massifs contrôle aux ultrasons
5. Contrôles dimensionnels

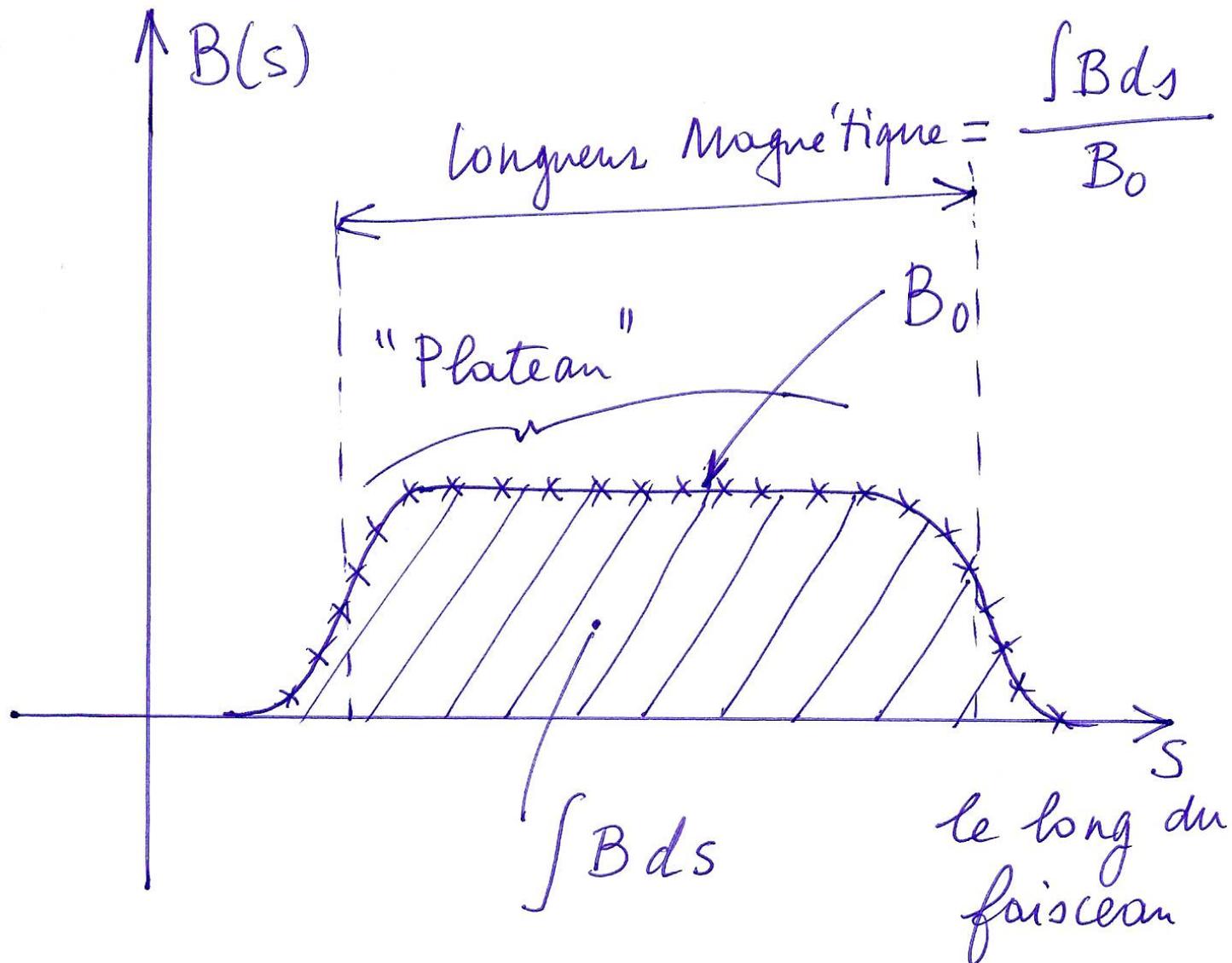


## Spécifications des bobines

1. Le conducteur Cuivre OFHC
2. Mise en forme des bobinages : technique de la double galette
3. Technologie d'isolation des bobines et le contrôle d'isolement
4. Imprégnation sous vide
5. Equipements de sécurité

## Dipole de l'anneau de stockage : 3,7 tonnes







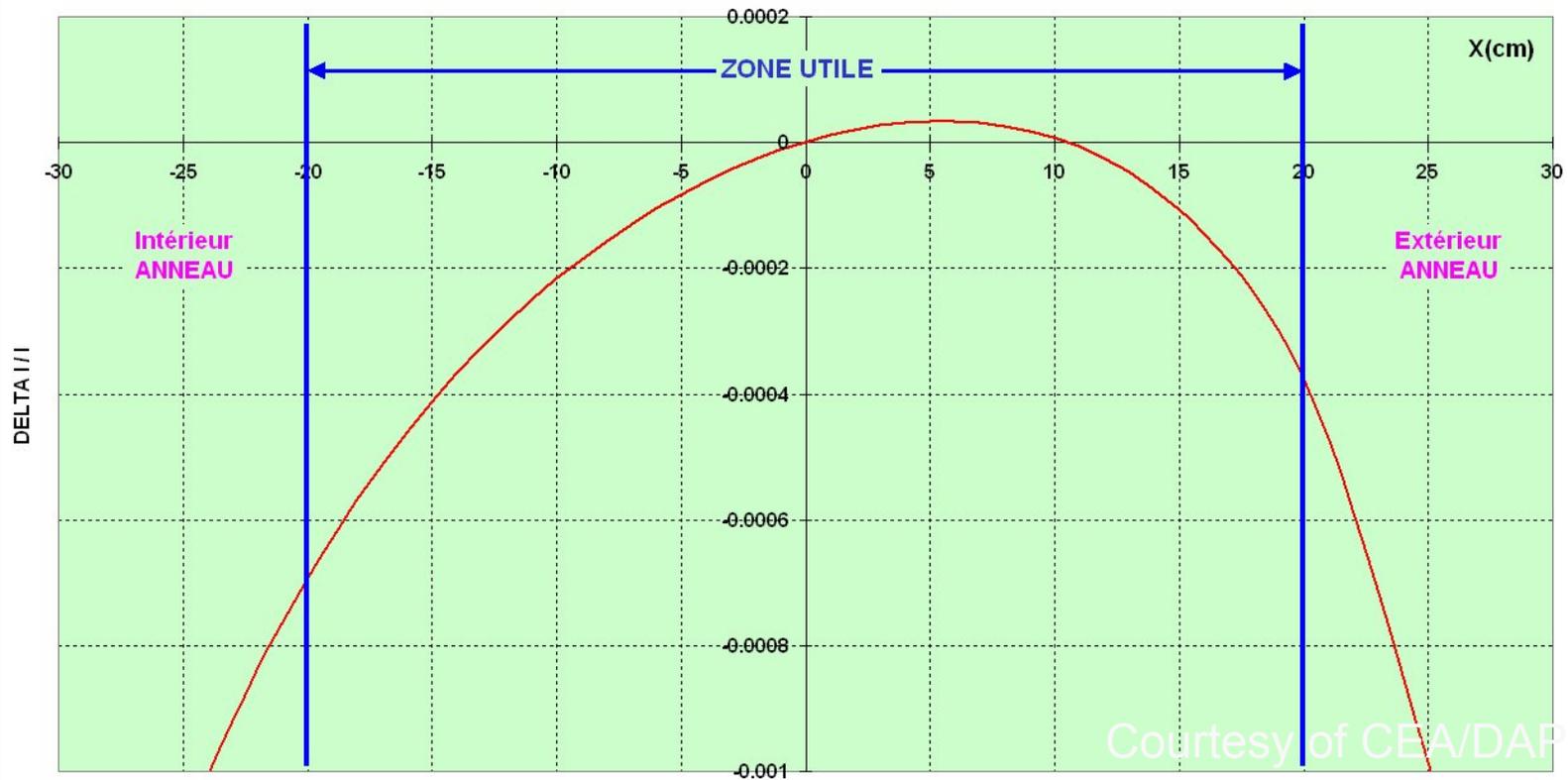
## Définition de la longueur magnétique

- Les équations du champ magnétique ne permettent pas de créer un champ magnétique en pur créneau champ « hard edge »
- Le champ magnétique a nécessairement une courbe de montée de champ ,le « champ de fuite d' entrée »
- Le champ magnétique a nécessairement une courbe de descente de champ ,le « champ de fuite de sortie »
- On appelle « Plateau » la région où le champ est constant
- On appelle « champ au centre » la valeur , notée  $B_0$  , du champ sur ce plateau



# Qualité du champ magnétique calculé

HOMOGENEITE DES INTEGRALES DE CHAMP du dipôle anneau SOLEIL  
Packing factor 0.98 - courbe B(H) ESRF  
plaque de garde 6 mm à 129 mm du pôle - chanfrein d'extrémité 15 mm / 26.5 mm  
NI=26750 At -  $B_0=17131$  Gauss



Courtesy of CEA/DAPNIA



## Le plan médian magnétique

Pour 2 points situés symétriquement par rapport au plan médian: la composante verticale est la même et la composante horizontale change de signe.

- Le P.M.M. est un plan d'antisymétrie magnétique.
- $B_x(x_0, -y_0) = -B_x(x_0, y_0)$  donc  $B_x = 0$ . Dans le P.M.M.
- $B_y(x_0, -y_0) = B_y(x_0, y_0)$  donc B purement vertical dans le P.M.M.
- Il en résulte que les particules qui se déplacent dans le P.M.M. ( position et vitesse) restent dans ce plan.
- **Il est très important de respecter la symétrie du P.M.M.**



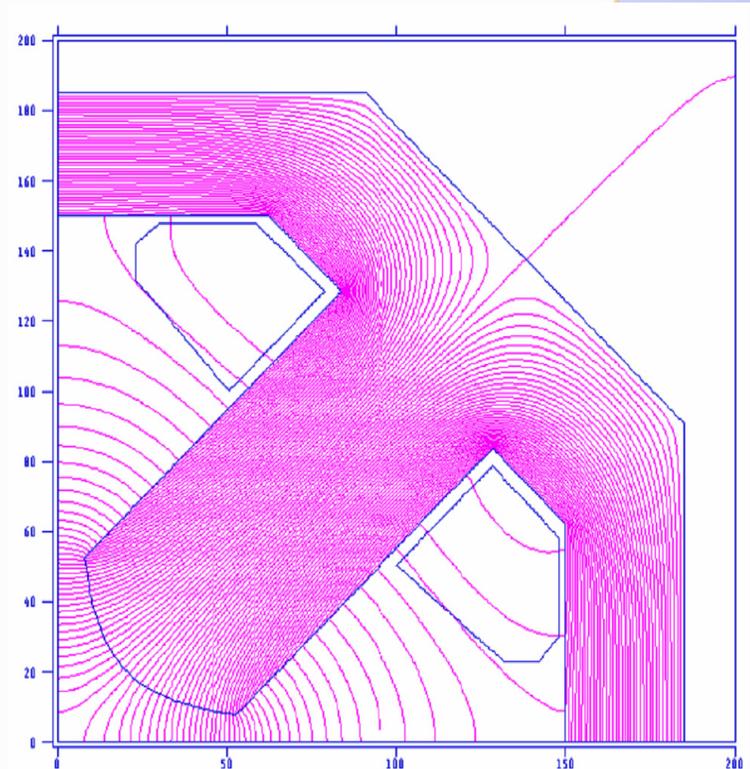
## Structure du Quadrupole

1. L' électroaimant quadrupolaire classique est un aimant « dominé par le fer »
2. On démontre que 4 pôles Sud,Nord,Sud,Nord ayant un profil d' hyperbole équilatère  
 $X*Z=0.5*A**2$  créent un champ magnétique :  
 $BZ=G*X$  et  $BX=G*Z$  où  $G$  est le gradient
3. Le gradient s'exprime en Tesla/mètre: T/m
4. Dans un quadrupole le module de  $B$  est constant sur un cercle de rayon  $r$  et proportionnel à  $r$
5. Dans la pratique on limite les équipotentielles hyperboliques pour placer les Ampères-tours



## Tracé des tubes de flux d' un quadrupole

1. Par symétrie « B » est nul au centre.
2. Le Flux va du Nord au Sud et sort perpendiculairement à la surface des pôles.
3. Les tubes se rétrécissent à mesure que l'entrefer apparent diminue
4. Les bobines créent un flux supplémentaire
5. La culasse canalise tout ce flux en trèfle à 4 feuilles





## Aspects technologiques du Quadrupole

1. Le profil hyperbolique ou hyperbolique corrigé doit être réalisé avec grande précision: usinage ou découpe de tôles
2. Les 4 sommets de pôles doivent s' appuyer sur le cercle de gorge
3. La position géométrique des 4 pôles doit être bien respectée sur les axes à 45 degrés
4. Par mesure magnétique on peut déterminer le centre magnétique et la direction du plan médian
5. Le gradient diminue car les pôles sont des hyperboles non infinies
6. En usinant un chanfrein d' extrémité on peut corriger le défaut dodécapolaire intrinsèque



## Définition de l' homogénéité de gradient

Le gradient diminue car les poles sont des hyperboles non infinies

- On trace l' homogénéité de gradient relative
- $\Delta G(x)/G_0 = C_6 x^5 + C_{10} x^9 + \dots$
- Dans un quadrupole le premier défaut a une variation en  $x^5$ , c' est un dodécapole
- On définit ainsi les harmoniques de champ successifs naturels ou non
- Il faut définir un rayon de référence dans lequel le D.L. doit converger



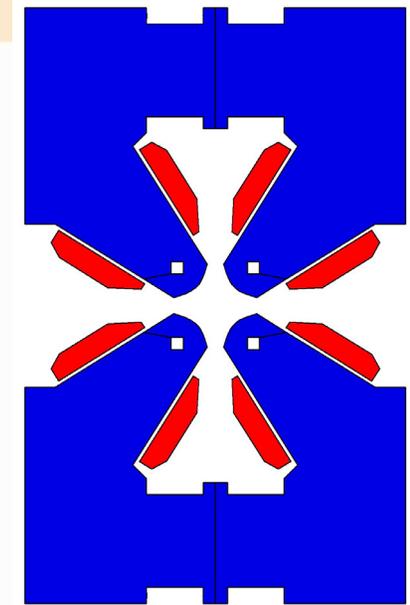
## Conception magnétique du Quadrupole

Soleil a deux types de quadrupoles:

- 128 quadrupoles courts (19T/m)
- 32 quadrupoles longs (23T/m)

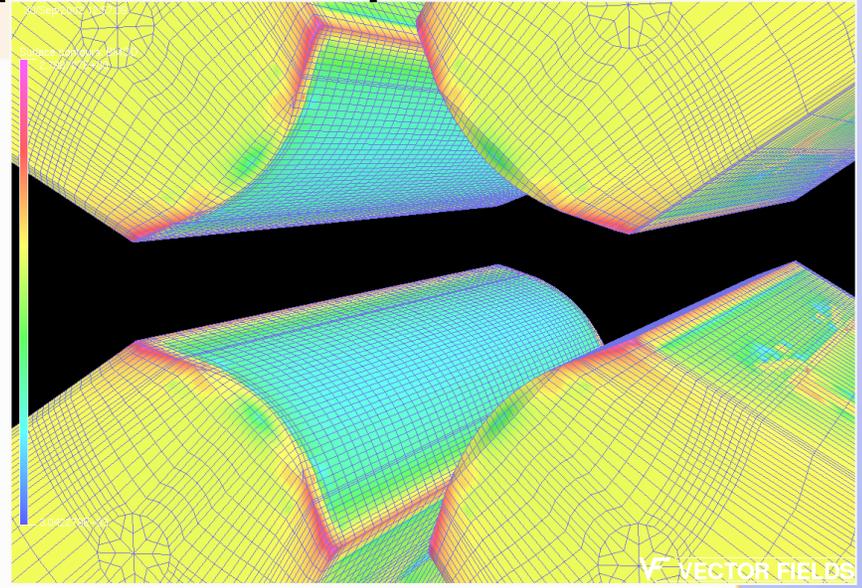
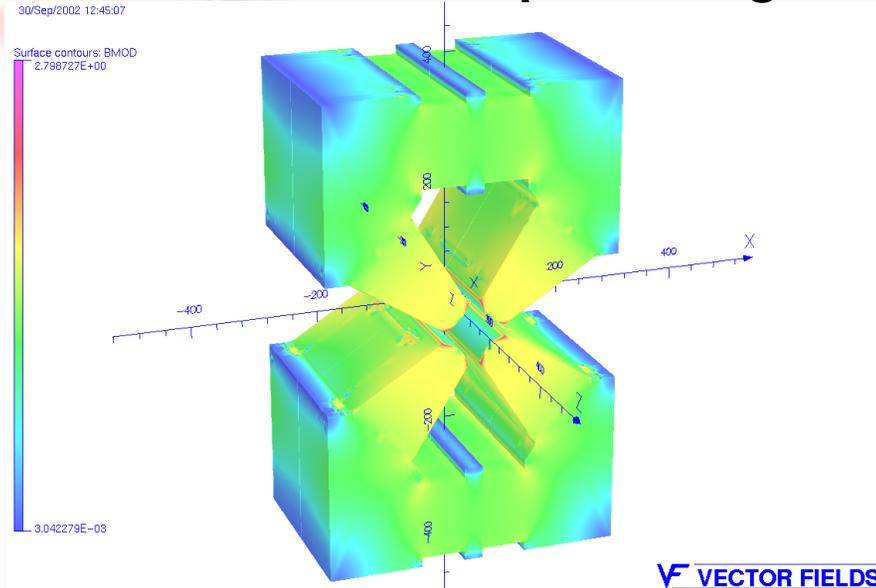
Tous les quadrupoles ont la même section courante et ont la structure magnétique en “figure of 8”.

Aucun flux ne passe à travers le plan médian ce qui permet d'installer un pompage latéral sur le rayon intérieur et d'accueillir les sorties de lignes de lumière sur le rayon extérieur.





# Conception Magnétique du Quadrupole



Courtesy of CEA/DAPNIA

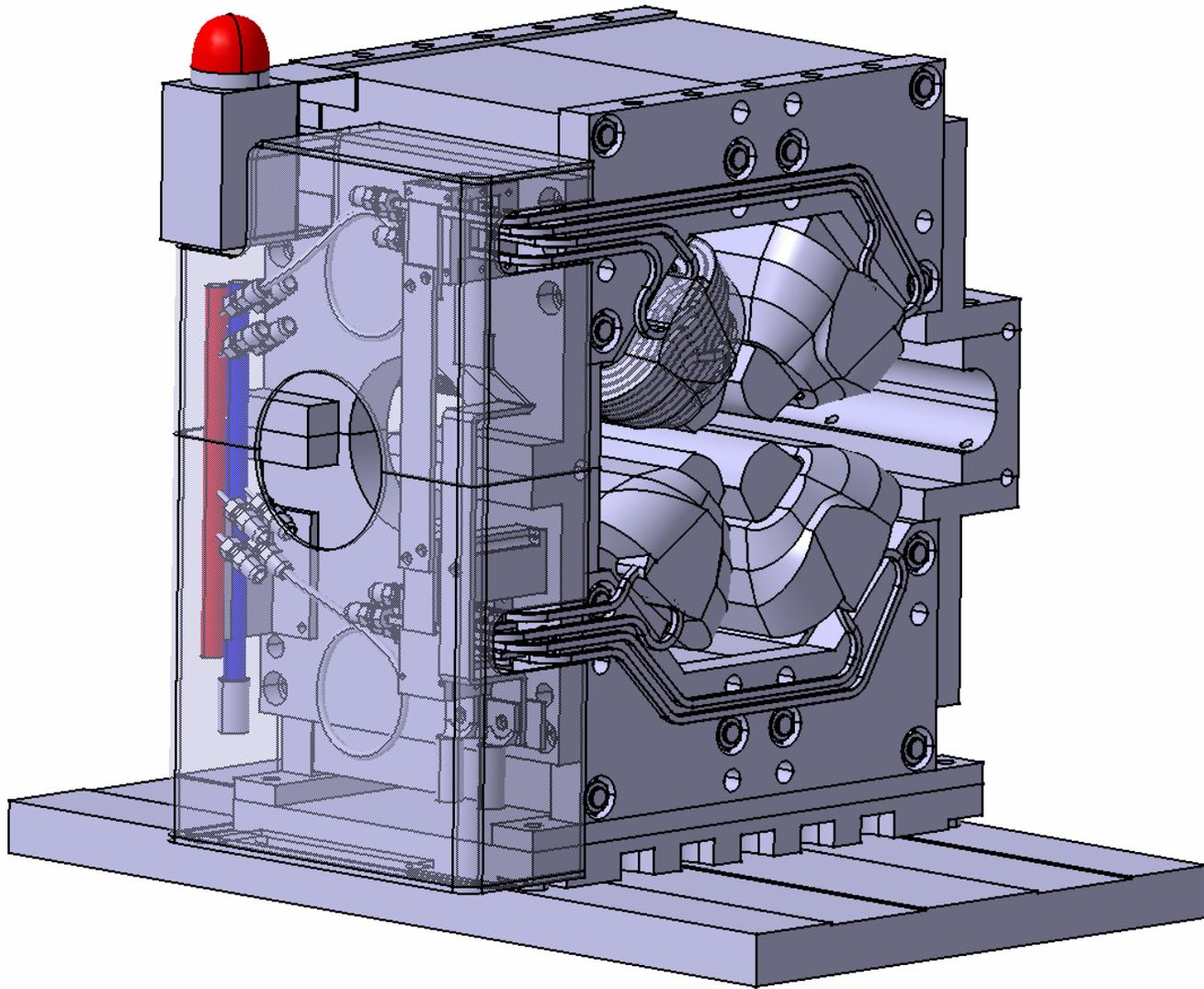
Le modèle 3D complet du Quadrupole a été calculé avec TOSCA.

Pour respecter les tolérances il faut un profil 2D « parfait » et un chanfrein d'extrémité optimisé

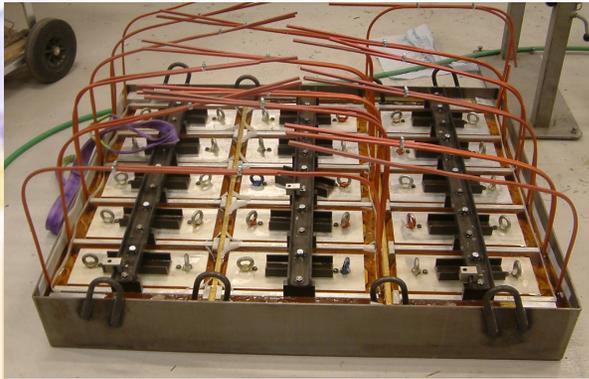


## Le terme dodécapolaire dans le champ de fuite des quadrupoles

- A l'extrémité du quadrupole la chute du gradient se manifeste par l'apparition du premier harmonique naturel : on laisse s'exprimer un  $\text{dB/dZ}$
- Il s'agit d'un dodécapole négatif
- On le corrige en « défavorisant » les petits rayons (centre du quadrupole) par l'usinage d'un petit chanfrein
- Les simulations 3D permettent, de nos jours, de prédéterminer ce chanfrein avec une « assez bonne » confiance



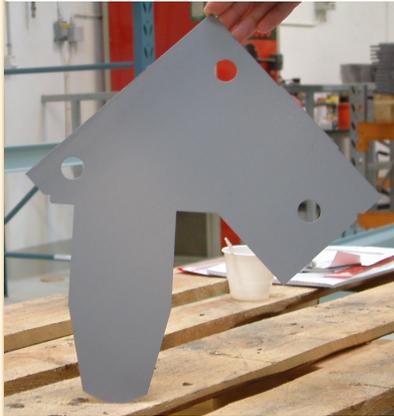
1



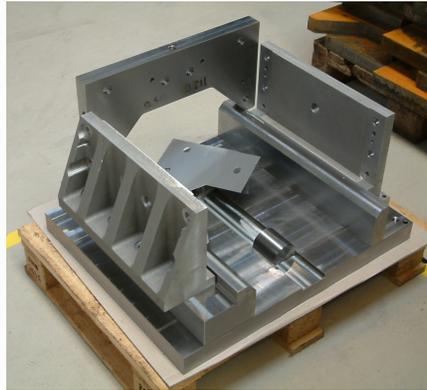
2



3



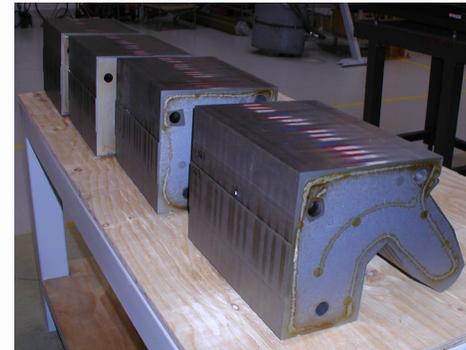
4



5



6



Photos of Quadrupole production :  
 Mould(1) Coil(2) Lamination(3)  
 Tooling(4&5) Yoke Quarter(6)

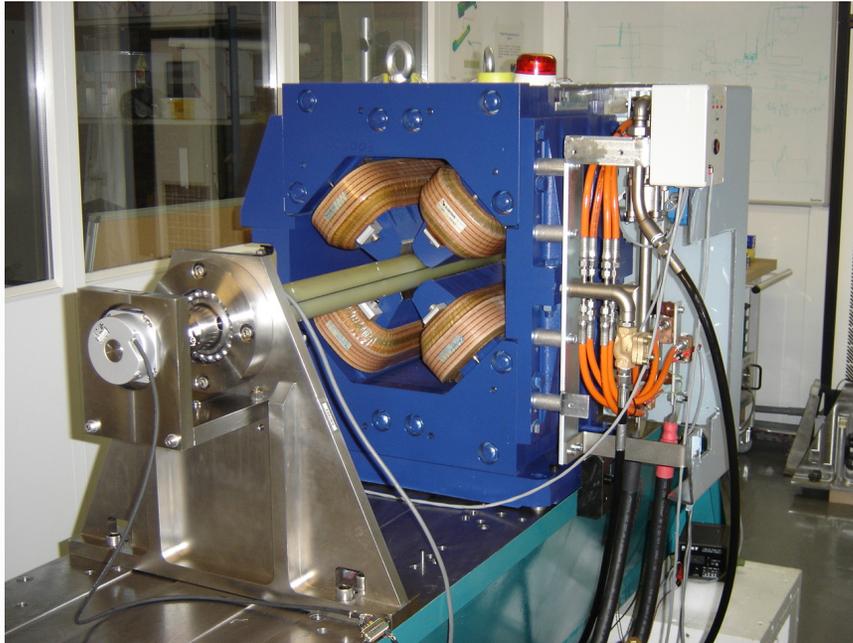
Courtesy of DANFYSIK



**Prototype  
du Quadrupôle Anneau  
(observer le logement  
des pièces d'extrémité)**

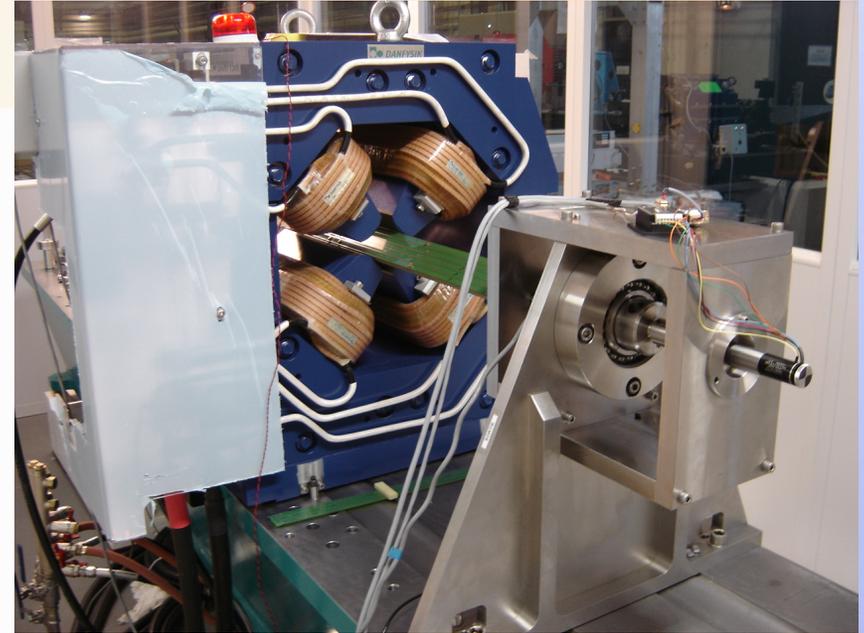
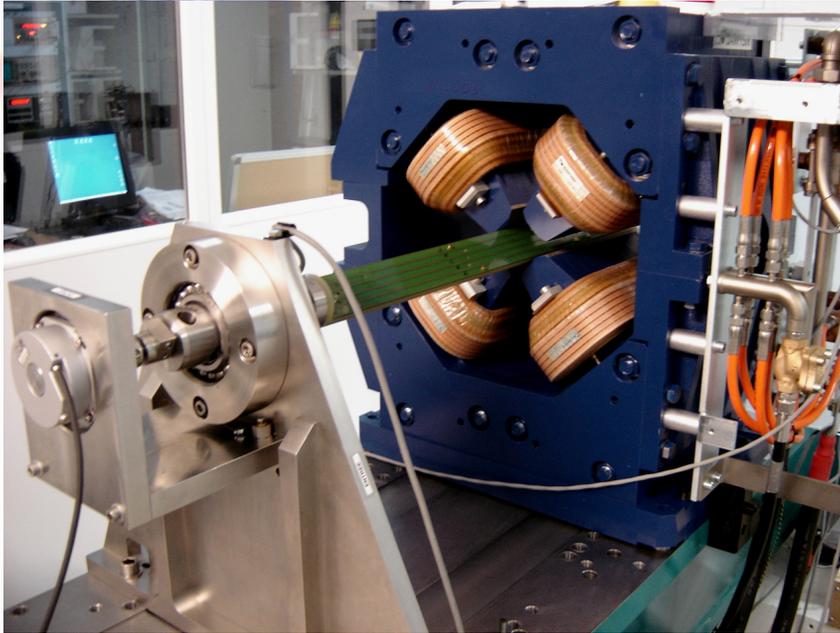


## BMS description:dedicated harmonic bench « Banc Multipolaire Soleil »



- Le BMS est basé sur une poutre anneau avec les mêmes interfaces mécaniques , électriques et hydrauliques.
- Deux « Vés » et un cylindre inox très précis permettent de régler la position de l'axe des paliers
- La salle de mesures est climatisée et contient l'alimentation électrique à 20.ppm

# BMS components including improvements



**1 measurement = direct and reverse rotations with 64 tensions integrated by the METROLAB Voltmeter triggered by angles**

**Rotation: by controlled DC motor**

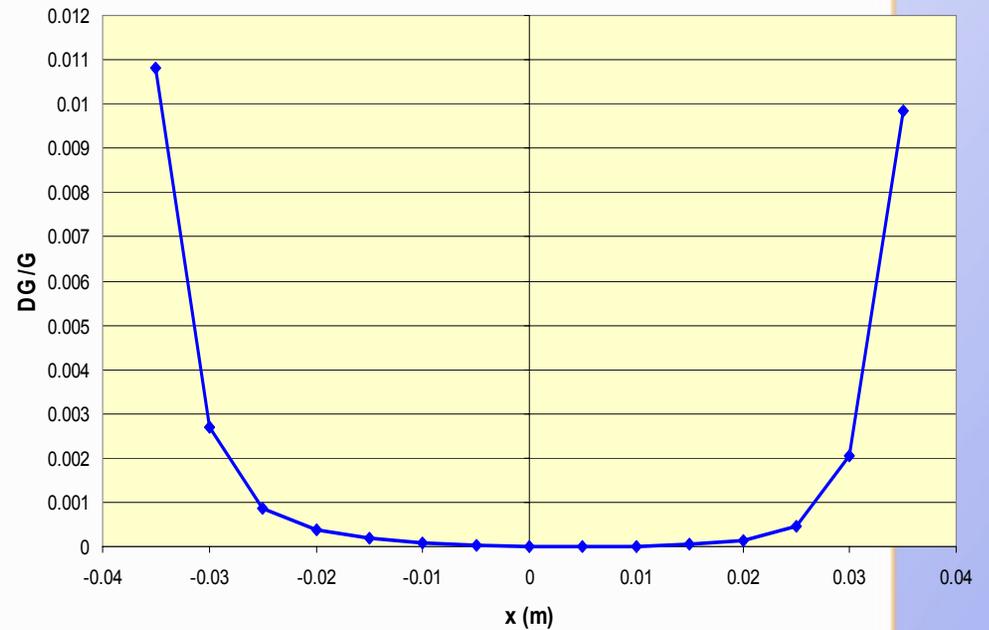
**Angular measurement: Heidenhain encoder 720000 steps/tour with absolute index**

# Homogénéité de gradient (Q003)



Normal Component	Requested by GPM	Measured by GMI
3	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$-0.42 \cdot 10^{-4}$
4	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$1.43 \cdot 10^{-4}$
5	–	$-0.56 \cdot 10^{-4}$
6	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$0.04 \cdot 10^{-4}$
7	–	$-0.01 \cdot 10^{-4}$
8	–	$0.59 \cdot 10^{-4}$
9	–	$-0.04 \cdot 10^{-4}$
10	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$0.60 \cdot 10^{-4}$
11	–	$0.02 \cdot 10^{-4}$

DeltaG(x)/G0 for z=0.



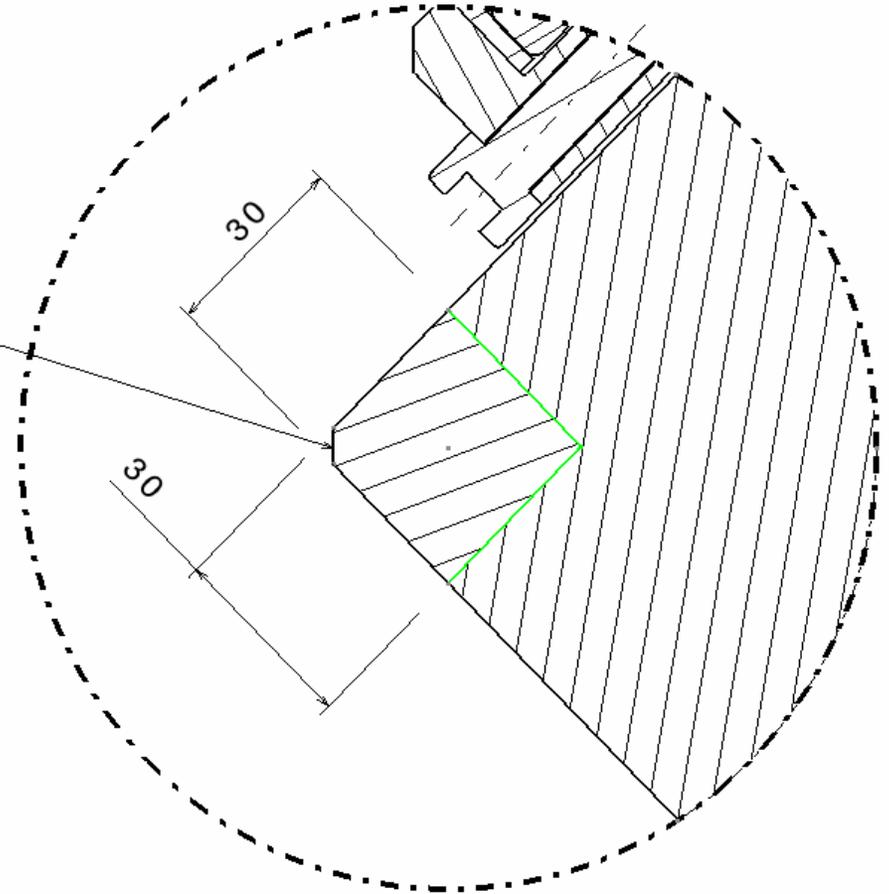
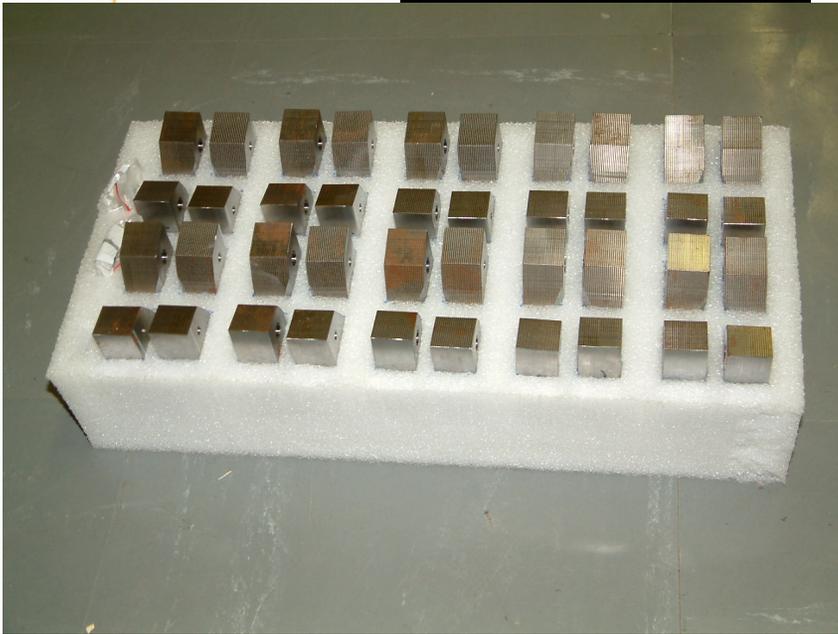
After R=0.032 m the curve is extrapolated



## Optimisation du chanfrein d'extrémité

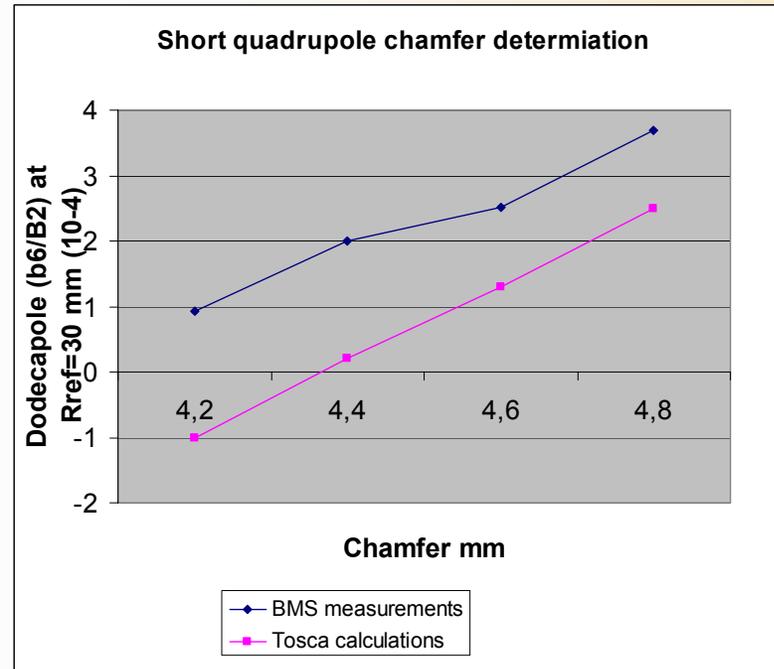
Sur chacun des 4 poles et à chaque extrémité du quadrupole prototype on a prévu des pièces démontables très précises pour tester plusieurs valeurs de chanfrein

Test Chamfer





## Experimental Optimisation of the end chamfer



- A set of different chamfers has been tested
- Both short prototype Quadrupole **QC** & long prototype Quadrupole **QL** have been measured on BMS
- 12 pole component behaviour is plotted
- Final chamfers have been fixed for series production

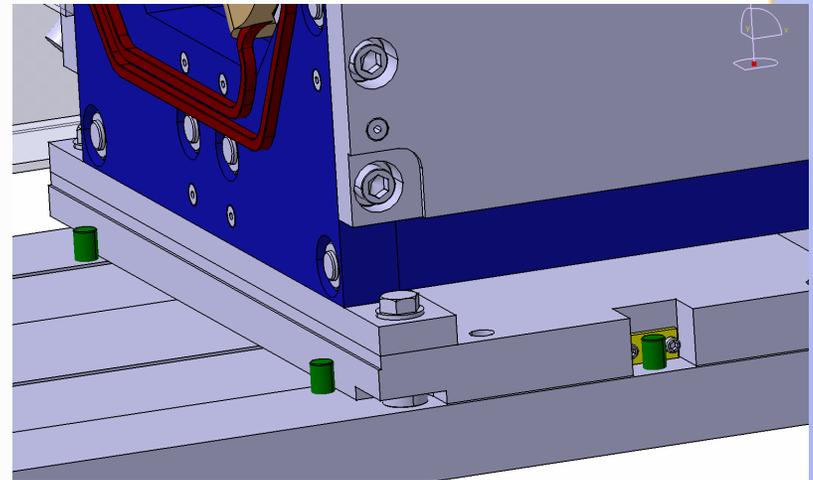
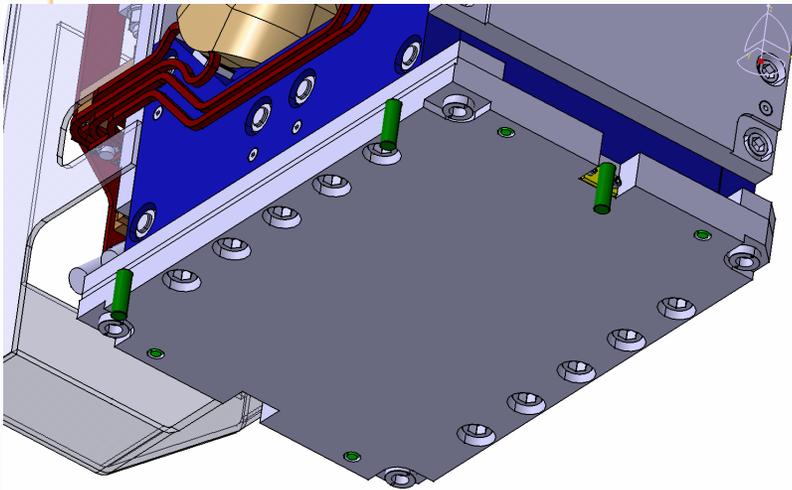
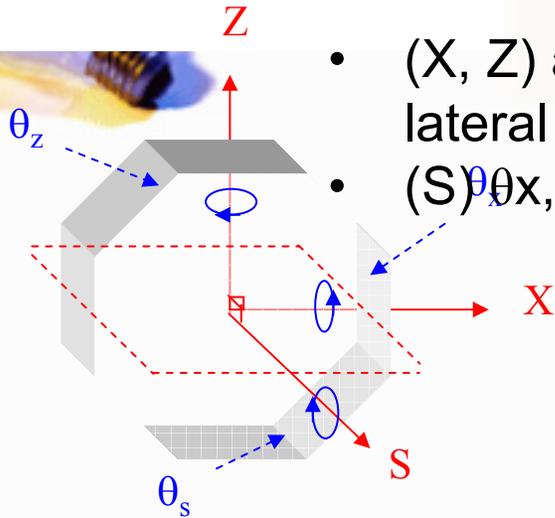


## Qu' avons nous appris en mesurant les Quadrupoles ?

- La précision relative de la connaissance du champ magnétique est remarquable.
- La compréhension des erreurs systématiques et les méthodes de mesure développées depuis 3 décennies permettent d' améliorer la précision sur les harmoniques et de réaliser un gradient quasi constant;
- La recherche du centre magnétique avec une précision absolue de 25 microns est possible.
- la détermination de l' angle de la composante tournée reste très difficile.

# Shimming du quadrupole sur la poutre

- (X, Z) and  $\theta_s$  are adjusted by 4 washers and 1 lateral shim
- (S)  $\theta_x$ ,  $\theta_z$  are given mechanically by construction.





# Electroaimant sextupolaire

1. Structure
2. Lignes de flux
3. Aspect technologique



## Le sextupole

- Le sextupole a 6 pôles et permet de corriger certaines aberrations dans l'optique des particules
- Le rôle des sextupoles est particulièrement important dans l'anneau SOLEIL qui a une acceptance en énergie de 6% (ceci permet de ramener les électrons égarés)
- Dans SOLEIL les sextupoles accueillent 3 jeux de bobines de correction: dipolaire horizontale, dipolaire verticale et quadrupole tourné.

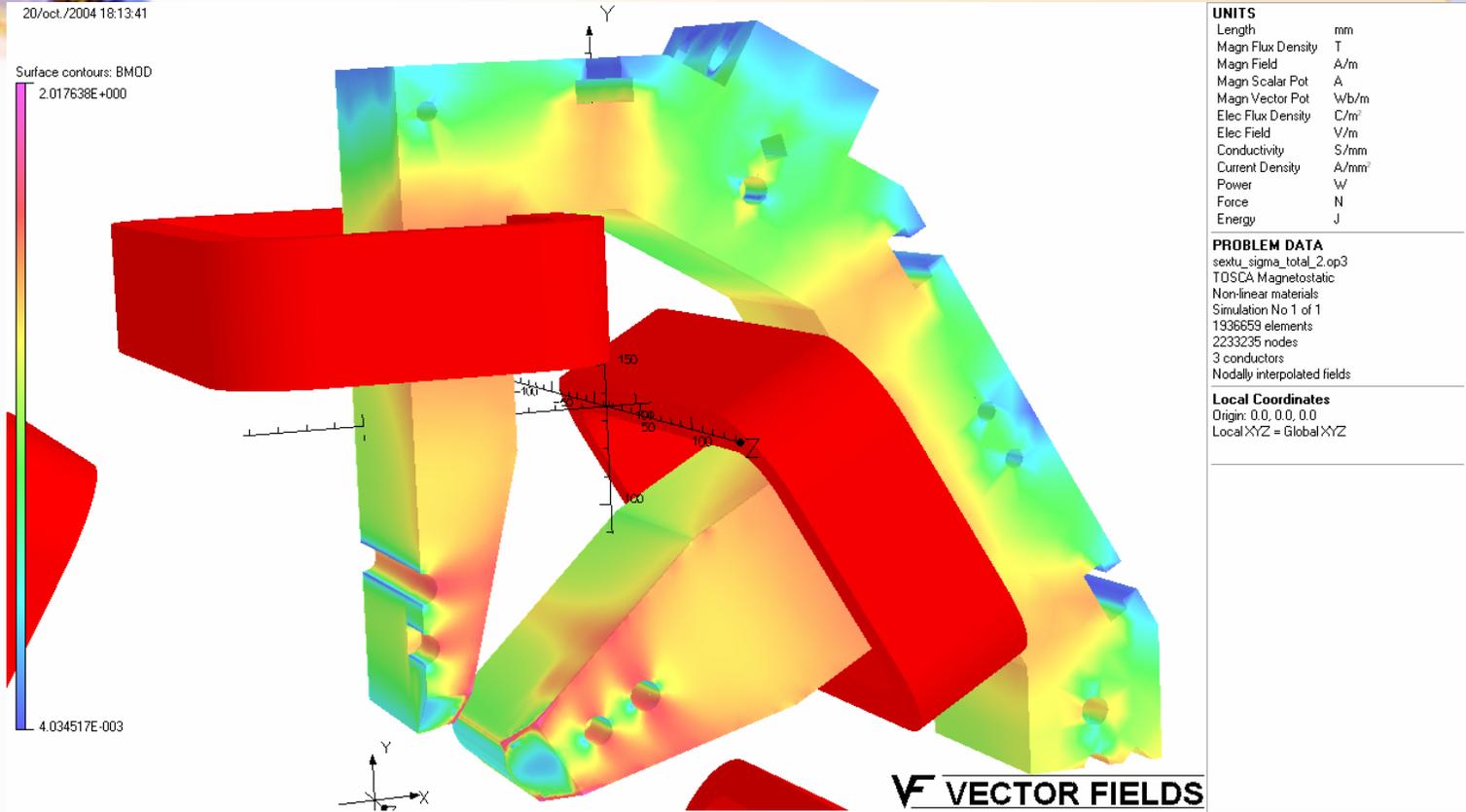


## Spécification physique machine

- 320 T/m<sup>2</sup>
- Longueur magnétique de 160 mm
- Soit un champ B<sub>2</sub> à 32 mm de :
  - $320 * 0,16 * 0,032 * 0,032 = 52,4$  mT.m
- Correcteurs
  - B<sub>x</sub> : 5,5 mT.m ( 0.6 mrad )
  - B<sub>z</sub> : 7,6 mT.m ( 0.8 mrad )
  - Q<sub>t</sub> : 2,0 mT.m à 32 mm ( G<sub>x</sub>=0,39 T/m)



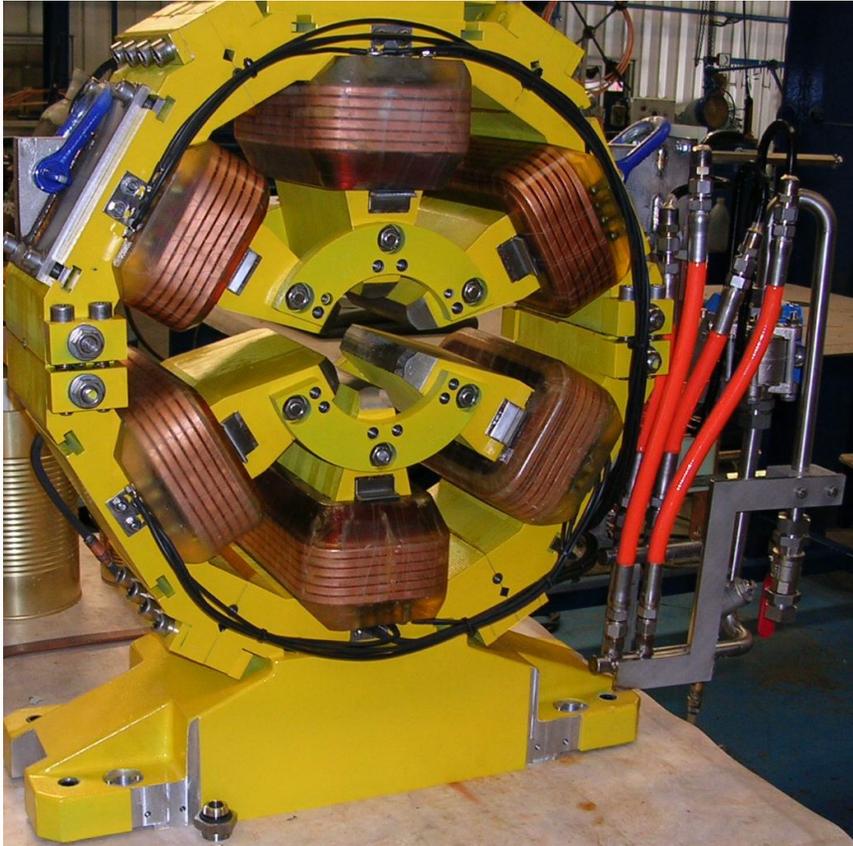
# Calcul 3D



**Le modèle 3D permet de représenter tous les détails de la construction**



## A few words about SR Sextupoles



- The production of the 124 SR Sextupoles has been industrially organised by keeping only two types :normal sextupoles and sextupoles with ears
- More than 60 yokes are at different stages of production
- All the coils(only 2 types) are finished

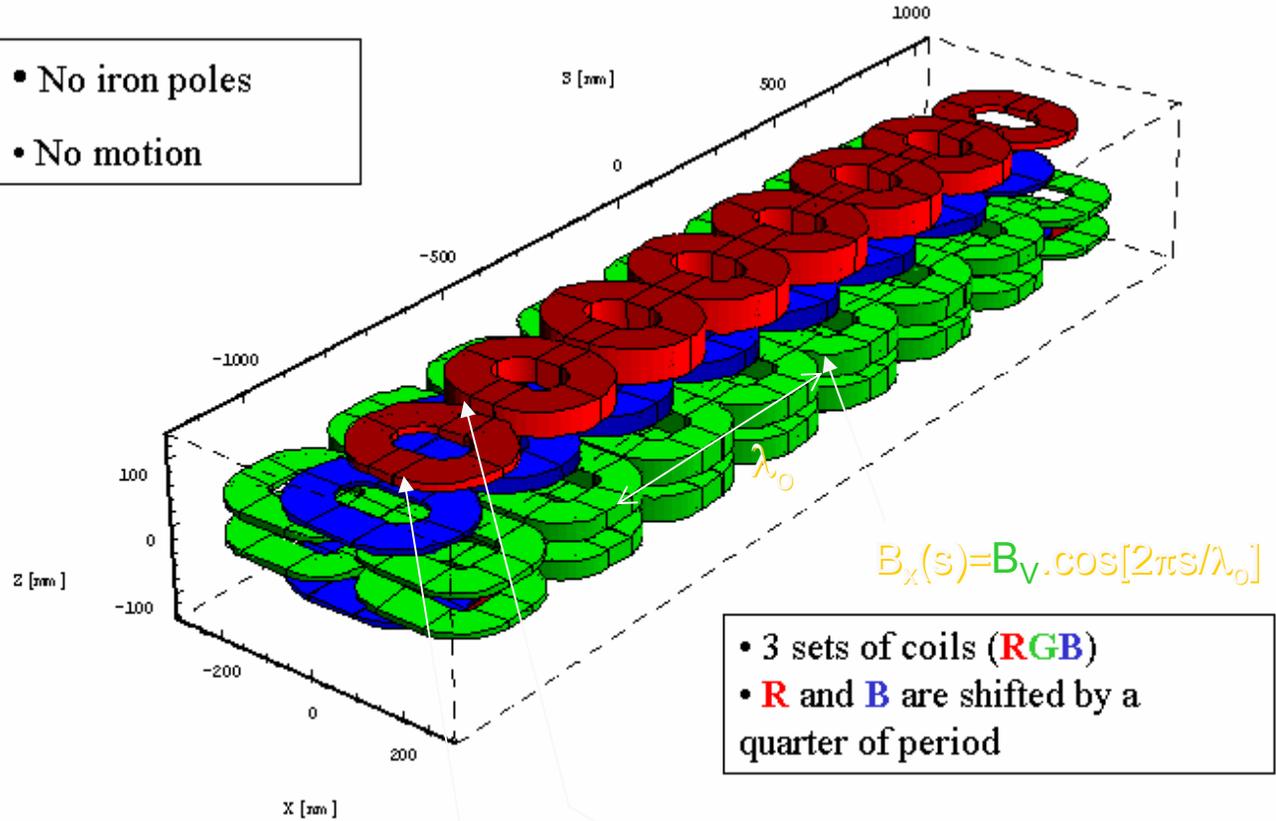
## Tableau des Caracteristiques des onduleurs SOLEIL phase 1

	HU640	HU256	HU80	U20
<b>Périod</b>	<b>640.mm</b>	<b>256.mm</b>	<b>80.mm</b>	<b>20.mm</b>
<b>Number of Périods</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>19</b>	<b>98</b>
<b>Length</b>	<b>10.m</b>	<b>3.6m</b>	<b>1.8m</b>	<b>2.m</b>
<b>Type</b>	<b>Électro- magnétique</b>	<b>Électro- magnétique</b>	<b>Apple-II</b>	<b>Hybride Sous Vide</b>
<b>gap</b>	<b>19.mm</b>	<b>15.mm(V) 50.mm(H)</b>	<b>15.mm à 300.mm</b>	<b>5.5mm à 30.mm</b>
<b>Polarisation</b>	<b>Circ./Lin. variable</b>	<b>Circ./Lin. H et V</b>	<b>Circ./Lin.</b>	<b>Linéaire H</b>
<b>Bxmax</b>	<b>0.09 T</b>	<b>0.275 T</b>	<b>0.76 T</b>	<b>-</b>
<b>Bzmax</b>	<b>0.11 T</b>	<b>0.400 T</b>	<b>0.85 T</b>	<b>1.03 T</b>
<b>photons energy</b>	<b>5 – 40 eV</b>	<b>10 – 1000 eV</b>	<b>80 – 1500 eV</b>	<b>3 – 18 keV</b>



# HU640 principe de création du champ

- No iron poles
- No motion



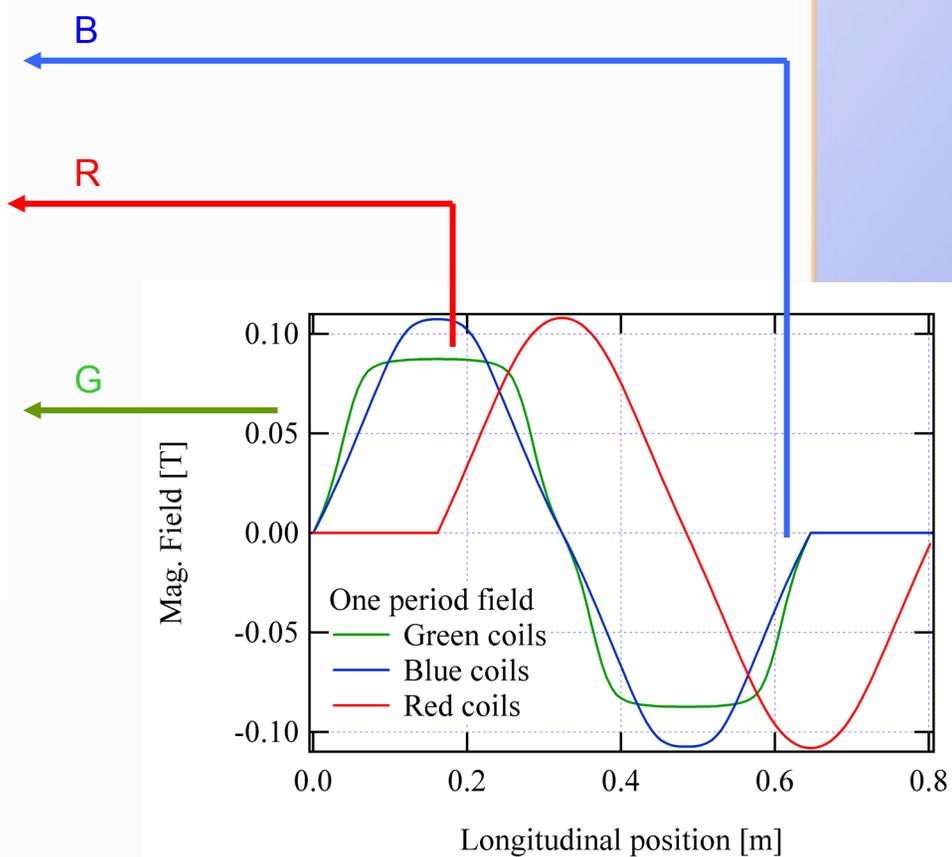
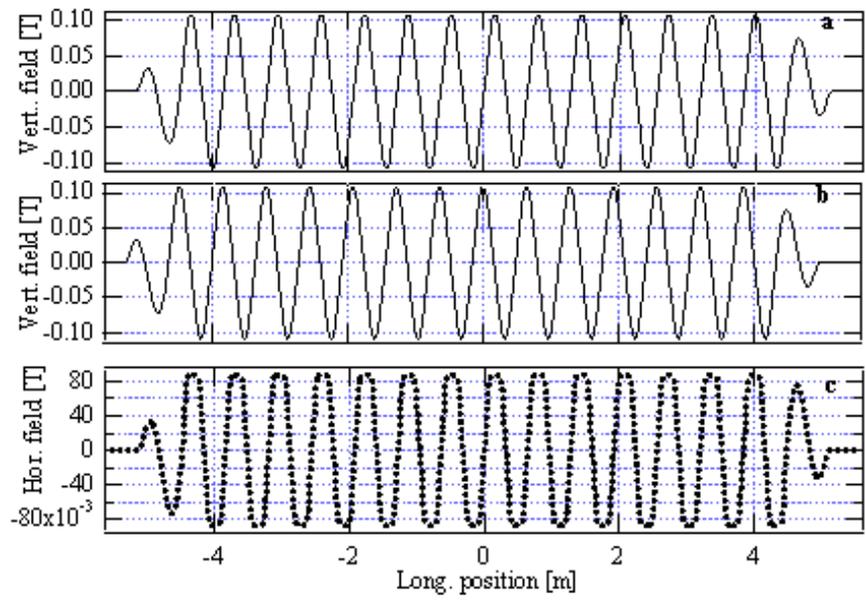
- 3 sets of coils (RGB)
- R and B are shifted by a quarter of period

Radia code: <http://www.znrf.fr>  $B_z(s) = B_B \cdot \cos[2\pi s / \lambda_0] + B_R \cdot \sin[2\pi s / \lambda_0] = B_{z0} \cdot \cos[2\pi s / \lambda_0 + \phi]$



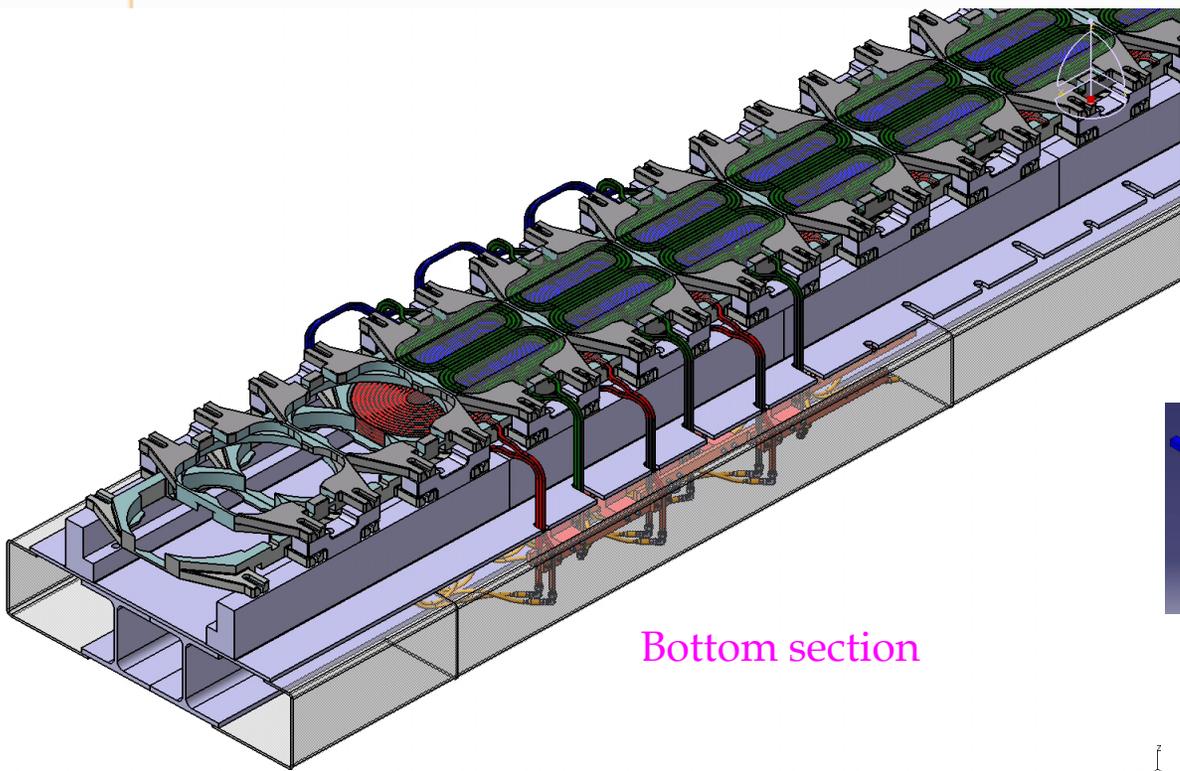
# Magnetic field

$$I_G = 590 \text{ A} \quad I_B = 430 \text{ A} \quad I_R = 350 \text{ A}$$

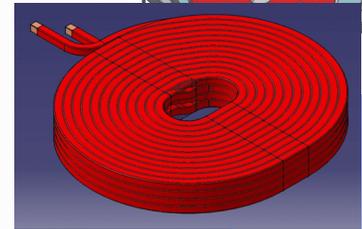
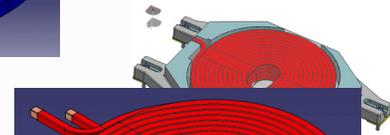
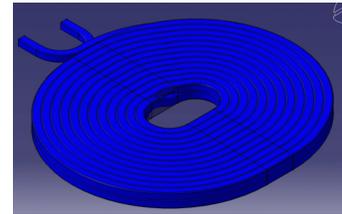
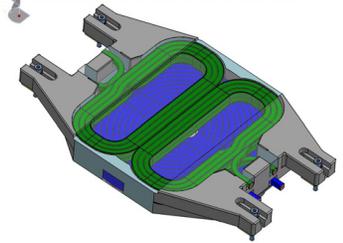
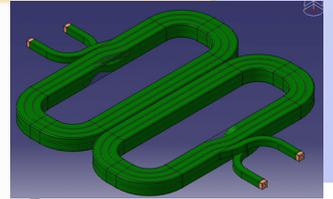




# HU640 Design: Coils



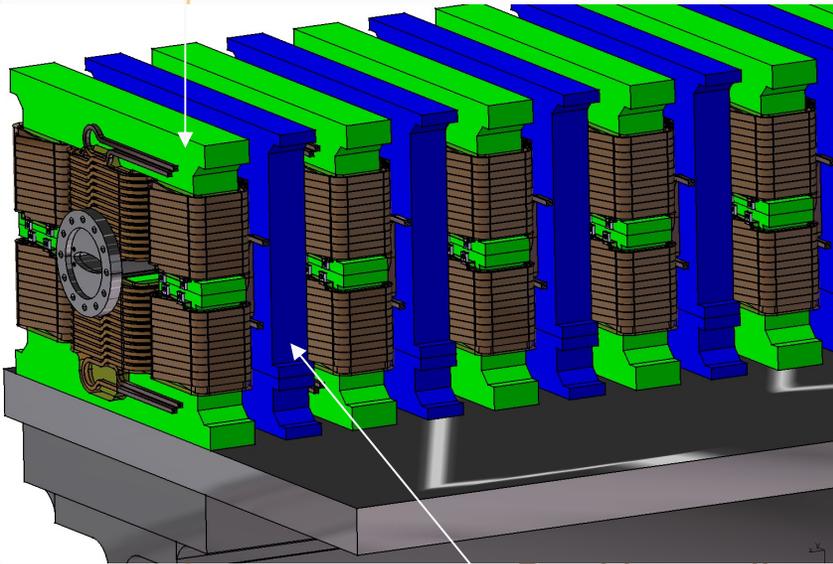
Bottom section





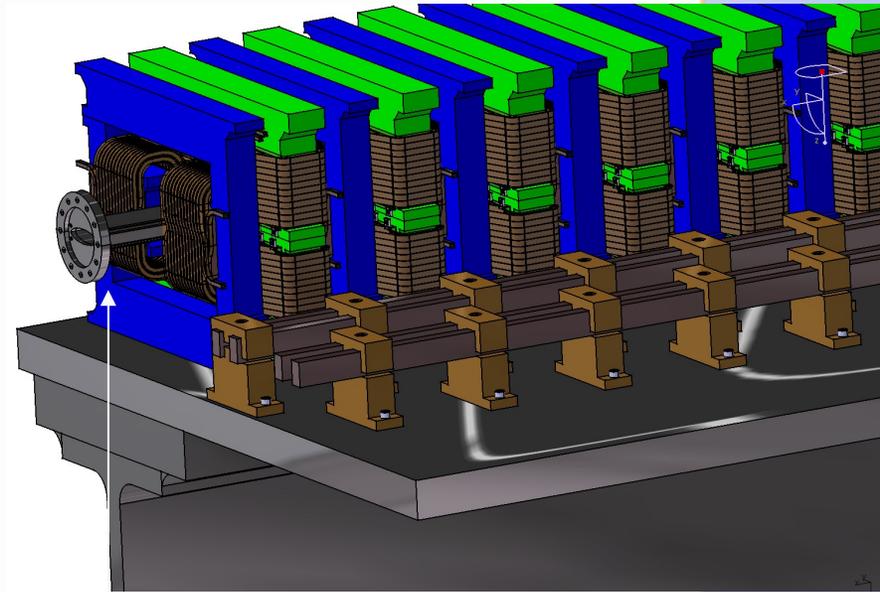
## Magnetic design

Production of  
Vert. field



Backleg coils

Extruded Vacuum  
Chamber



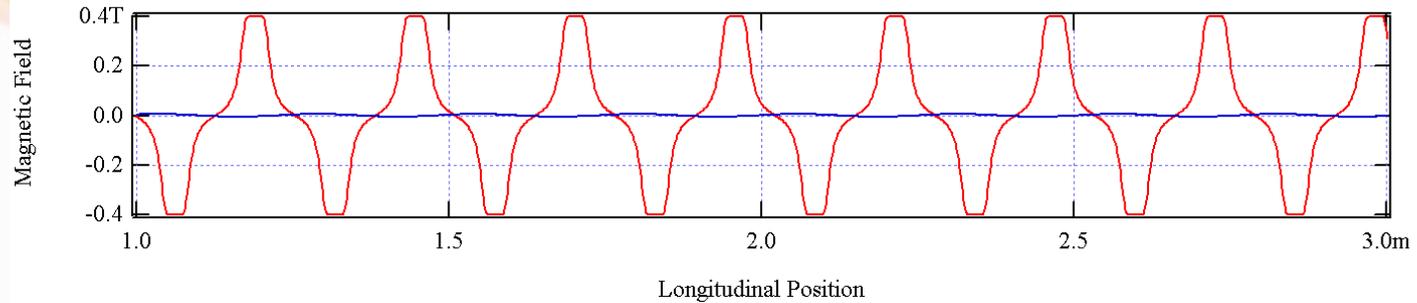
Production of  
Vert. field

Courtesy of J-L. Marlets  
et al. SOLEIL

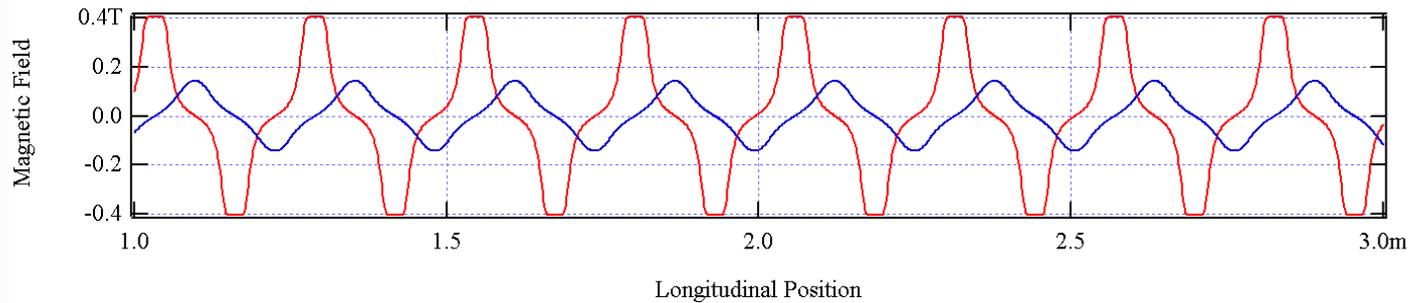
# Annexe 2

## HU256 Preliminary Simulations : O. Chubar Magnetic Field in the Central Part (RADIA)

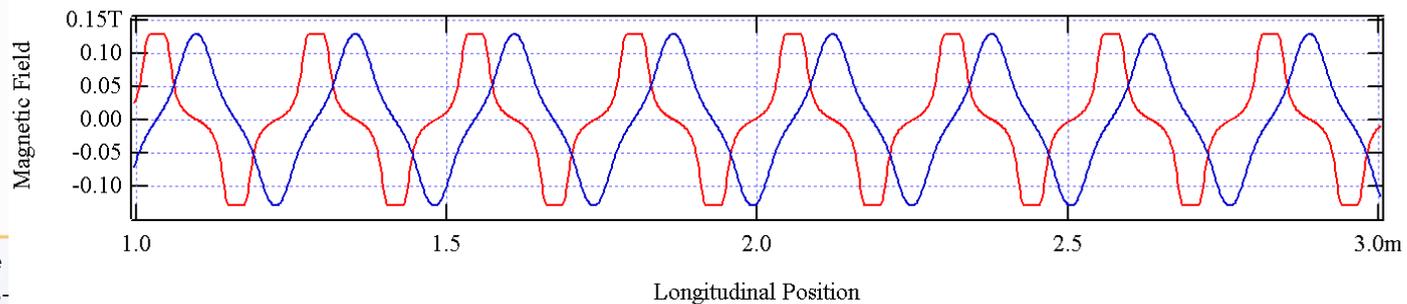
High-Excitation Planar Mode ( $I_z = 2.65$  kA)



High-Excitation Elliptical Mode ( $I_x = 3.0$  kA,  $I_z = 2.65$  kA)



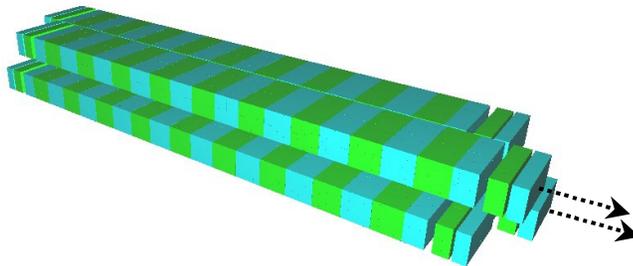
Helical Mode ( $I_x = 2.72$  kA,  $I_z = 0.845$  kA)



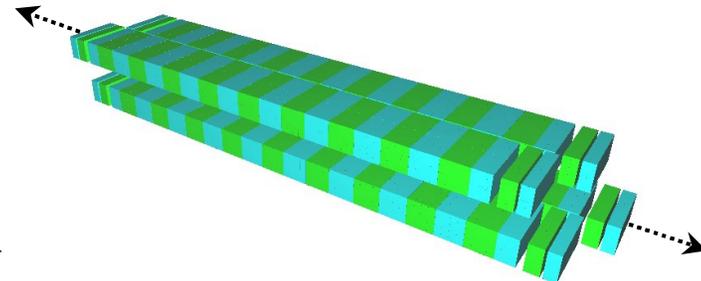
# APPLE-II Configurations to Produce Circular and Tilted Linear Polarizations

(parameters of HU80, calculations by RADIA)

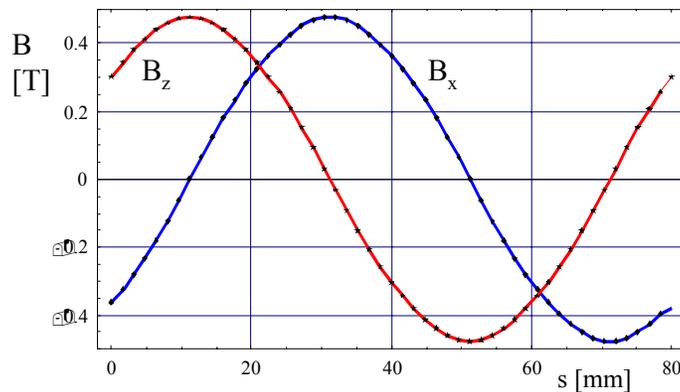
Circular/Elliptical Polarization  
(parallel displacement of 2 magnet arrays)



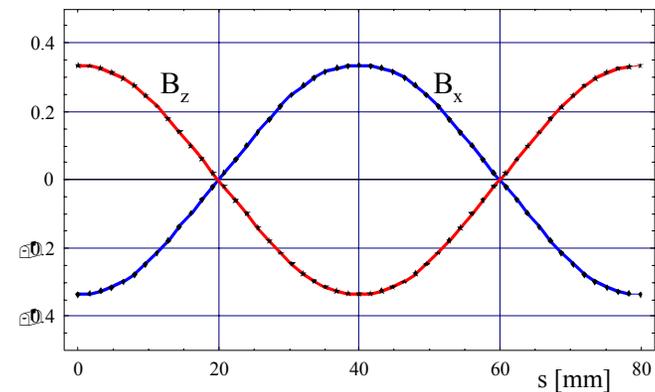
Tilted Linear Polarization  
(anti-parallel displacement of 2 magnet arrays)



Gap: 17 mm

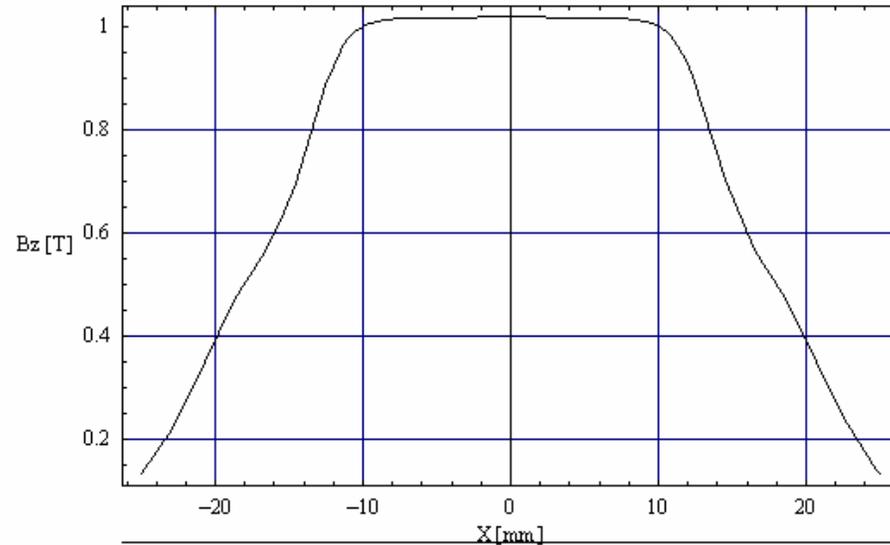
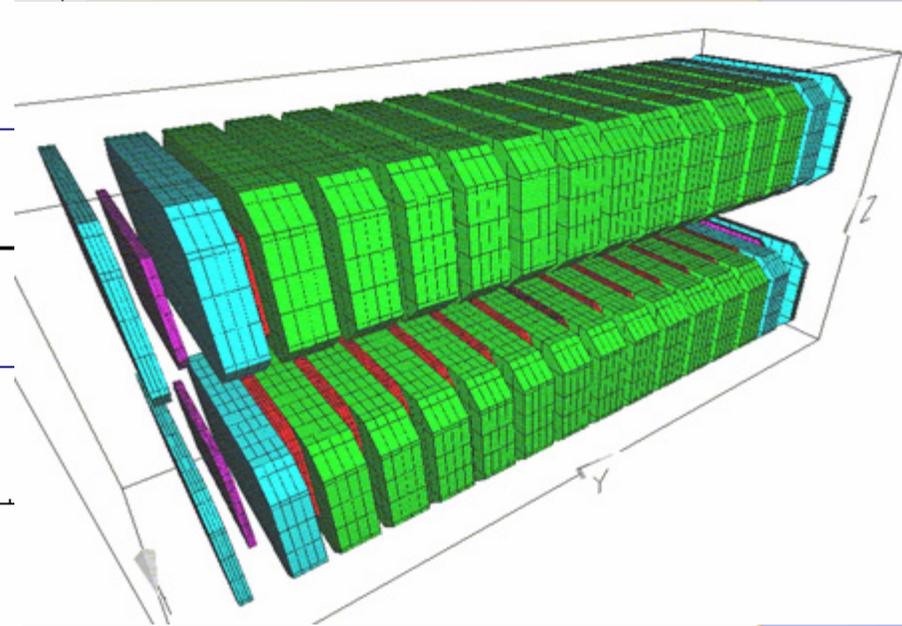
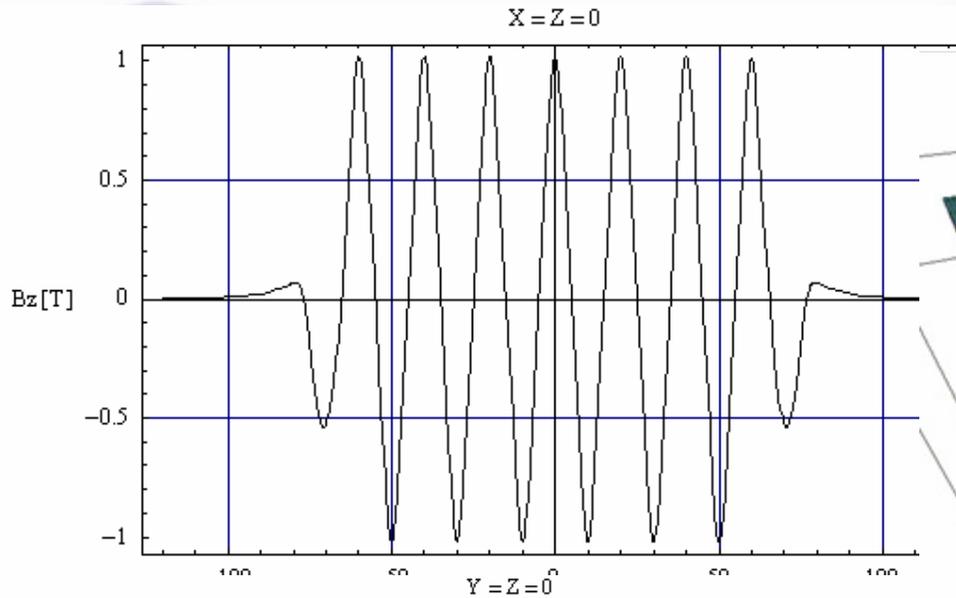


$$B_{x \max} \approx B_{z \max} \approx 0.48 \text{ T}$$



$$B_{x \max} \approx B_{z \max} \approx 0.34 \text{ T}$$

# U20 Hybrid undulator sous vide



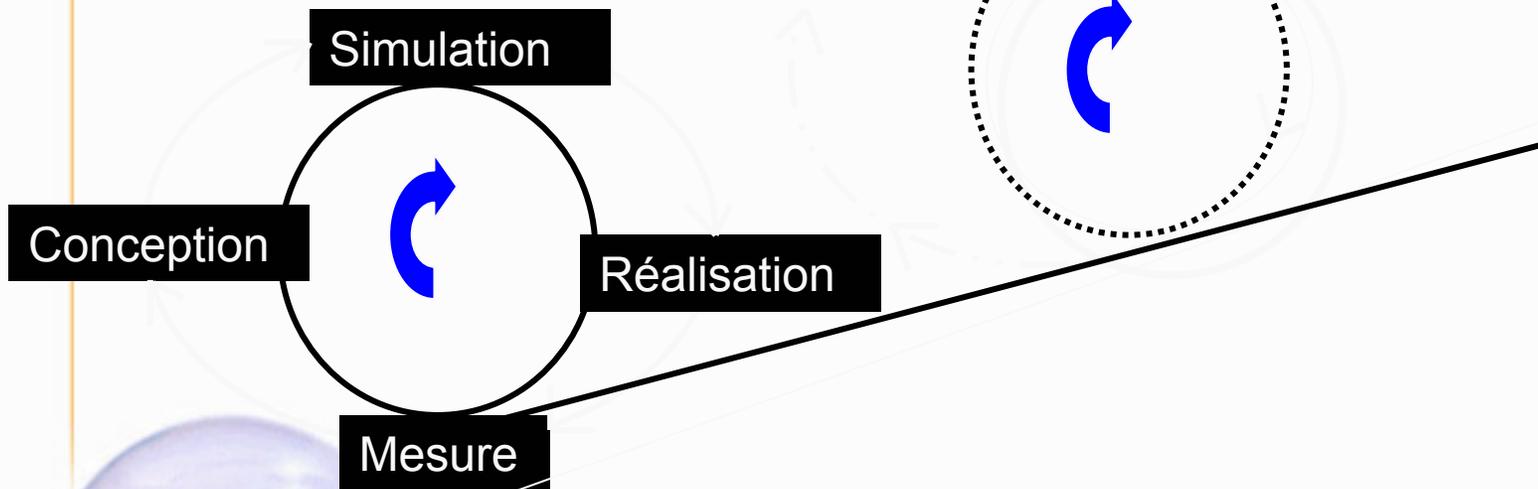
$B_0 = 1.02$  T  
Gap = 5.5, per = 20  
SmCo17 (50,7.5,30)  
VP (33,2.5,22)  
 $N_{per} = 98$



## Synthèse

- Les aimants classiques sont limités à environ 1.8 Tesla pour les dipôles et à environ 25 T/m pour les quadrupoles
- Ces valeurs restent adaptés à de très nombreux accélérateurs
- La précision des aimants classiques continue de s'améliorer en découpe , usinage , qualité des aciers
- La technologie des aimants classiques est marquée par une très grande diversité des configurations magnétiques
- Grâce aux logiciels 3D on maîtrise de mieux en mieux les performances d' homogénéité

# CONCLUSION



L'amélioration des performances est continue et repose sur l'expérience



## Un petit conseil.....

- Pour faire de bonnes analyses de champ magnétique....
- Il faut raisonner sur les tubes de flux
- et.....ne pas oublier que les tubes de flux doivent se refermer sur eux mêmes



## Les Méthodes de Mesures Magnétiques

- La RMN : *Mesure Absolue*
- La sonde de Hall : uniaxiale ou triaxiale
- Méthodes à bobine tournante : mesure des harmoniques de champ
- Autres méthodes avec fluxmètre : pickup coil , bobine intégrale , stretched wire...
- La méthode doit s'adapter à l'utilisateur

## Les Outils: logiciels d'usage courant



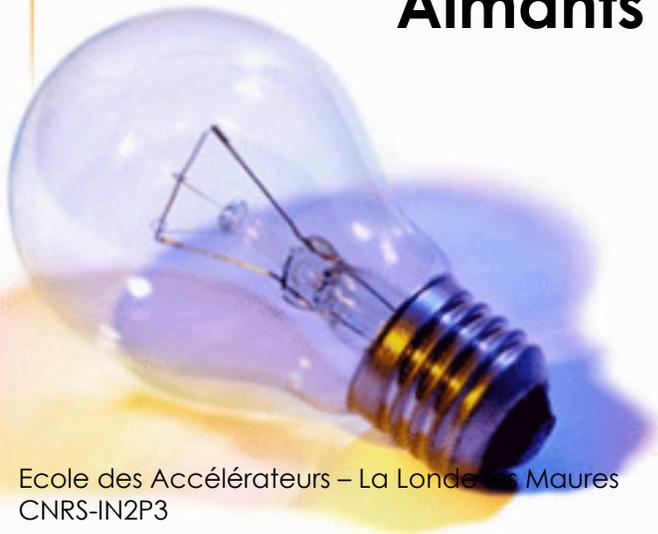
- **Poisson 2D**
- **TOSCA 3D**: Static Electromagnetic field Computation Vector Fields Ltd
- **RADIA**:  
P.Elleaume, O.Chubar and J.Chavanne, “Computing 3D Magnetic Fields from Insertion Devices”, Proc. of 1997 IEEE Particle Accelerator Conference PAC-97, 9P027, pp.3509-3511.
- **SRW**  
O.Chubar, P.Elleaume, S.Kuznetsov, A.Snigirev, “Physical Optics Computer Code Optimized for Synchrotron Radiation”, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 4769, 145 (2002).
- **ANSYS**: logiciel très répandu en mécanique et utilisé dans notre cas pour la thermique et les courants de Foucault.

# Cours de Magnétisme

Conception, Simulation, Réalisation et  
Mesures

un beau chemin pour les éléments  
magnétiques

**Aimants Supraconducteurs**



Antoine DAËL  
CEA/DSM/DAPNIA/SACM  
antoine.dael@cea.fr



## Objectif du cours de magnétisme

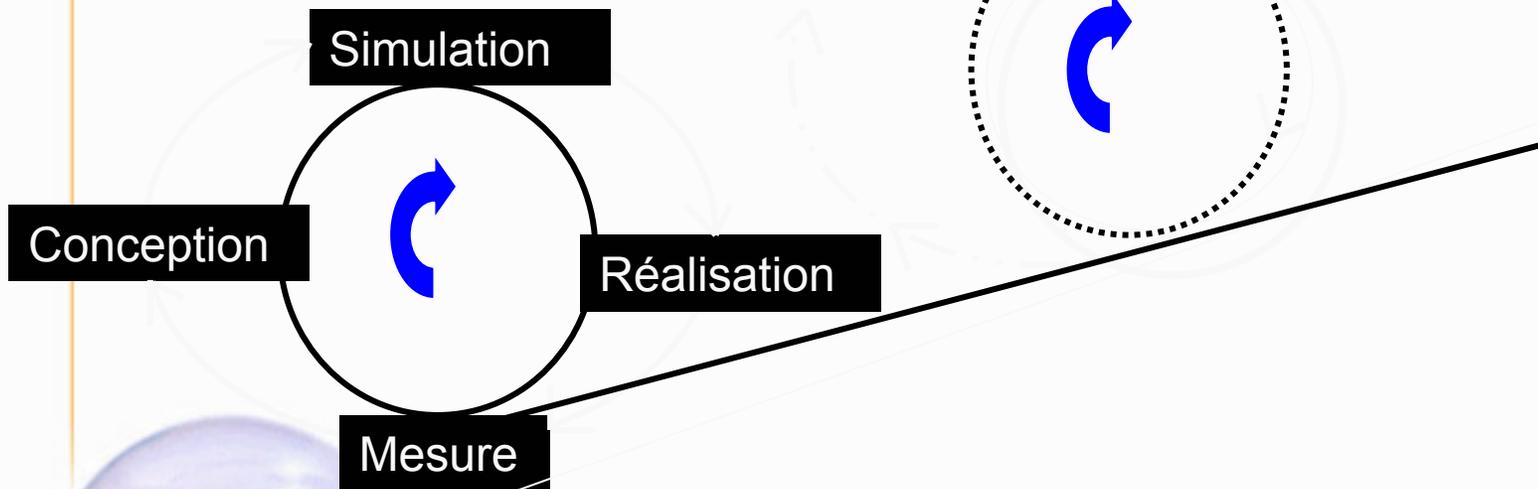
- Nous rencontrons sur les accélérateurs de particules et sur les expériences de physique de très nombreux aimants « classiques » **ou aimants supraconducteurs.**
- **L'objectif du cours est de faire comprendre: les principes de conception, les techniques de dimensionnement et la technologie de construction de ces aimants.**
- **Les éléments de ce cours sont complémentaires des cours de J.L.BIARROTTE et J.M.DECONTO**



## Plan du cours sur le magnétisme

1. Généralités sur le magnétisme
2. Le Solénoïde
3. Les aimants d' accélérateurs « classiques »
- 4. Généralités sur la supraconductivité**
- 5. Les aimants supraconducteurs dans le projet LHC**
- 6. Les nouveaux projets**

# CONCLUSION



L'amélioration des performances est continue et repose sur l'expérience



## BIBLIOGRAPHIE

- CERN ACCELERATOR SCHOOL : mesures magnétiques , physique générale des accélérateurs, lumière synchrotron , supraconductivité , CAS
- La Bible : « Magnétostatique » de E.Durand.
- Martin N. Wilson : Superconducting Magnets
- Pascal Tixador: »Les supraconducteurs »



## Sommaire

- Brève histoire de la supraconductivité
- Quelques principes de conception
- La fabrication du supraconducteur
- 3 exemples d' aimants pour LHC
- Les nouveaux projets
- Conclusion



## Brève histoire de la supraconductivité

- **1908** : Kamerlingh Onnes réalise la liquéfaction de l'helium qui , à la pression atmosphérique, bout à 4.2K
- **1911** :Le savant Hollandais observe la disparition brutale de la resistivité du mercure au dessous de 4.2K. C' est la découverte de la supraconductivité.
- Certains métaux purs tels Pb, Sn , Al sont supraconducteurs mais les meilleurs conducteurs électriques tels Cu , Ag , Au ne possèdent pas la supraconductivité



## Kammerlingh Onnes 1911

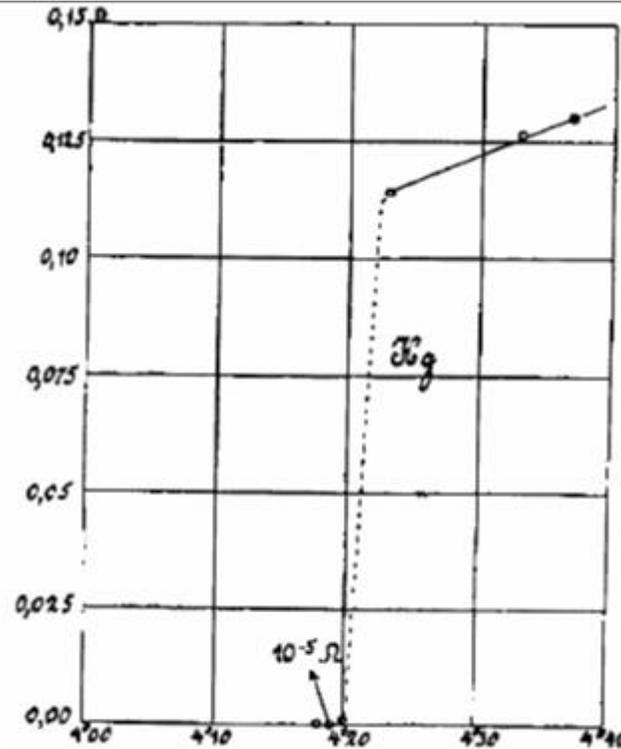


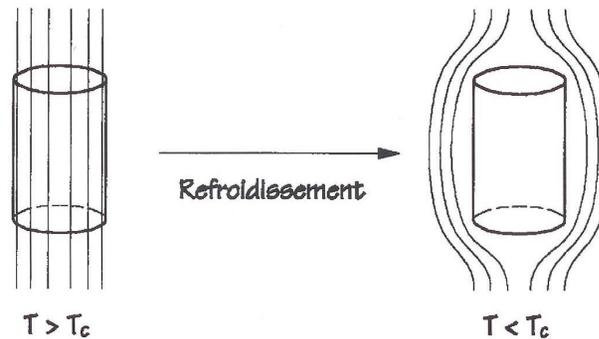
Figure 1

Mise en évidence expérimentale de la subite chute de résistivité du mercure en dessous de 4.2K [Kammerlingh Onnes, Akad. van Wetenschappen (Amsterdam), vol.14, p. 818 (1911).]



## 1933:mise en évidence du diamagnétisme parfait des supraconducteurs (Meisner et Ochsenfeld)

### Effet Meisner



Ce phénomène ne se produirait pas dans un conducteur parfait:  $R=0$ .

FIG. 2 – Effet Meissner : les lignes de champ créées à l'intérieur d'un corps par un champ magnétique extérieur sont expulsées lorsque le corps est refroidi en dessous de sa température de transition.



## Le diamagnétisme parfait (effet Meisner , 1933)

Un supraconducteur refroidi à une température inférieure à sa température critique et placé dans un champ magnétique expulse totalement son flux Magnétique

- L'effet se manifeste lorsque le champ magnétique est appliqué après le refroidissement
- **Mais** il en va de même lorsque l' application du champ **précède** le refroidissement
- Ce diamagnétisme parfait ne peut donc pas s'expliquer par la simple hypothèse d' une résistivité nulle

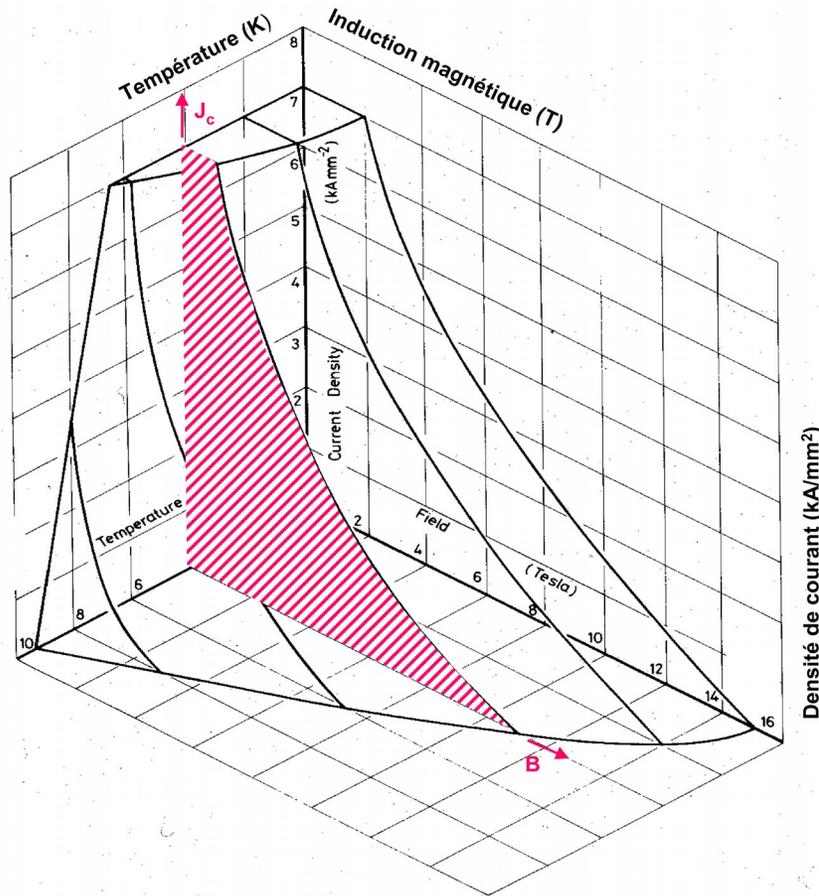


## Brève histoire de la supraconductivité

- **1913** : Découverte d' un champ critique
- **1920** : Découverte d' une densité de courant critique et de l'existence de 2 types de supraconducteurs. Le type 1 ne peut supporter que des densités de courant et des champs magnétiques faibles. Dans le type 2 , le flux pénètre de façon discontinue mais il autorise des valeurs de champ et de courant plus élevées.
- **1957** : Théorie BCS de Bardeen, Cooper et Schrieffer. La supraconductivité est due au transport de charge par des paires d' électrons.



## Surface Critique



**Diagramme de phase du Niobium-titane. La partie hachurée donne la courbe  $J_c(B)$  à 4K, c'est-à-dire la densité de courant maximale dans la supraconducteur refroidi à la température de l'hélium liquide et soumis à une induction magnétique  $B$**



## Caractéristique de courant critique NbTi & Nb<sub>3</sub>Sn

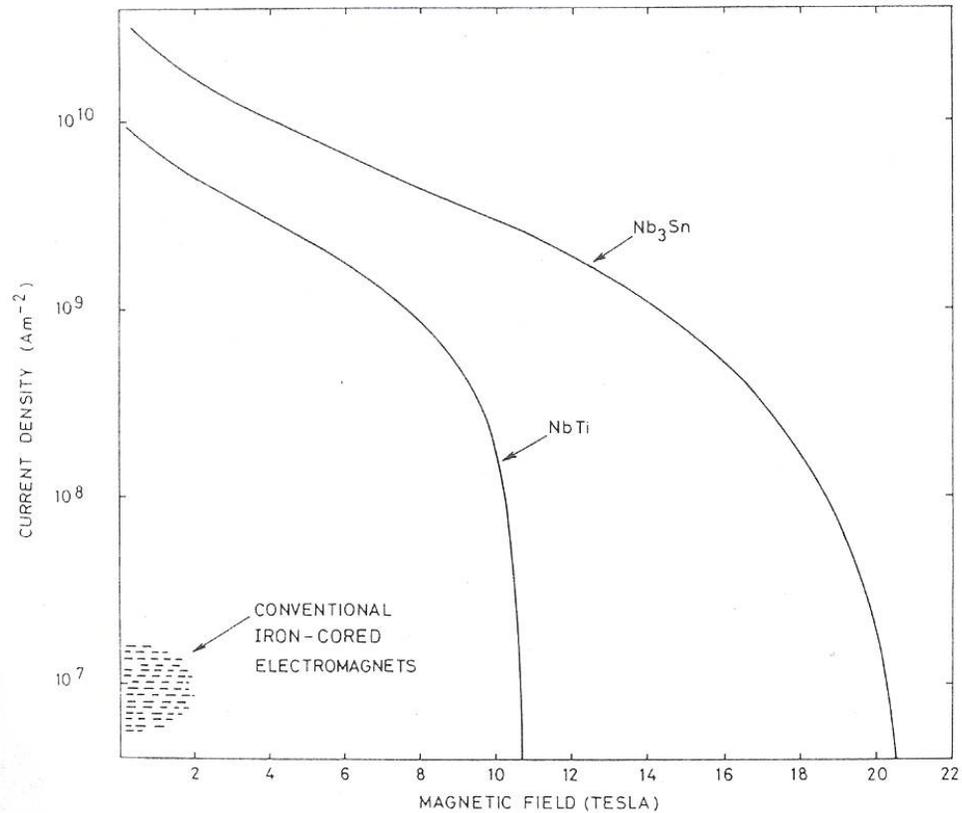


Fig. 1.2 Critical curves for the two common technological superconductors, niobium titanium and niobium tin, at a constant temperature of 4.2 K. Superconductivity prevails below the curves and normal resistivity above. Shaded area at bottom left illustrates the usual operating range for conventional electromagnets.



## Brève histoire de la supraconductivité

- Début des années **1960** : apparition du composé intermétallique d'étain et niobium  $Nb_3Sn$  puis de l'alliage niobium-titane  $NbTi$ . Ces matériaux sont assez performants magnétiquement et surtout **mécaniquement** pour réaliser des électroaimants.
- Il faut gérer les phénomènes qui apparaissent lors du brusque retour à l'état normal, le « **Quench** »
- On découvre qu'il faut ajouter du cuivre au supraconducteur pour assurer sa « **stabilisation** ».
- **1986** : découverte des supraconducteurs à haute température critique :...125K pour  $Ti-Sr-Ca-Cu-O$

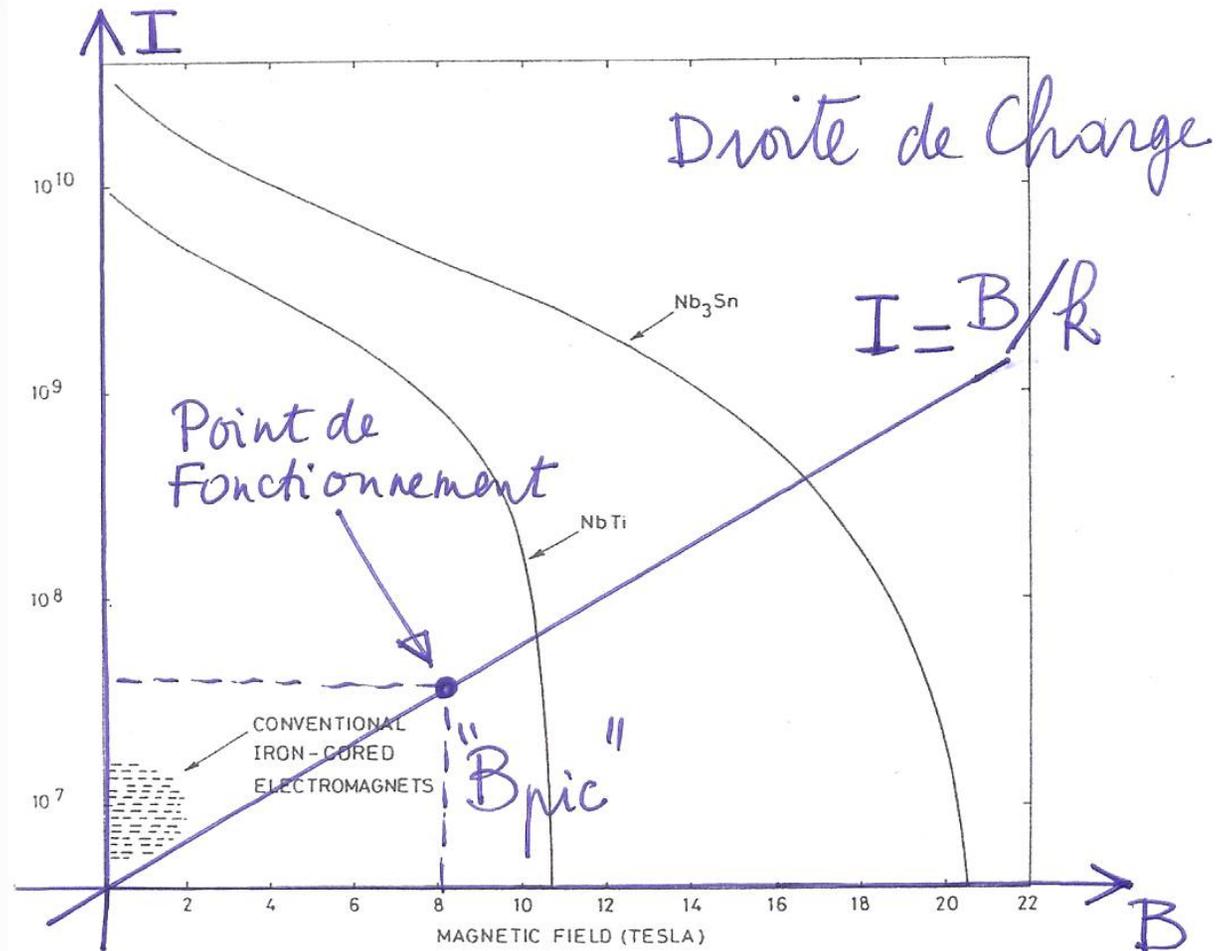


## Quelques principes de conception

- La conception des aimants supraconducteurs doit prendre en compte
- La droite de charge : un aimant ne peut pas fonctionner à la limite de la surface de courant critique
- La stabilisation du conducteur pour éviter propagation d'un éventuel Quench
- La reprise des efforts magnétiques qui augmentent comme le carré du champ magnétique  $B$  et ne doivent provoquer aucun mouvement
- La protection de l'aimant en cas de décharge rapide soit par évacuation de l'énergie stockée soit par une dissipation interne bien répartie
- Les contraintes de cryogénie non traitées dans cet exposé



## Droite de Charge d'un aimant supraconducteur





## Notion de droite de charge

La droite de charge «  $B=k*I$  » représente l'augmentation du champ avec le courant

- Pour rester dans l'état supraconducteur, il faut considérer le champ pic (peak field)
- En effet le passage à l'état normal d'un **seul point** du bobinage peut provoquer le « Quench »
- Dans les « current dominated magnets » le champ pic est toujours situé dans le bobinage
- On place généralement le courant nominal entre 60% et 80% du courant critique selon la taille de l'aimant.



## Notion de stabilisation par le cuivre

Le cuivre a une résistivité très faible à basse température : Cu  $3 \cdot 10^{-10}$  Ohm.m contre  $7 \cdot 10^{-7}$  Ohm.m pour le NbTi

- Le cuivre a une conductivité thermique très bonne à basse température : Cu 350.W/mK contre 0.1 W/mK pour le NbTi
- Si un point transite (re passe à l' état normal) mais que toute la chaleur produite est évacuée par conduction dans le reste de la bobine , la température ne s' élève pas et le Quench ne se propage pas.
- Le Cuivre diminue la chaleur produite et favorise la diffusion longitudinale.
- Une perturbation de longueur inférieure à la « minimum propagation length » collapse et répond donc au critère de stabilité

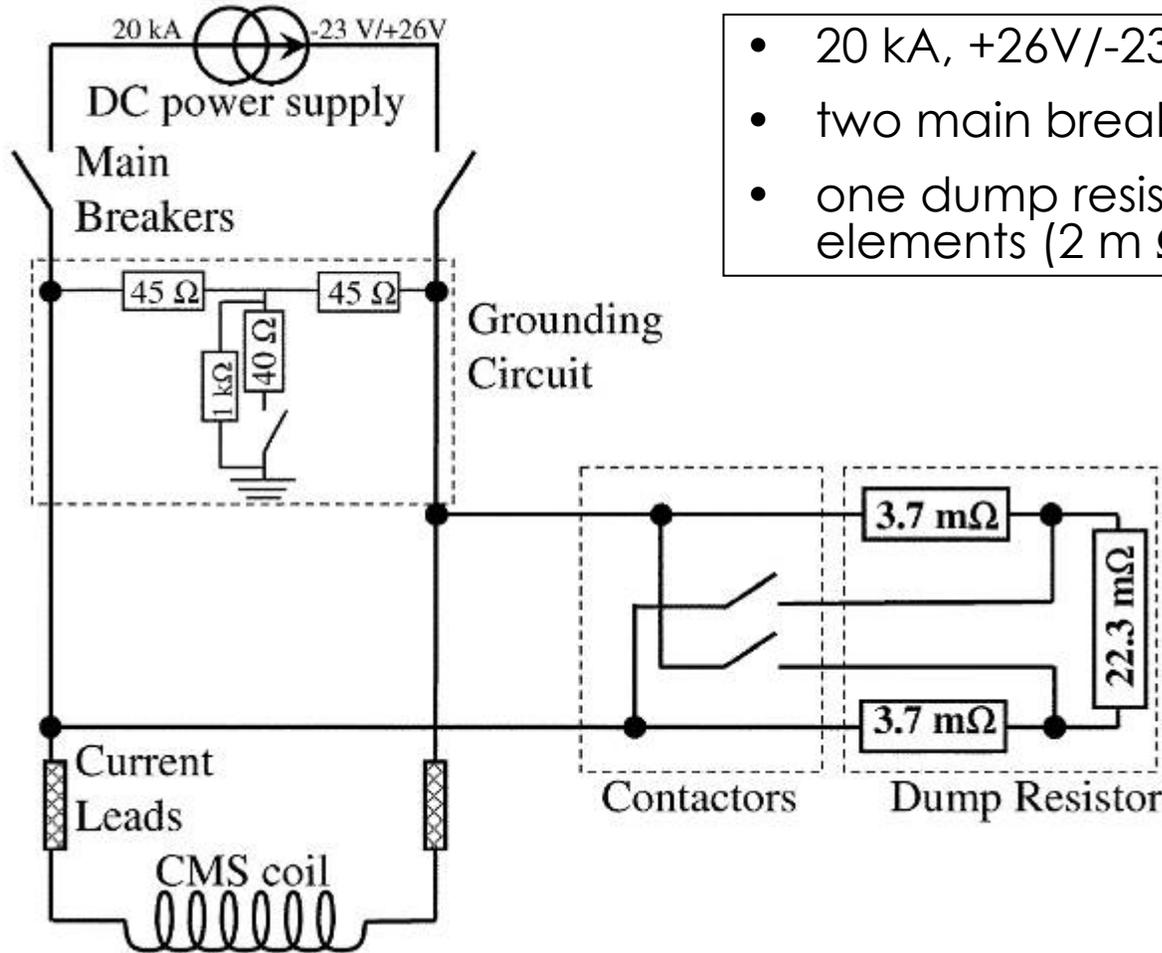


## La protection des aimants supraconducteurs

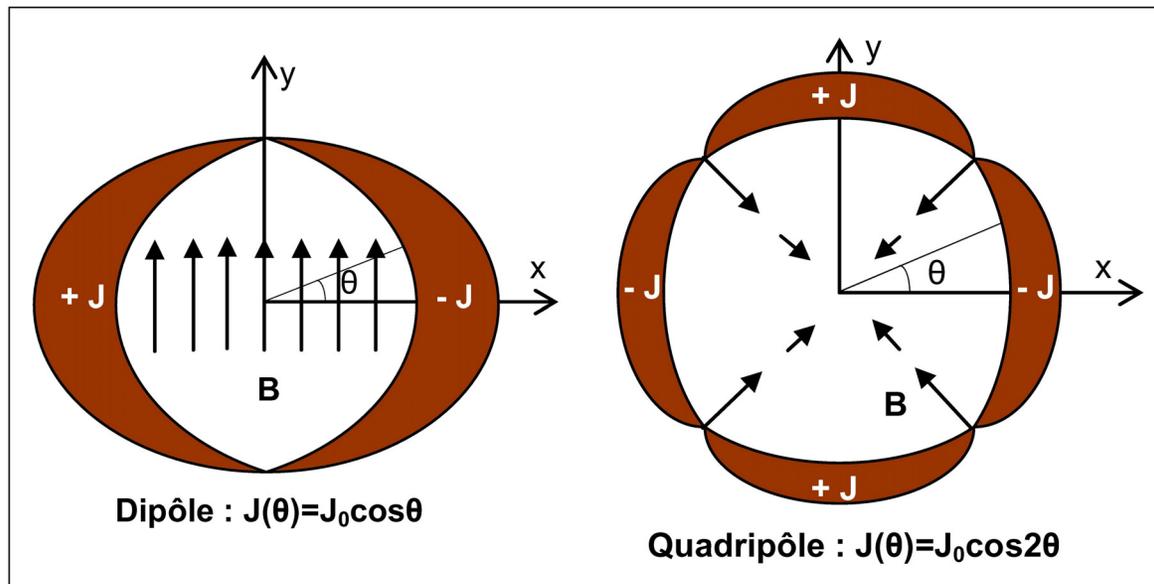
- L'énergie magnétique est stockée dans l'espace via la bobine :  $\frac{1}{2} * L * I^2 = \text{intégrale volumique de } \frac{B^2}{2 * \mu_0}$
- Si une perturbation apparaît et que le Quench se produit il faut prendre des précautions pour que toute l'énergie stockée ne se dissipe pas dans la zone où le Quench a pris naissance
- Un échauffement considérable pourrait se produire et détruire la bobine
- On calcule la température maximum par la formule de l'échauffement adiabatique
- Le premier remède est d'accélérer la décroissance de courant par détection de la tension de quench, coupure de l'alimentation, basculement sur le circuit de décharge ou transition forcée de tout l'aimant par action de chaufferettes
- Le deuxième remède est de répartir la dissipation d'énergie dans tout l'aimant pour limiter l'échauffement.



## Schéma électrique de protection de CMS



- 20 kA, +26V/-23V power converter
- two main breakers
- one dump resistance in three elements (2 mΩ or 30 mΩ)





## Géométrie des bobinages des aimants d'accélérateurs

On applique la théorie du champ complexe

- $Z=X+i*Y$  et  $B=BY+i*BX$
- $B=B(Z)$  est une fonction analytique qui admet, autour de  $Z=0$ , un D.L. dont les coefficients sont les harmoniques de champ
- On représente la densité de courant en 2D par une fonction  $J=J(\theta)$  que l'on développe en série de Fourier
- Ce formalisme s'applique aux intégrales de champ et les têtes de bobines sont calculées en 3D pour annuler les harmoniques



## Les aimants supraconducteurs et l'homogénéité

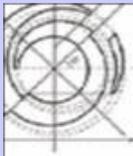
- En général ce sont des « current dominated magnets »
- La culasse rajoute une partie du champ par miroir magnétique et joue le rôle de blindage
- L'homogénéité du champ est gouvernée par la précision de positionnement des conducteurs
- Sous l'effet des forces de Lorentz les câbles tendent à se resserrer sur eux mêmes comme des petits ressorts que l'on comprimerait.
- Pour éviter tout mouvement des conducteurs qui provoquerait un quench on précontraint l'empilage de câbles à l'aide des colliers en acier inoxydable
- La géométrie du bobinage doit être garantie après refroidissement et sous efforts magnétiques à environ 10 microns près



## Fabrication des supraconducteurs

La présence de Cuivre est nécessaire pour la stabilisation

- Le twist des filaments et la transposition des brins sont indispensables
- Le câble « Rutherford » est la forme la plus répandue dans les applications de Physique
- Nous empruntons la présentation à ALSTOM Belfort



## Fil Supraconducteur Moyens de production

**ALSTOM**

Plus de 7500 m<sup>2</sup> d'atelier pour la fabrication des brins et câbles supraconducteurs, faisant de MSA le plus grand site Français dans ce domaine.

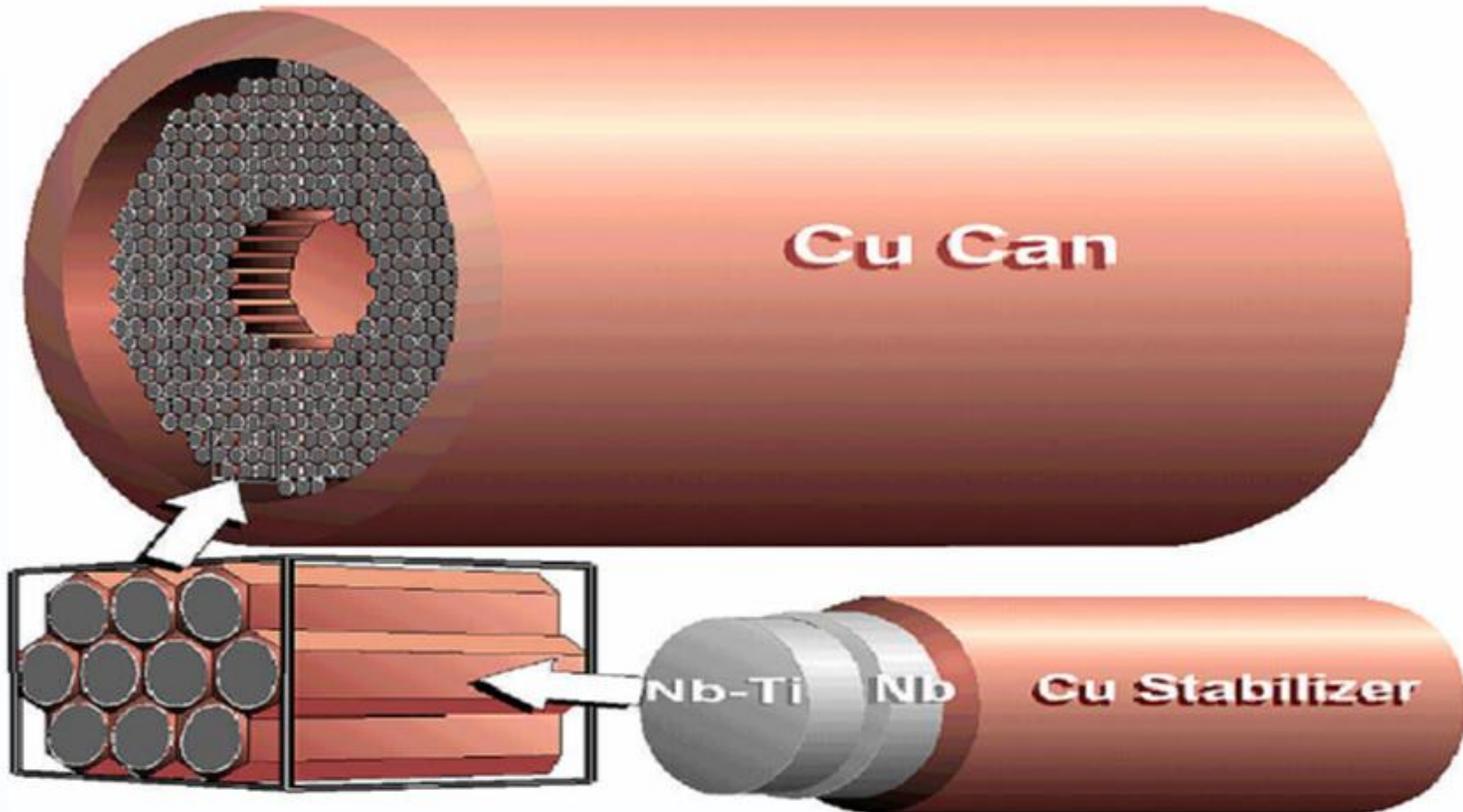
Tous les moyens pour réaliser dans les règles de l'art du moment: Banc droit d'étirage, bull blocks, machine à souder par faisceau d'électrons et toutes les ressources nécessaires pour fabriquer dans le niveau de Qualité demandé





# Overall wire manufacturing process

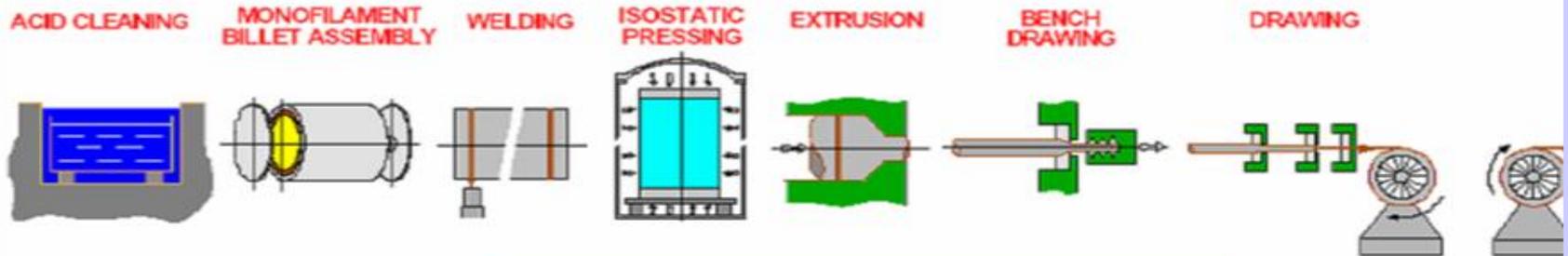
**ALSTOM**



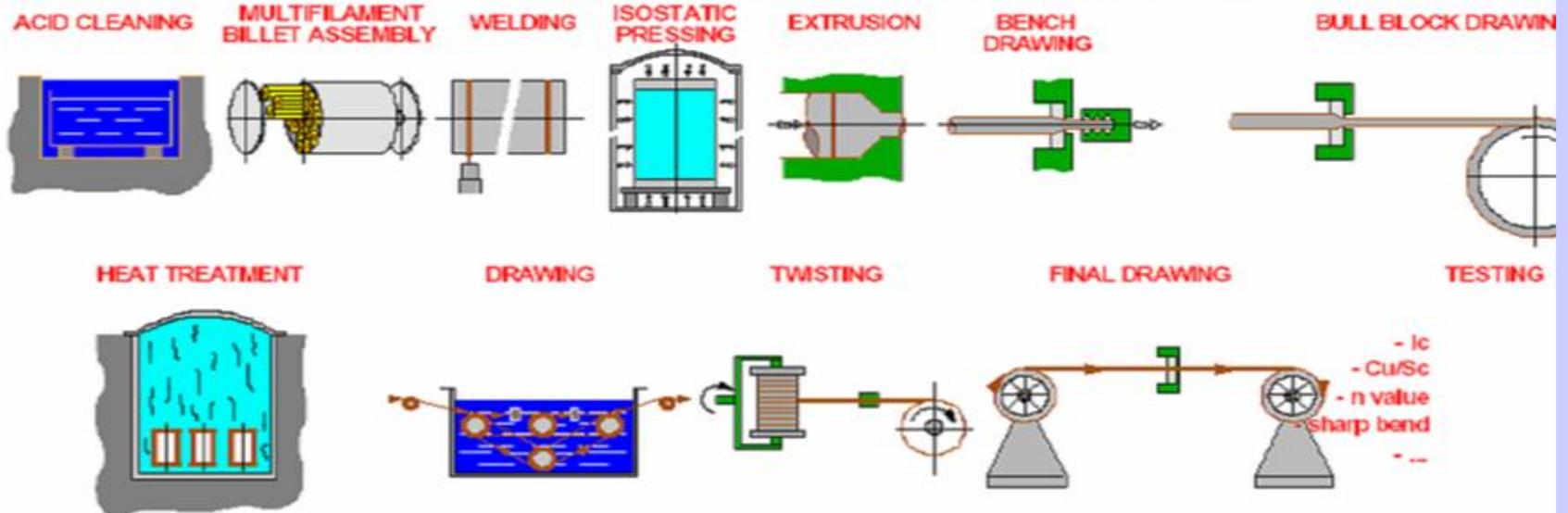
Version 2000

# SINGLE STACKING SUPERCONDUCTING WIRE PROCESS MANUFACTURING

## MONOFILAMENT BILLET PROCESS



## MULTIFILAMENT BILLET PROCESS





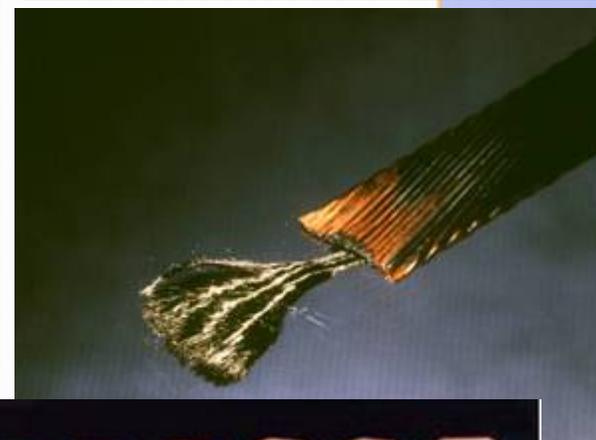
## SC cable production





## The LHC superconductor 7000 km of Cu/Nb-Ti cable

<b>STRAND</b>	<b>Type 01</b>	<b>Type 02</b>
Diameter (mm)	1.065	0.825
Cu/NbTi ratio	1.6-1.7 ± 0.03	1.9-2.0 ± 0.03
Filament diameter (μm)	7	6
Number of filaments	8800	6425
Jc (A/mm <sup>2</sup> ) @1.9 K	1530 @ 10 T	2100 @ 7 T
μ <sub>0</sub> M (mT) @1.9 K, 0.5 T	30 ±4.5	23 ±4.5
<b>CABLE</b>	<b>Type 01</b>	<b>Type 02</b>
Number of strands	28	36
Width (mm)	15.1	15.1
Mid-thickness (mm)	1.900 ±0.006	1.480 ±0.006
Keystone angle (degrees)	1.25 ±0.05	0.90 ±0.05
Cable Ic (A) @ 1.9 K	13750 @ 10T	12960 @ 7T
Interstrand resistance (μΩ)	10-50	20-80





## Présentation des aimants LHC

- A. Les Quadrupôles de l'Accélérateur LHC
- B. Le solénoïde de l'expérience CMS
- C. Le Toroïde de l'expérience ATLAS



## Présentation des aimants LHC

- Les Quadrupôles LHC posent des problèmes techniques très spécifiques qui sont résolus en liaison avec les ingénieurs de CERN/LHC.
- Les aimants des détecteurs sont des prototypes aux caractéristiques très ambitieuses qui présentent une discontinuité par rapport à l'existant.

Le développement des aimants supraconducteurs a débuté :

Pour les DIPOLES :

- En 1988 dans l'industrie et au CERN,

Pour les QUADRUPOLES :

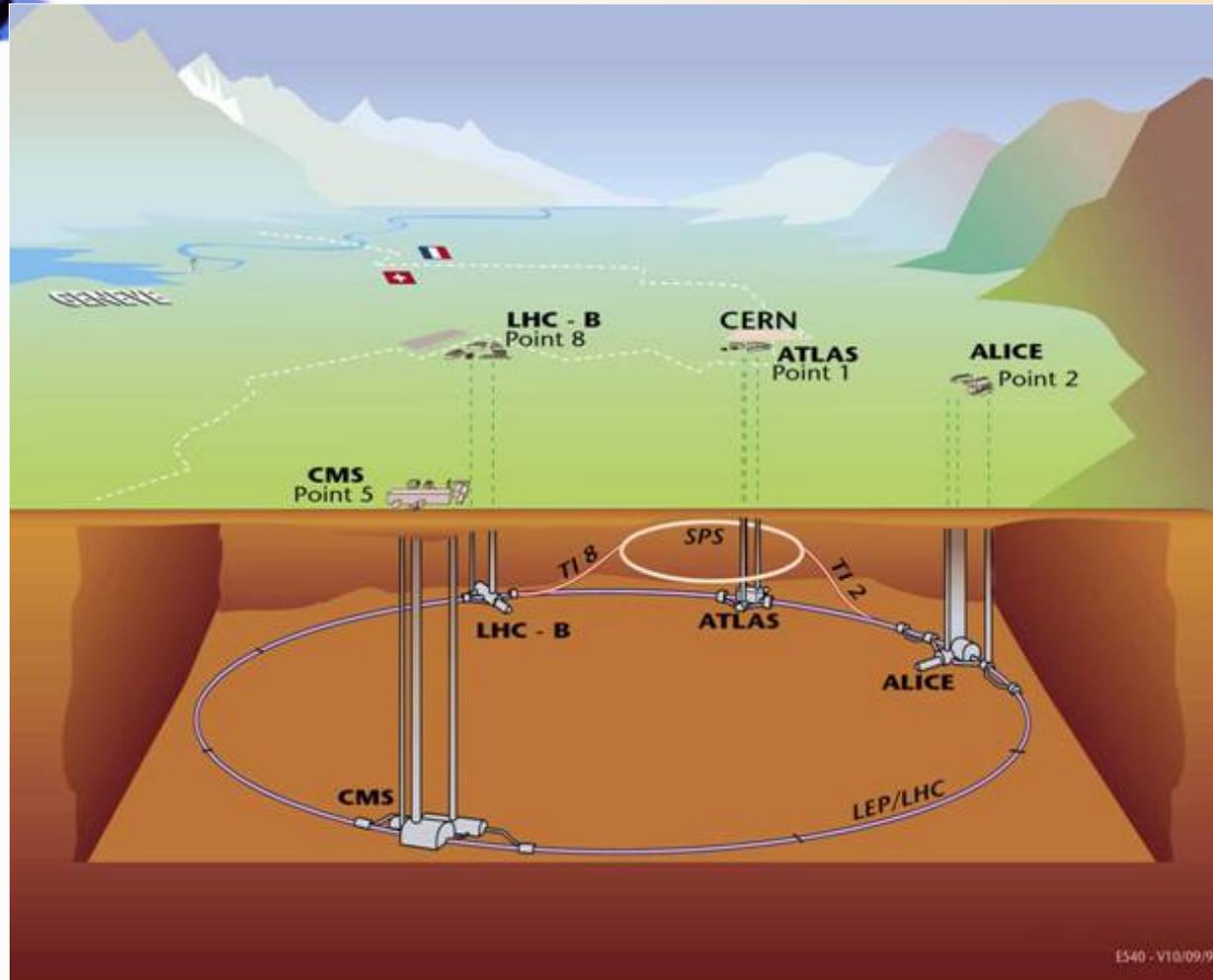
- En 1990, à Saclay,

Pour les DETECTEURS :

- En 1992 au Rutherford, à Saclay et au KEK



## Overall layout of the LHC and its detectors





## Superconductivity & circular accelerators

- Beam energy, magnetic bending field and circular accelerator radius are linked by:

$$E_{\text{beam}} = 0.3 * B * r \quad (\text{Gev, T, m})$$

For LHC  $E = 7\,000 \text{ Gev}$ ,  $B = 8.33 \text{ T}$ ,  $r = 2\,800 \text{ m}$

	Present LHC (SC magnets)	LHC with resistive magnets
Magnetic induction	8.3 T (NbTi critical properties)	1.8 T (iron situation)
Circumference	27 km	125 km
Power for magnets	40 MW	900 MW
Coil current density	400 A/mm <sup>2</sup>	10 A/mm <sup>2</sup>

- Superconductivity enables to reach high magnetic inductions, and so to reduce the size and the electrical consumption of the accelerators



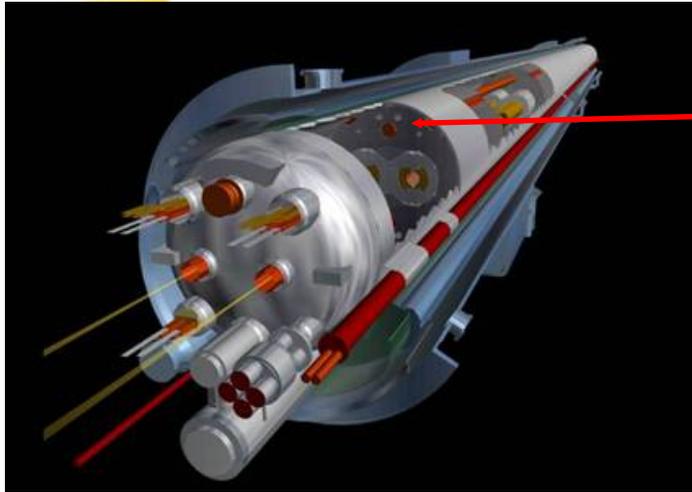
## The three technical challenges



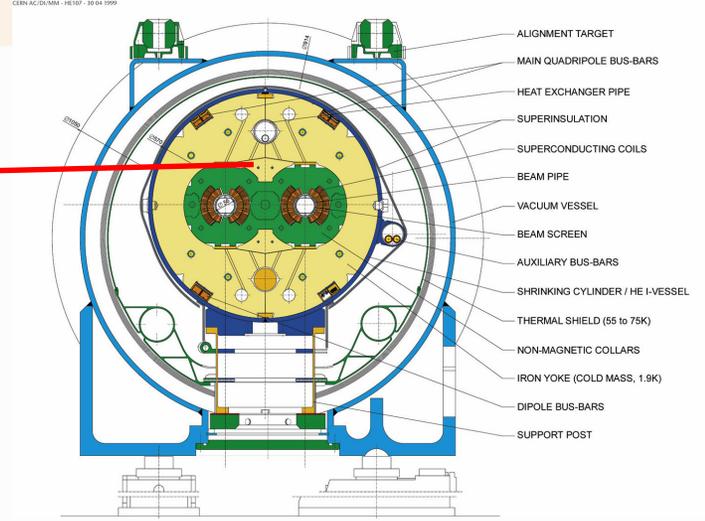
- 7000 km of NbTi cable
- 23 km of SC magnets
  - . 1232 dipoles,
  - . 474 quadrupoles,
  - . 7612 correctors
- Superfluid helium at 1.9 K for cooling



# LHC dipoles



LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

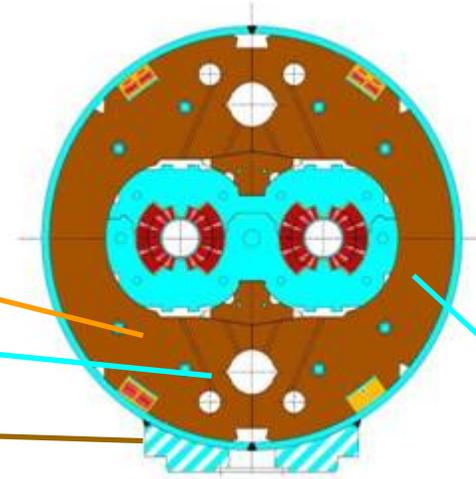


Length: 15m      Weight: 30 tons

2x2 poles per cold mass

SS collars

Iron laminations

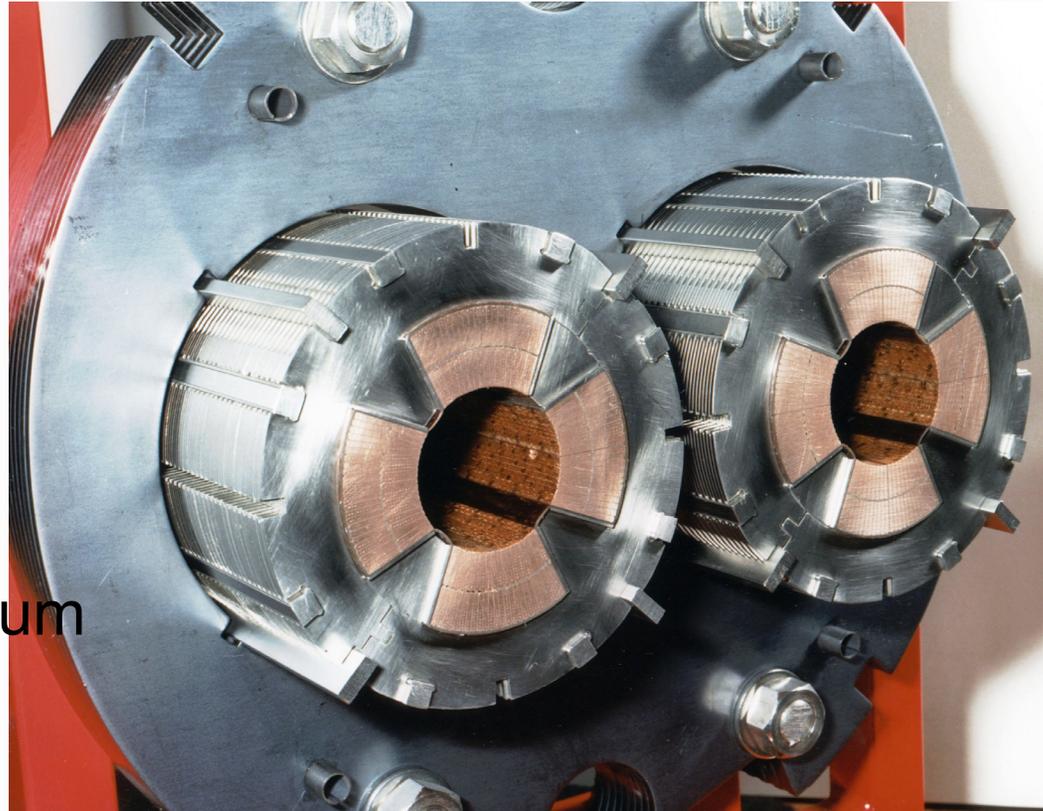


Helium vessel



## Principaux composants des quadrupoles LHC

Câble supra  
Bobines  
Colliers  
Clavettes  
Culasse  
Enceinte Helium

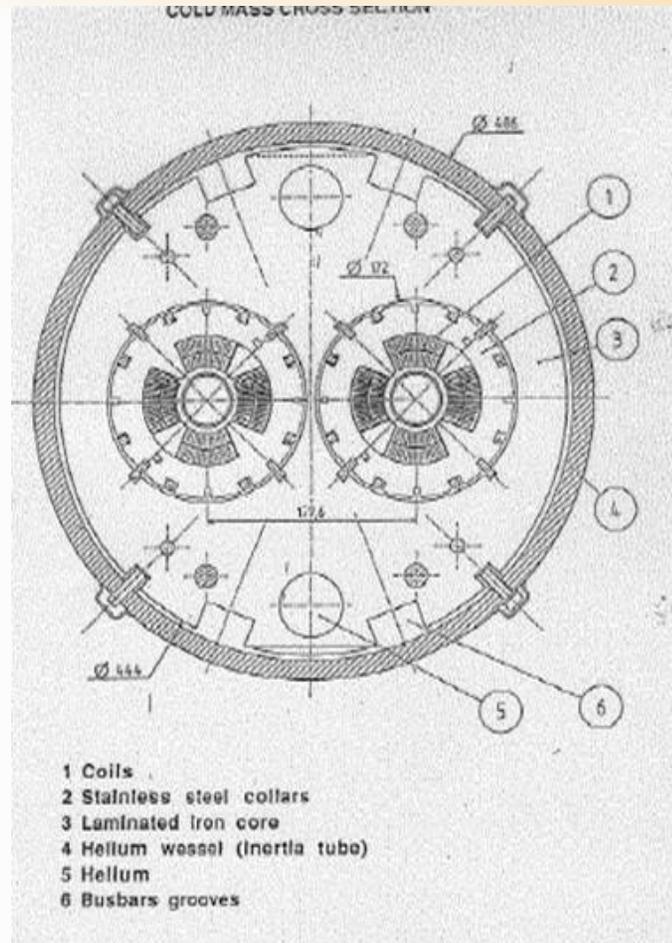




- La figure montre une coupe transversale d'un quadrupôle L.H.C.
- Pour ces aimants, le circuit magnétique comprend deux ensembles frettés: une telle structure est appelée 2 en 1 (les faisceaux circulant en sens inverse dans chaque ouverture).
- Les deux ouvertures ont un diamètre de 56 mm et une longueur d'environ 3 m.
- Les bobines sont destinées à fonctionner en hélium superfluide à une température de 1.9 K. Dans la dernière version, le courant nominal est d'environ 12000 A pour un gradient de 220 T/m.



Câble supra  
Bobines  
Colliers  
Clavettes  
Culasse  
Enceinte Helium  
(tube d'inertie)  
Bus Bars





- Les quadrupôles sont constitués de 4 bobines à deux couches de conducteurs.
- Ces bobines sont frettées ensemble par des colliers qui sont des empilements de tôles laminées prédécoupées en acier inoxydable.
- Ces colliers sont maintenus autour des bobines grâce à huit clavettes.
- Le frettage apporte un support mécanique contre les effets des forces de Lorentz, de plus il permet de précontraindre les bobines azimuthalement.
- Cet ensemble colliers/bobines est lui-même placé dans un nouvel empilement en acier bas carbone appelé circuit magnétique.

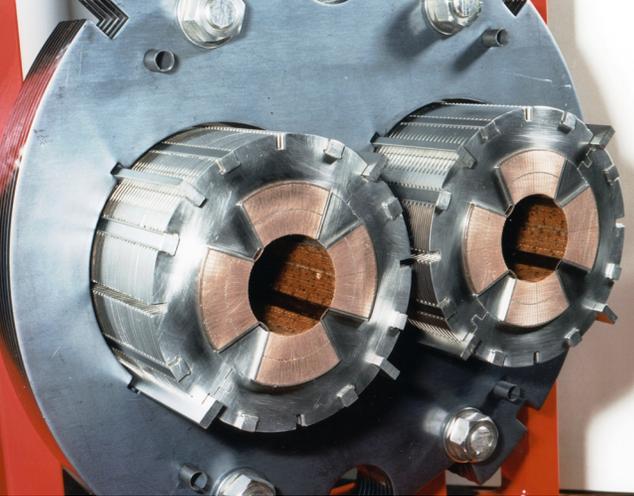


- Les prototypes sont construits « au laboratoire »
- L'expérience de réalisation et d'industrialisation a été acquise sur HERA. (250 aimants et cryostats)
- La première masse froide Q1 a été testée fin 1993 et montée dans le « string test » au CERN (  $G = 252 \text{ T/m} - 15 \text{ kA}$  )
- Le projet complet s'appelle Short Straight Sections
- Saclay: masse froide – Grenoble: instrumentation
- Orsay: cryostats et intégration

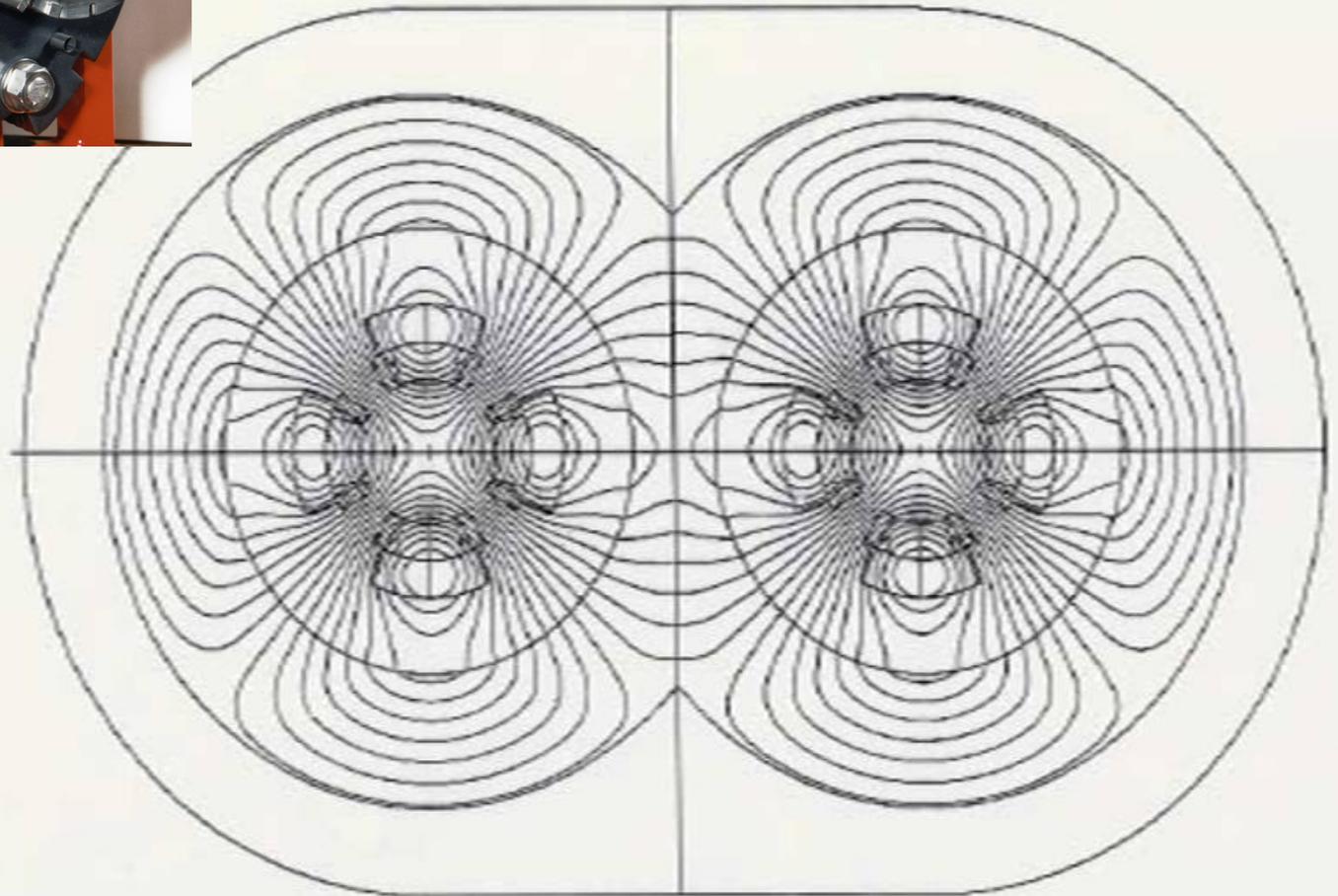


## Paramètres des quadrupoles LHC

- Paramètres des prototypes Masse froide Q3 – Q4
- Entraxe des faisceaux 194 mm
- Diamètre d'ouverture 56 mm
- Câble Rutherford hauteur 15 mm côtés 1.34 à 1.60 mm
- Isolation kapton « précollé »
- Distribution des tours  $(8+2) + (7+7) = 24$
- Gradient 223 T/m
- Courant nominal 11984 A
- Champ maximum sur conducteurs 6.9 T
- Position sur la droite de charge 81 %
- Densité de courant moyenne 420 A/mm<sup>2</sup>
- Longueur magnétique 3100 mm
- Forces horizontales / verticales 54 tonnes/m 74 tonnes/m



## Tubes de Flux des quadrupoles LHC



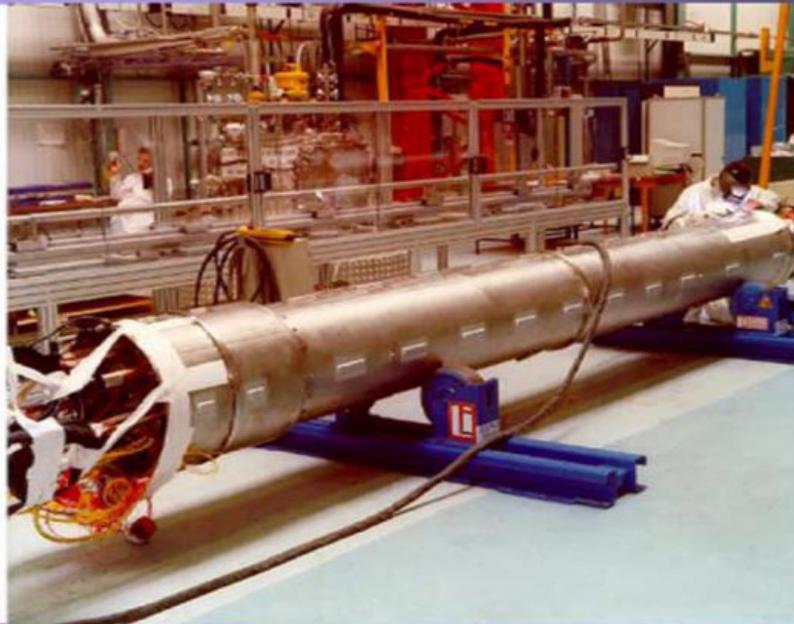


## Rôle de la culasse et de l'enceinte Helium

Le circuit magnétique permet la fermeture des lignes de champ et donc le blindage magnétique de la structure, et de plus, il accroît le champ magnétique intérieur. Le tout est placé dans un tube en acier inoxydable, appelé tube d'inertie, qui permet de rigidifier la structure. Le tube d'inertie joue également le rôle d'enceinte hélium.

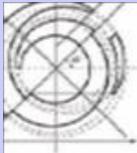


## Fermeture de la masse froide



# Où sont les principales difficultés ?

- Multipôles autorisés =  $\sim 1/10000$  du champ quadripolaire à  $R=17$  mm
  - ▶ tolérances de l'ordre du  $1/100$  mm sur :
    - positionnement des conducteurs
    - outillage de réalisation des bobines
    - nombre de composants
- Tout mouvement des conducteurs peut, par dissipation d'énergie, provoquer le retour à l'état résistif --> Précontrainte
- Positionnement axe magnétique / repères externes  $\sim 1/10$  mm --> tolérances
- Interfaces : cryostat ; autres éléments de la machine
- Limiter le volume d'hélium



# LHC Fabrication - Zone propre

**ALSTOM**



Year 2000

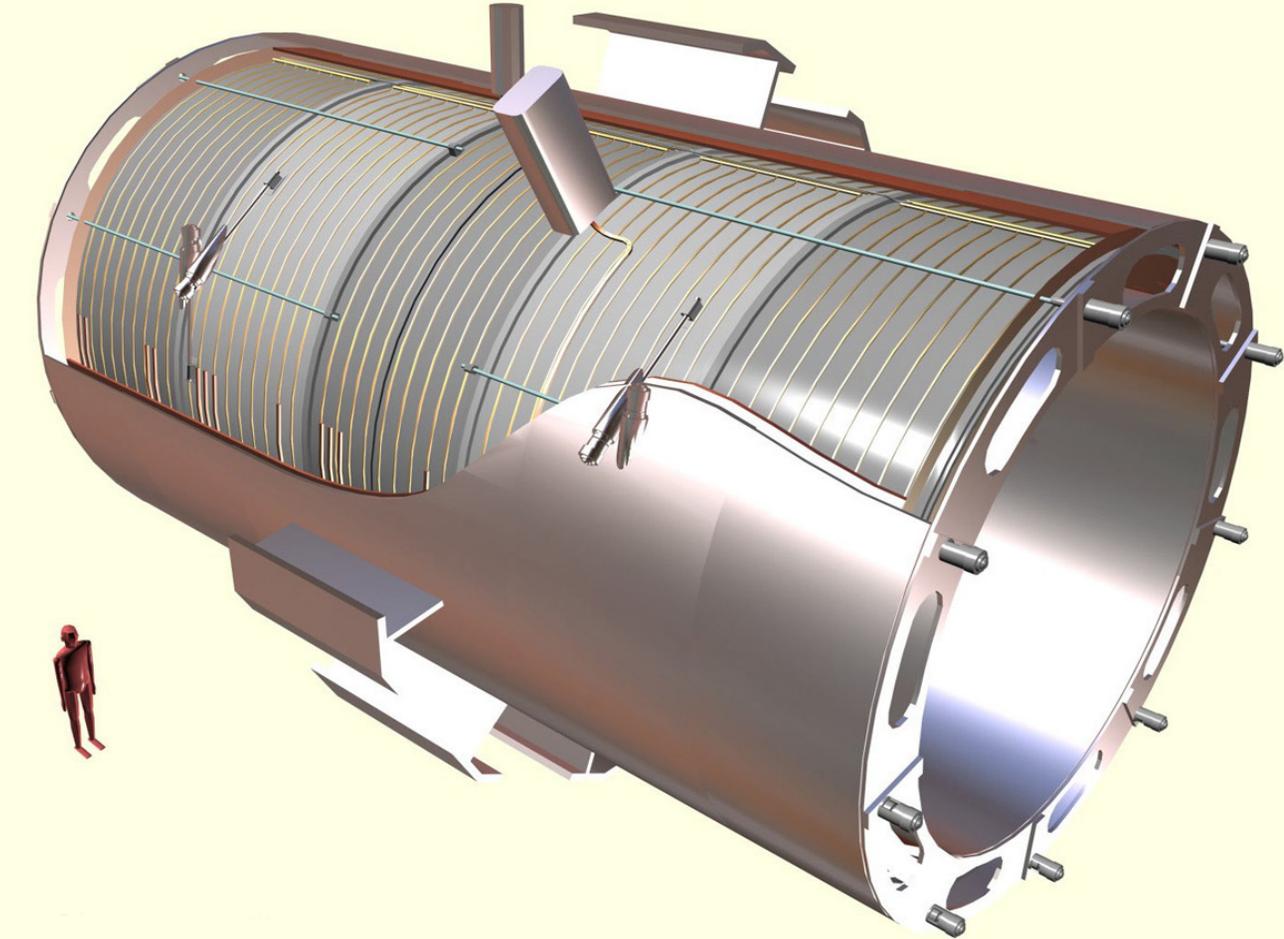


## Cryogenic tests at CERN





## Solenöide CMS





## Le solénoïde CMS

CMS est un solénoïde « compact » pour muons.

Le spectromètre est fondé sur le choix d'un solénoïde à fort champ avec une culasse en fer instrumenté: 4 teslas  
– 12.5 m de long x 6.5 m de diamètre

Il s'agit du plus grand solénoïde jamais construit.

L'énergie stockée est de 2670 Mega Joules.

Le paramètre énergie stockée / masse froide constituera un record 12 Kj/kg.



- Champ Magnétique Central 4.0 T
- Champ « Maximum » sur le conducteur 4.6 T
- Ampères tours totaux 42-51 Mat
- Energie stockée 2.67 GJ
- Longueur magnétique 12500 mm
- Diamètre moyen du bobinage 6632 mm
- Epaisseur du bobinage 262 mm
- Epaisseur du cylindre support 50 mm
- Masse froide totale 225 tonnes



## Reinforced Conductor

The basic idea in CMS design was to include the mechanical reinforcement in the conductor. This choice allow to minimize the shear stresses in the winding.

A (thin ) mandrel is still present for:

- 1) Homogenizing the temperature of the coil during cool-down
- 2) Protection- Quench back
- 3) Supporting the winding during construction
- 4) Anchoring the supporting system of the cold mass in the vacuum chamber





## Le conducteur du Solénoïde CMS

Le conducteur est un câble Rutherford de 32 brins.

Ce câble est coextrudé dans une matrice d'aluminium pur (99.998 %) qui sert de stabilisant et de dimensions 30 x 22 mm<sup>2</sup>.

Cet insert est entouré de deux renforts en alliage d'aluminium A1 6082 T5 soudés par faisceau d'électrons de part et d'autre.

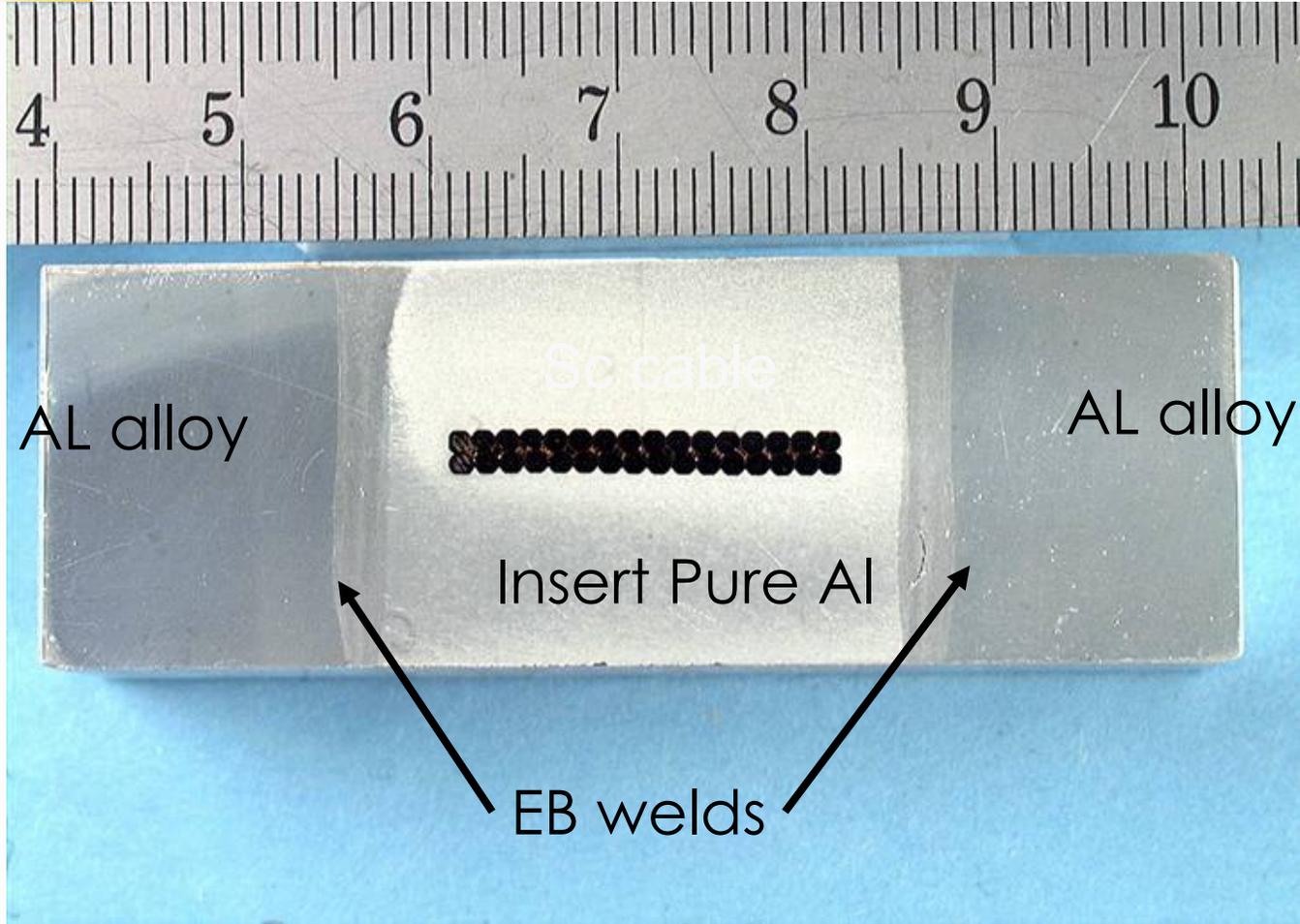
Les dimensions totales du conducteurs sont de 64 x 22 mm<sup>2</sup>.

La densité de courant apparente est de 12.98 A/mm<sup>2</sup>.

Le conducteur est « autoporteur ».

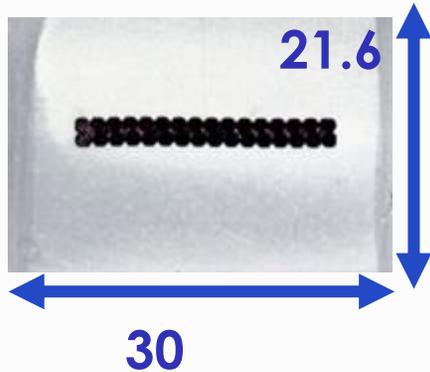


## Final conductor



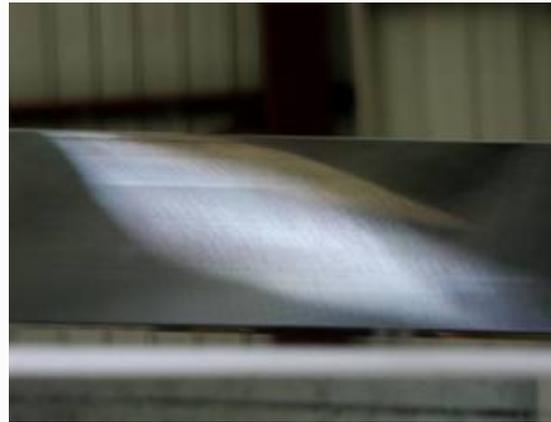
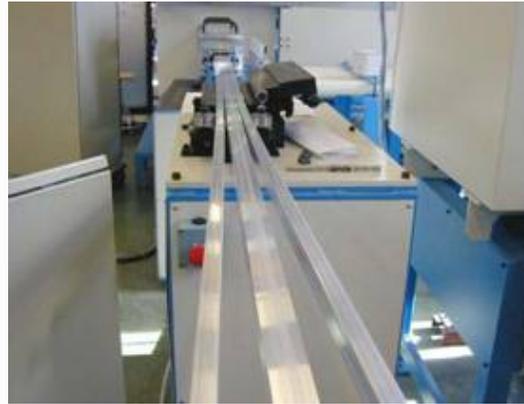


## Co-extrusion of 2.5 km length with continuous process





## Continuous EB-welding of each 2.5 km length





La bobine est réalisée en 5 modules qui seront assemblés verticalement.

Chacune des 4 couches est bobinée en ressort par cintrage à l'intérieur de la frette avec une isolation enrubannée classique.

Chaque module est imprégné sous vide et refroidi indirectement (Fully bounded concept).

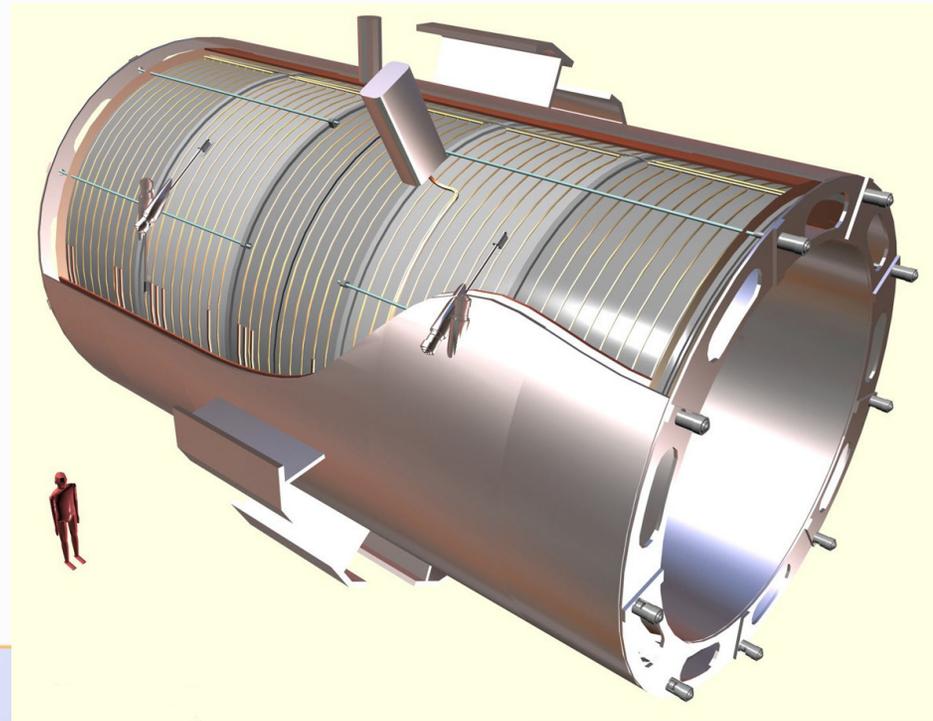
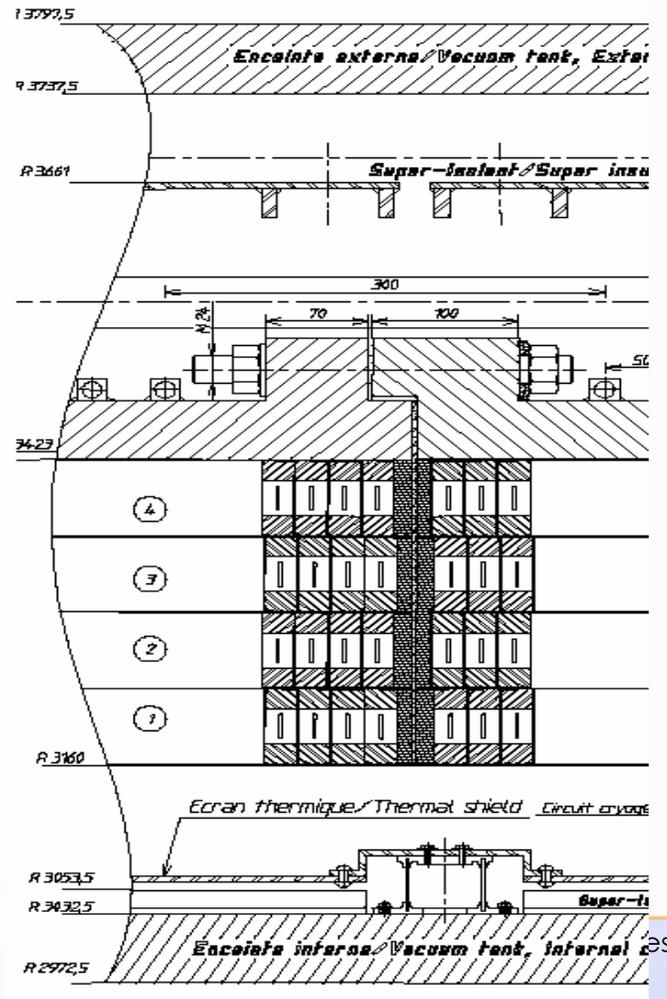
Les raccordements se font à l'extérieur de la frette.

La frette est refroidie par un thermosiphon.

La masse froide est supportée par un jeu de tirants croisés dans l'enceinte à vide.



At the completion of the technical design, the CMS was conceived as a 5 module coil, requiring R&D developments at industrial level of conductor and winding technologies





## Developments of the winding techniques for a reinforced conductor





## Resin impregnation under vacuum involving 1000 l of epoxy





## The coil has been assembled with vertical axis



This allows a very precise coupling  
But how to insert the 220-t coil  
inside the vacuum vessel with  
horizontal axis?





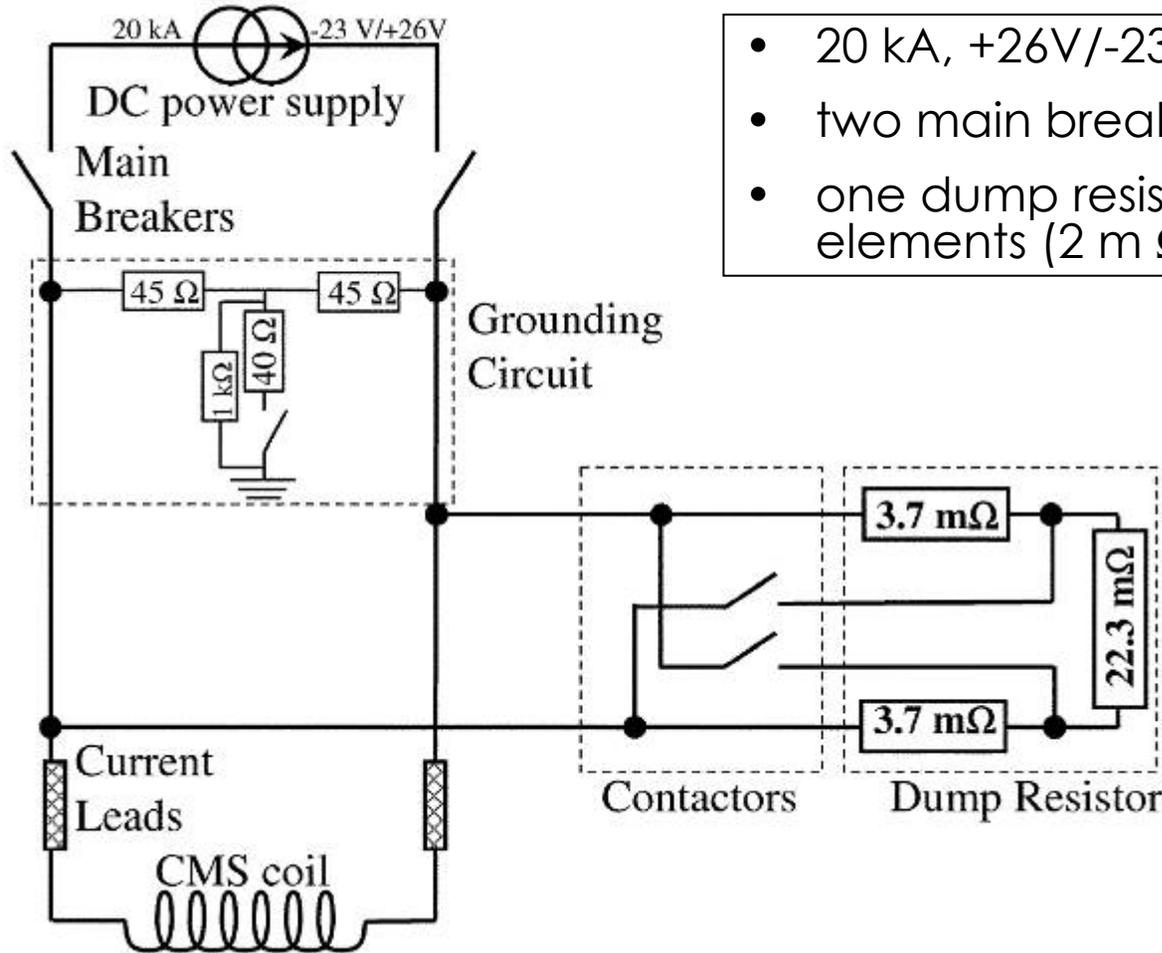




- Courant nominal 19500 A
- Courant critique (5T, 4.2 K) 55600 A
- Auto inductance 14.05 Henry
- Résistance de décharge rapide 50 m $\Omega$
- Tension de décharge  $\pm$  500 volts
- Température atteinte par
- échauffement adiabatique homogène: 90 K
- Température atteinte avec le circuit
- de protection et le cylindre de Quench Back: 60 K
- Température atteinte avec le cylindre
- De Quench Back seul: 145 K



## Schéma électrique de protection de CMS



- 20 kA, +26V/-23V power converter
- two main breakers
- one dump resistance in three elements (2 m $\Omega$  or 30 m $\Omega$ )

# CMS Solenoid : cold mass design at Saclay

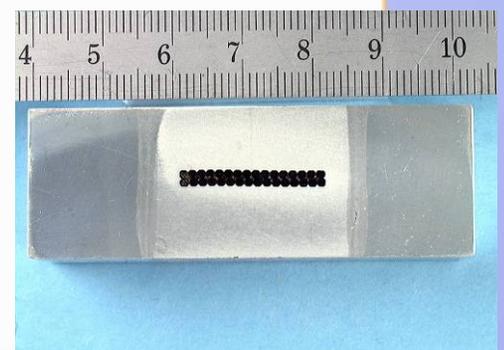


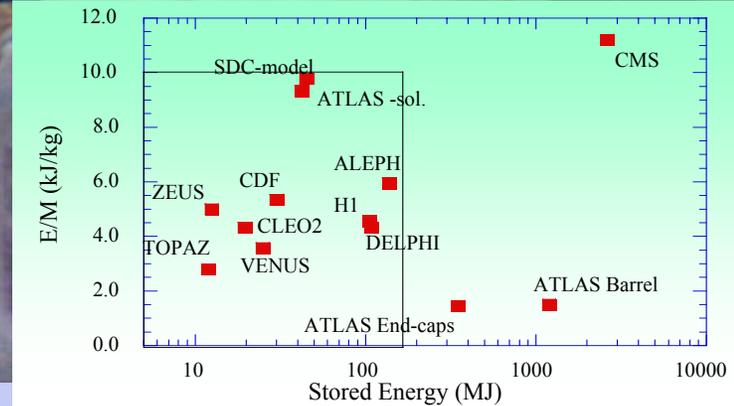
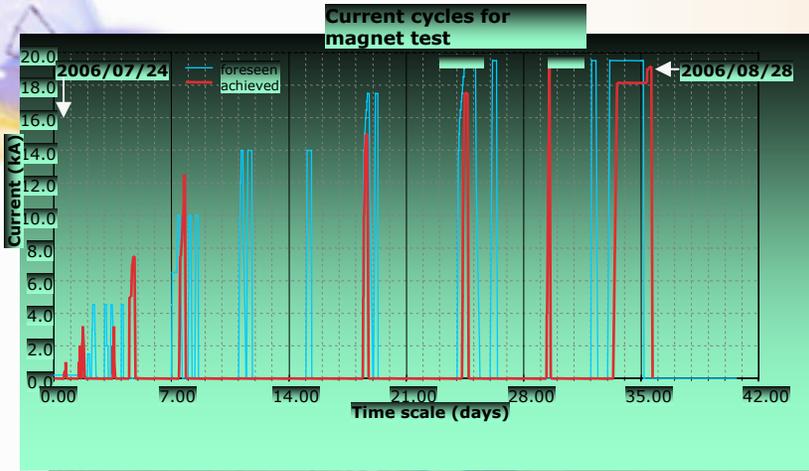
<b>Emission :</b> R. DUTHIL	<b>Objet :</b> Etude du prérefroidissement	<b>Date :</b> 25.09.91
		<b>Feuille:</b> 1/1
<b>Destinataires :</b> MM. BENICHOU, DESPORTES, GENINI, LOTTIN J.C., PAILLER		

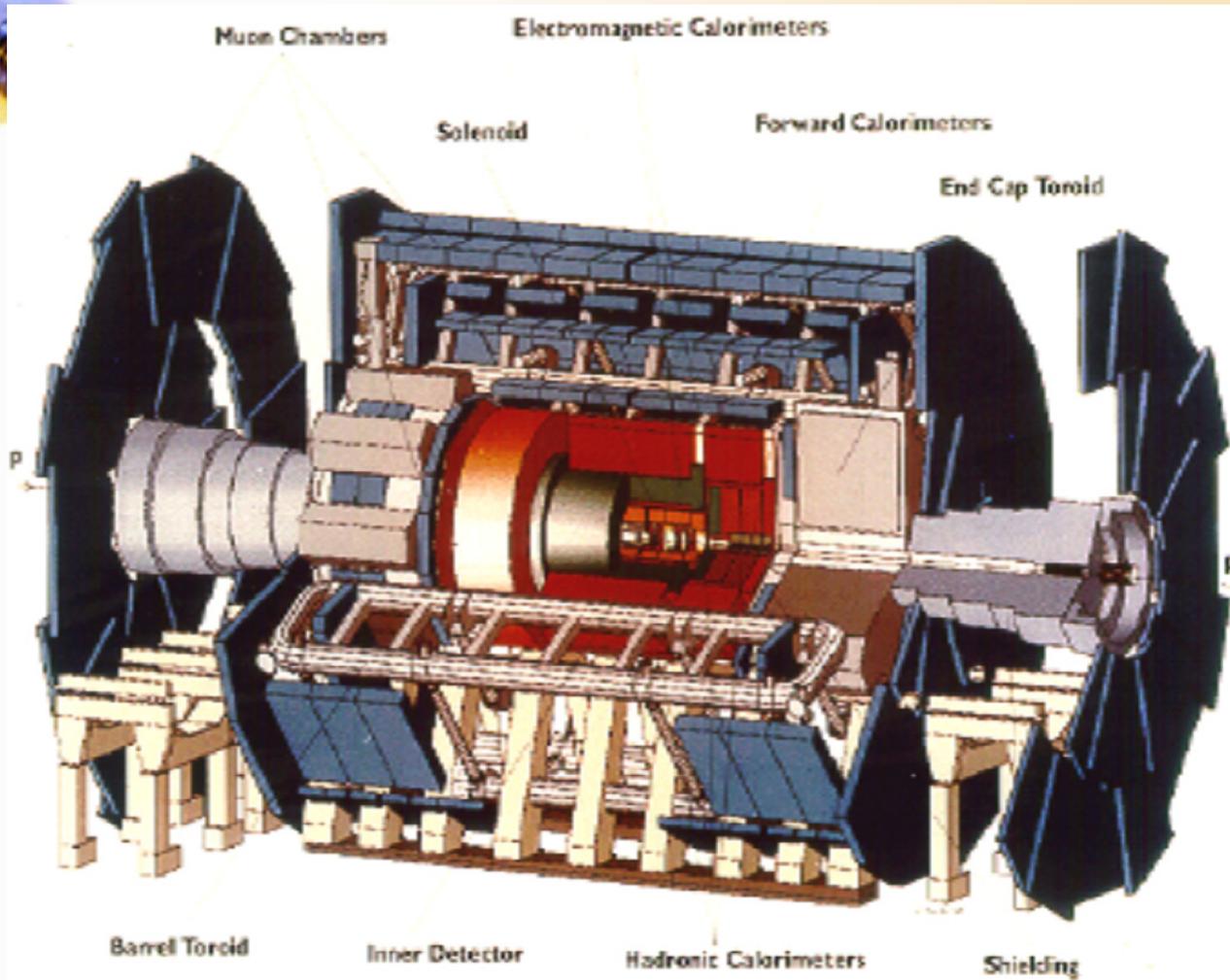
- Principe

$\Delta T \leq 40^{\circ}\text{K}$   
 • Le circuit de gaz est refroidi par une boîte froide de refroidissement dipie essentiellement par  $\text{LN}_2$   
 • On se donne 25 jours pour arriver a  $100^{\circ}\text{K}$  et 5 jours de plus pour arriver a  $4,5^{\circ}\text{K}$  (total = 1 mois)  
 - Masse a refroidir : Alu  $R_e = 3300$ ,  $R_i = 3075$   
 Longueur du cylindre = 13748. d'où  $M = 214$  tonnes,  
 - Calcul de la durée de refroidissement de  $30^{\circ}\text{K}$  a  $100^{\circ}\text{K}$ :  $\Delta t = \sum \frac{M_{\text{Alu}} \times C_{\text{Alu}} \times \Delta T}{\dot{m}_{\text{He}} \times C_{\text{He}} \times 40^{\circ}\text{K}}$   
 On fait varier  $\dot{m}_{\text{He}}$  pour arriver a  $\Delta t < 25$  jours.

CMS  
reinforced  
conductor





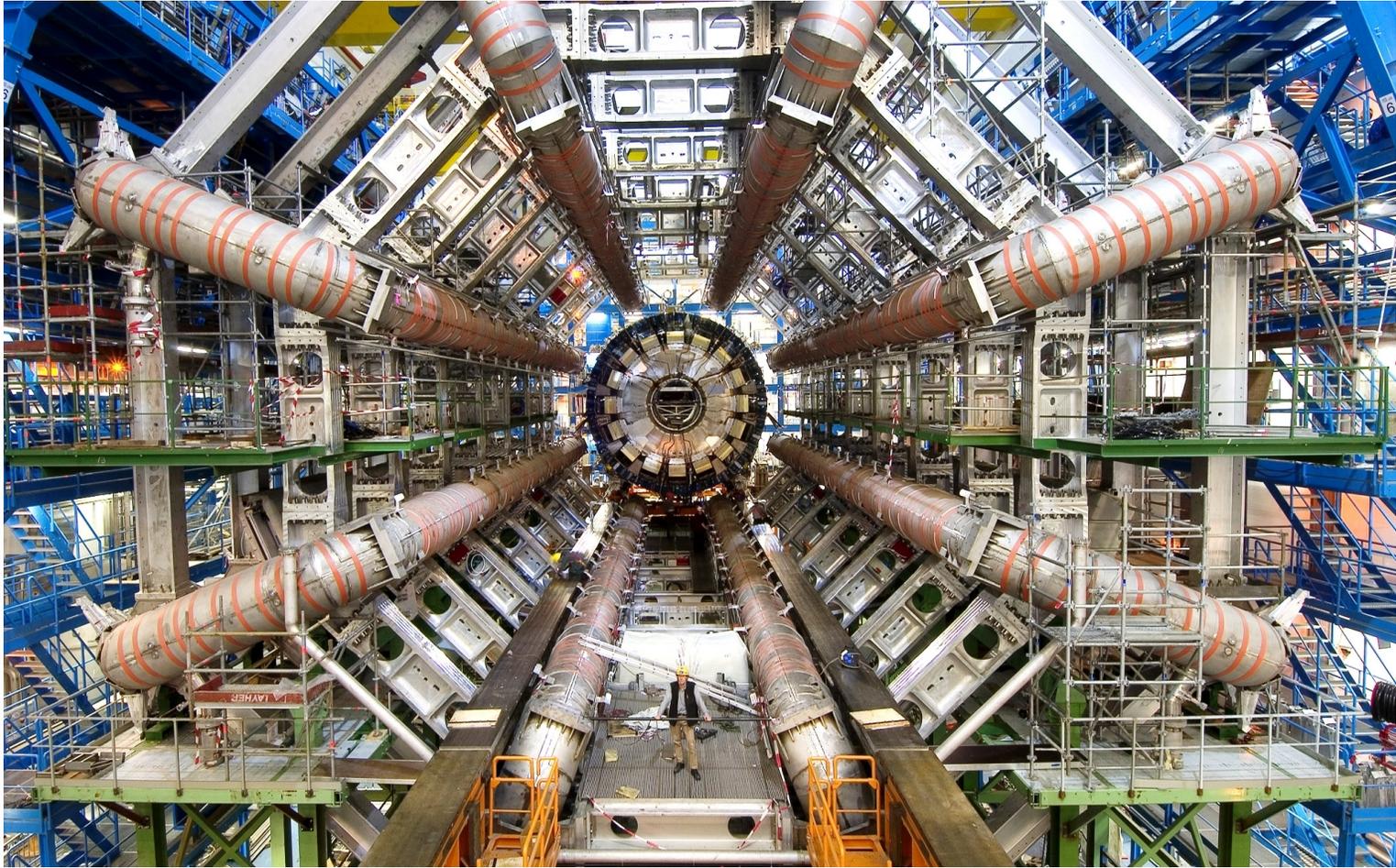




- 1. Le Toroïde est constitué de 8 bobines indépendantes assemblées en éventail et de façon symétrique autour de la zone centrale du détecteur.**
- 2. A part les éléments de structure nécessaires à l'assemblage et à la tenue de ces bobines, l'espace entre bobines est ouvert à l'air libre et permet la mise en place des détecteurs à muons avec une couverture angulaire quasi totale.**
- 3. Chaque enroulement est formé de deux doubles galettes planes en forme « d'hippodrome » de 25 mètres de long et 5 mètres de large placés dans la boîte à bobines.**
- 4. Cette boîte à bobines est chargée de contenir rigidement les efforts internes qui s'exercent sur les conducteurs sous l'effet du champ magnétique.**



## Toroïde ATLAS (barrel) dans la caverne au point 1 fin 2005



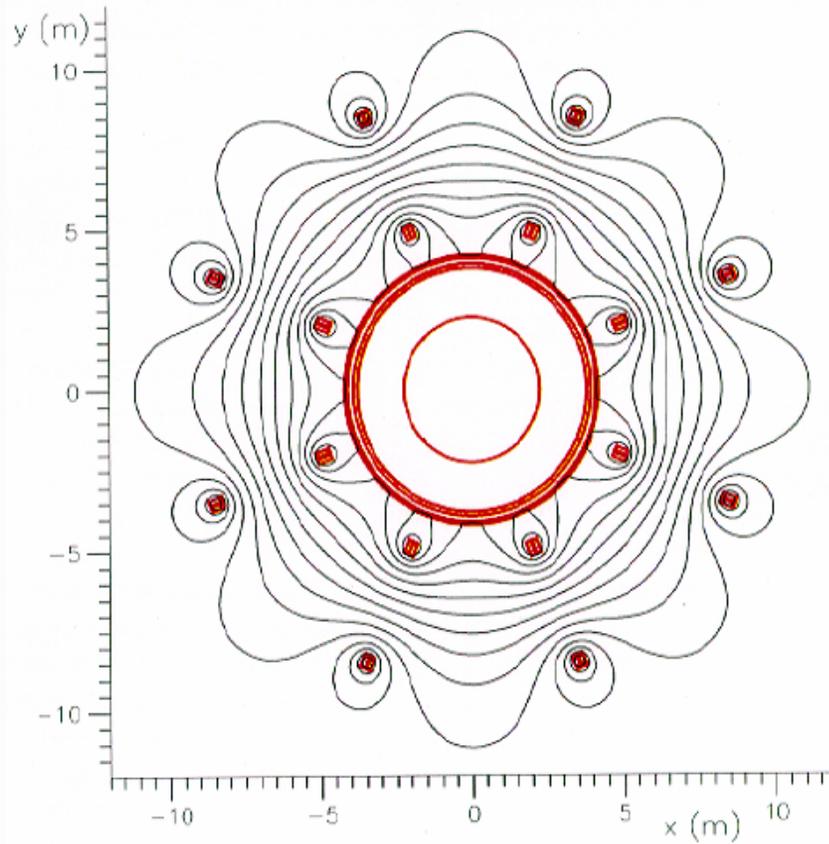


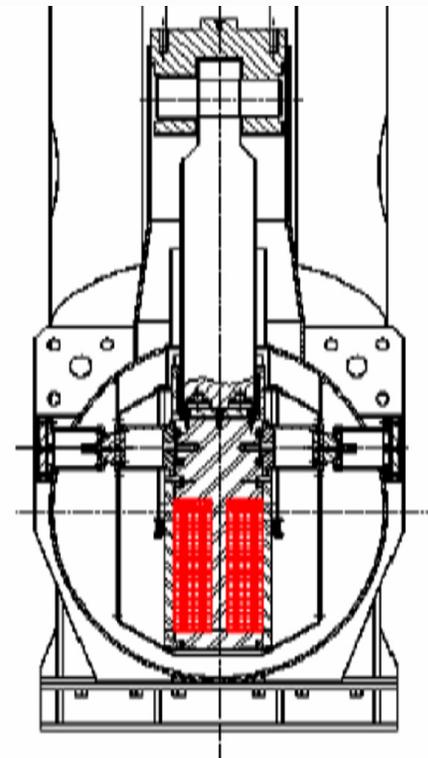
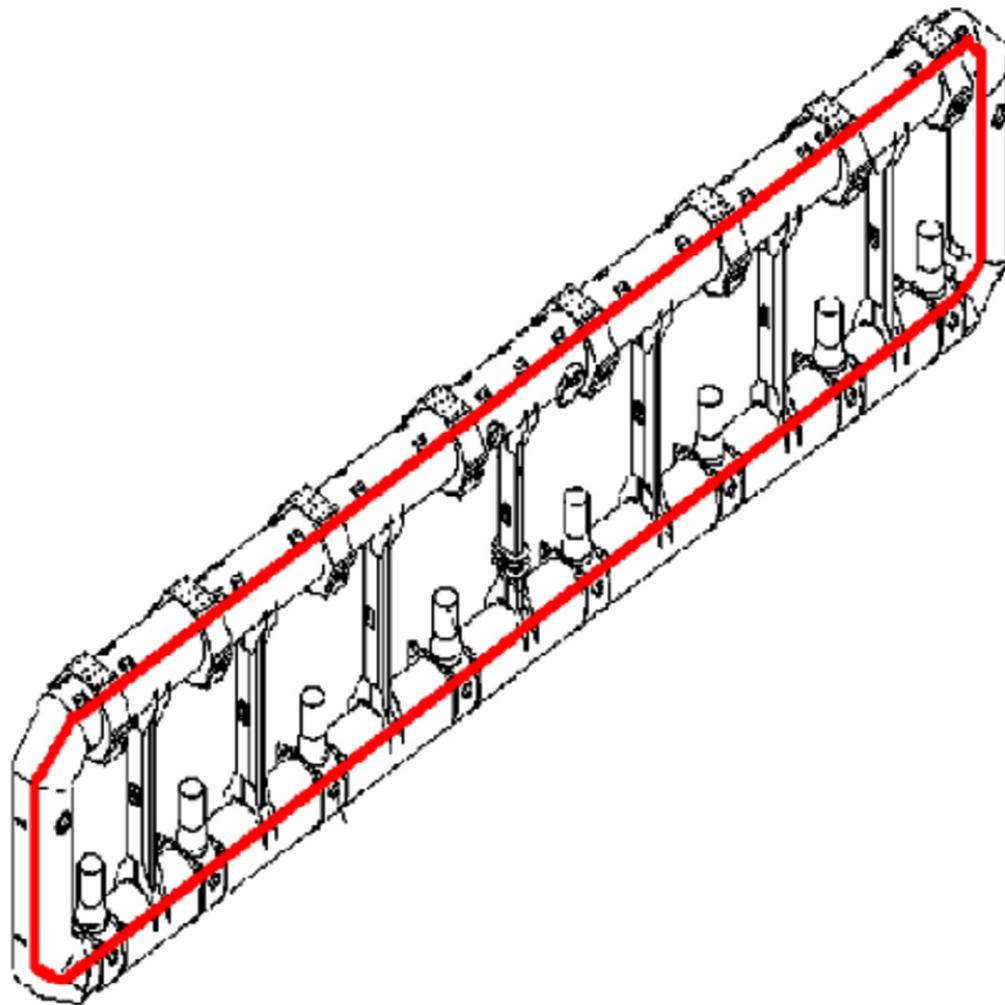
## Paramètres du toroïde ATLAS (barrel)

- Diamètre interne 9,4 m
- Diamètre externe 20,1 m
- Longueur 25,3 m
- Nombre de bobines 8
- Ampère-tours 19,7 MA
- Energie stockée 1080 MJ
- Courant nominal 20,5 kA
- Champ maximal sur le conducteur 4 T



## Tubes de flux du Toroïde







## Parametres de la bobine

- **Conductor size:  $57*12 \text{ mm}^2$**
- **Turns per pancake:  $2*30$**
- **Double pancake: 2**
- **Radial thickness: 0.39 m**
- **Azimutal thickness: 0.29 m**
- **Winding thickness: 4.98 m**
- **Winding length: 24.95 m**



**Le conducteur choisi est constitué d'un câble supraconducteur de 38 brins Nb -Ti coextrudés dans un profilé en aluminium extra-pur, matériau stabilisant présentant une très haute conductivité électrique et thermique.**

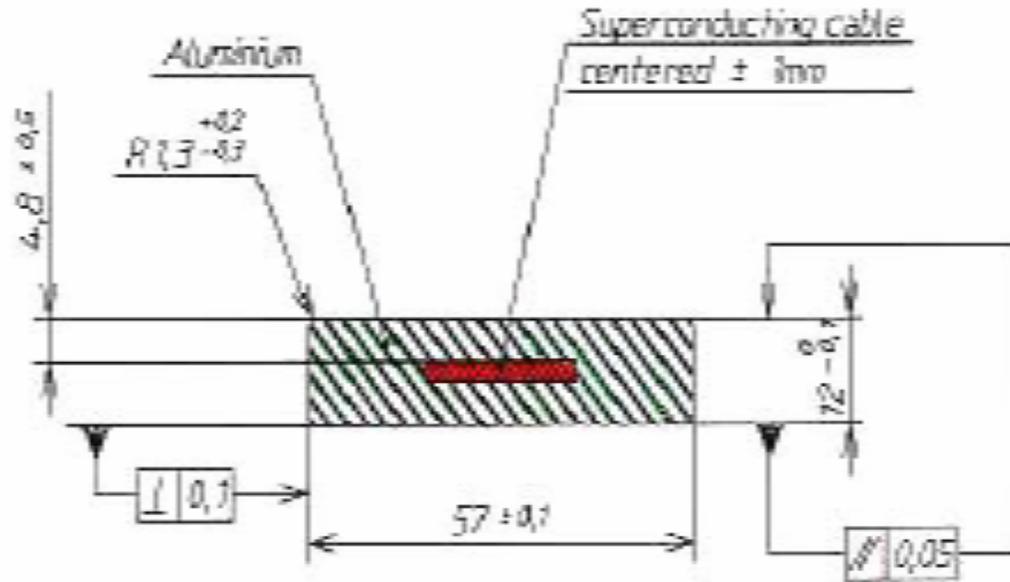
**La section hors-tout de ce conducteur est de 57 x 12 mm<sup>2</sup>. Lors des opérations de roulage, les conducteurs sont isolés par un tissu de verre.**

**Les doubles galettes sont isolées et imprégnées sous vide avant mise en place dans la boîte à bobines.**

**Lors de cette opération de montage dans la boîte à bobines chaque double galette subira une opération de précontrainte et une opération de collage-blocage.**



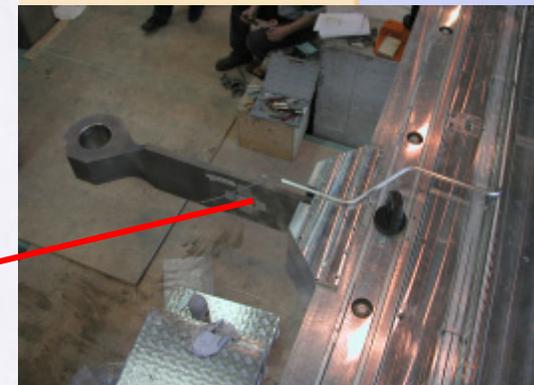
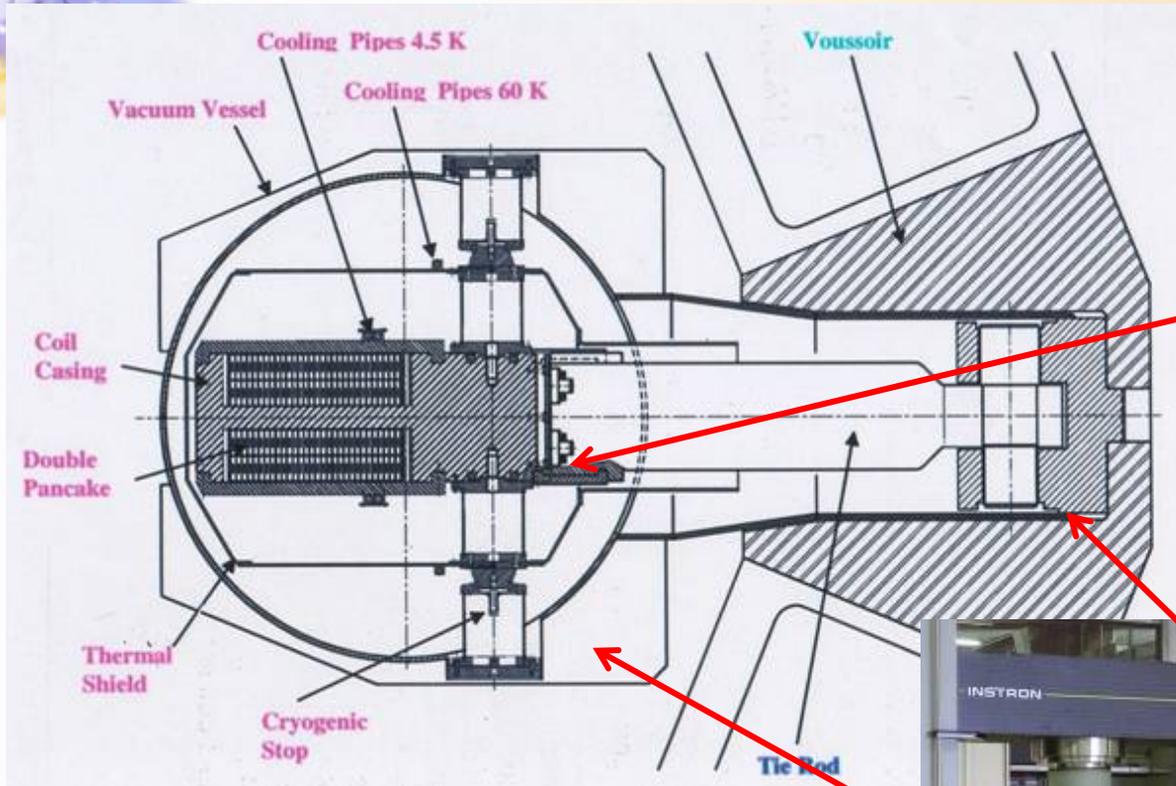
## Dimensions du conducteur ATLAS







# BARREL TOROID Mechanical supports (R&D Collaboration)



- Ti 5Al 2.5 Sn ELI Tie rods
- 304 L Heads
- Fiber Glass-Epoxy Stops



## Conception mécanique et thermique d'ATLAS

- 1. On a recours à un refroidissement indirect, l'hélium liquide circule dans des serpentins fixés sur la boîte à bobine.**
- 2. Le cryostat comprend l'enceinte à vide à température ambiante, les écrans refroidis à température intermédiaire de l'ordre de 60 K, les intercalaires multicouches de super isolant et les circuits de distribution internes, cryogéniques et électriques.**
- 3. La reprise des efforts magnétiques est assurée par des biellettes en titane.**
- 4. Les butées cryogéniques reprennent le poids de la masse froide et permettent le glissement lors de la mise en froid.**



## Protection en cas de Quench

**Le principe de la protection est la décharge interne de l'énergie.**

**La fiabilité des chaufferettes résistives doit être parfaite.**

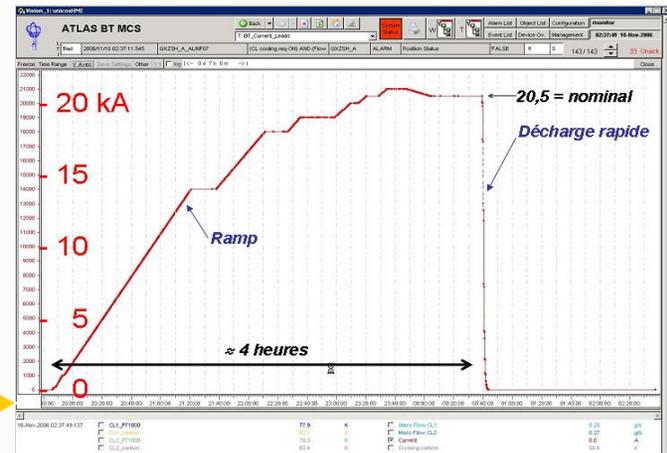
**La mise en série des bobines est effectuée dans l'anneau cryogénique.**

**La température par échauffement adiabatique homogène est de 85 K.**

**La température maximum après décharge rapide est de 100 K.**



- Cold Mass Integration in H180
- Cryostat Integration in H180
- Individual coil test and Barrel Toroid test





## **Nouveaux Projets**

**1. ITER**

**2. Neurospin ISEULT**

# The core of ITER



**Central Solenoid**  
Nb<sub>3</sub>Sn, 6 modules

**Toroidal Field Coil**  
Nb<sub>3</sub>Sn, 18, wedged

**Cryostat**  
24 m high x 28 m dia.

**Vacuum Vessel**  
9 sectors

**Blanket**  
440 modules

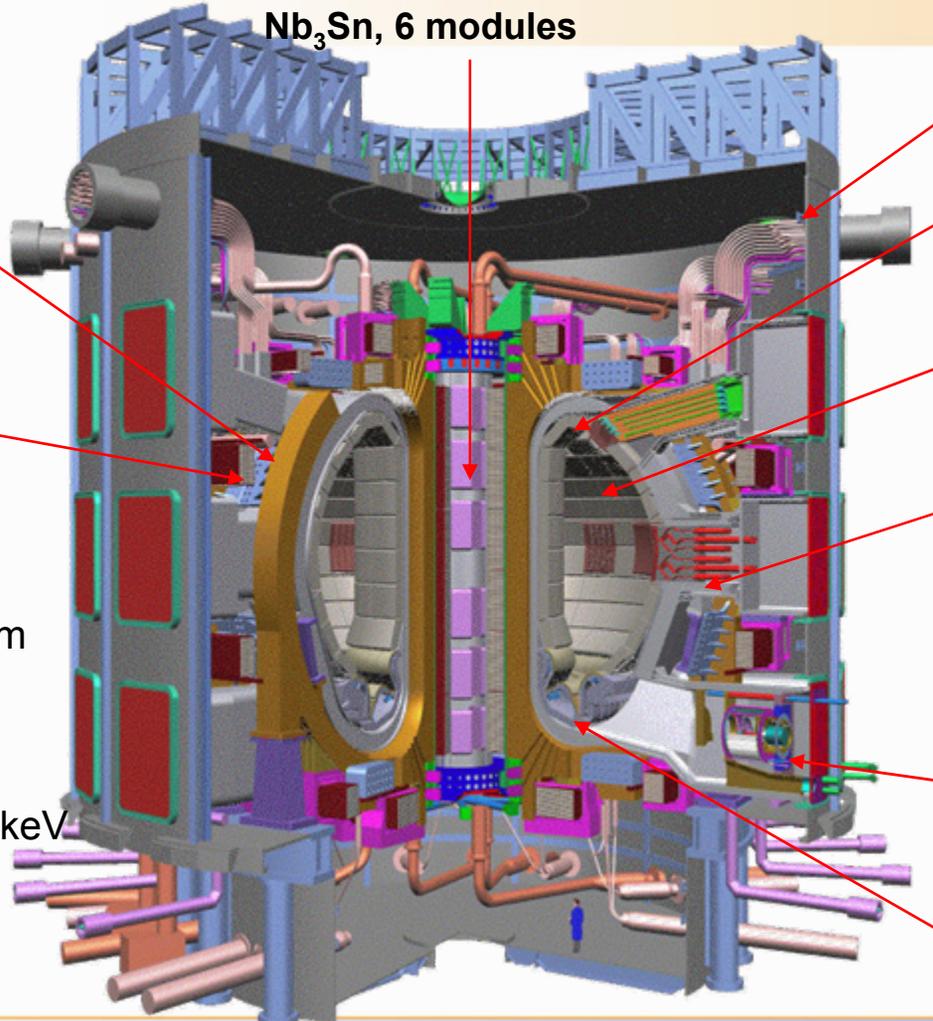
**Port Plug**  
heating/current drive, test blankets limiters/RH diagnostics

**Torus Cryopumps, 8**

**Divertor**  
54 cassettes

**Poloidal Field Coil**  
Nb-Ti, 6

Major plasma radius 6.2 m  
Plasma Volume: 840 m<sup>3</sup>  
Plasma Current: 15 MA  
Typical Density: 10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup>  
Typical Temperature: 20 keV  
Fusion Power: 500 MW



Ecole des Accélérateurs – La Plaine des Maures – La Plaine des Maures 17 & 18/09/09 – Magnétisme Antoine DAEL

**Machine mass: 23350 t (cryostat + VV + magnets)**  
- magnet systems: 10150 t; cryostat: 820 t



## Overall Features

### 4 Main Systems, all superconducting

System	Energy (GJ)	Peak Field (T)	Total MAT	Cond length (km)	Total weight (t) (strand)
Toroidal Field TF	41	11.8	164	82.2 Nb <sub>3</sub> Sn	6540 (396)
Central Solenoid	6.4	13.0	147	35.6 Nb <sub>3</sub> Sn	974 (118)
Poloidal Field PF	4	6.0	58.2	61.4 NbTi	2163 (224)
Correction Coils CC	-	4.2	3.6	8.2 NbTi	85

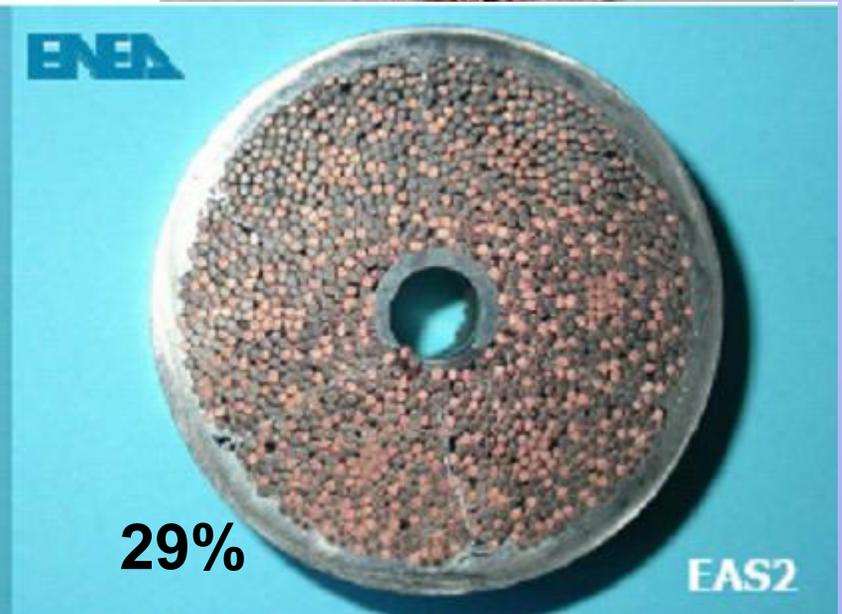
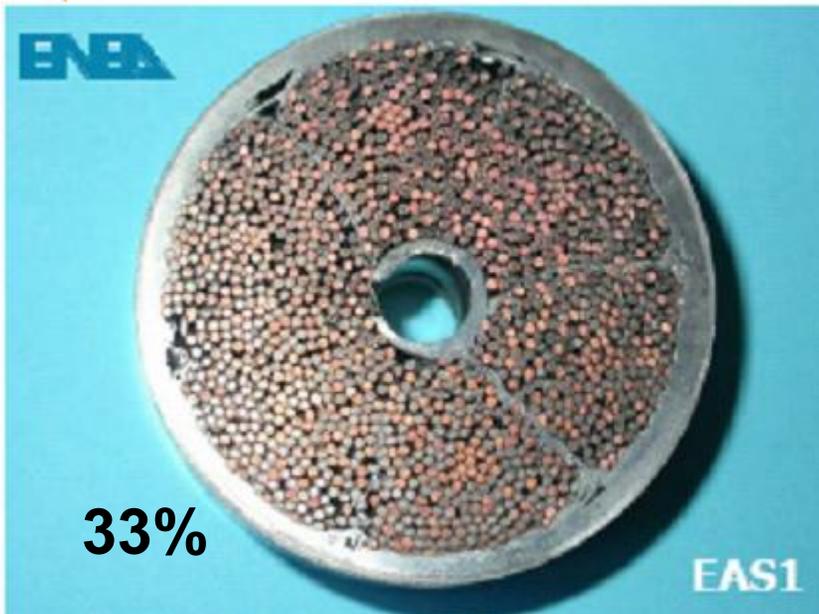


## ITER TF Conductors

**TFMC cable  
configuration  
(2001)**

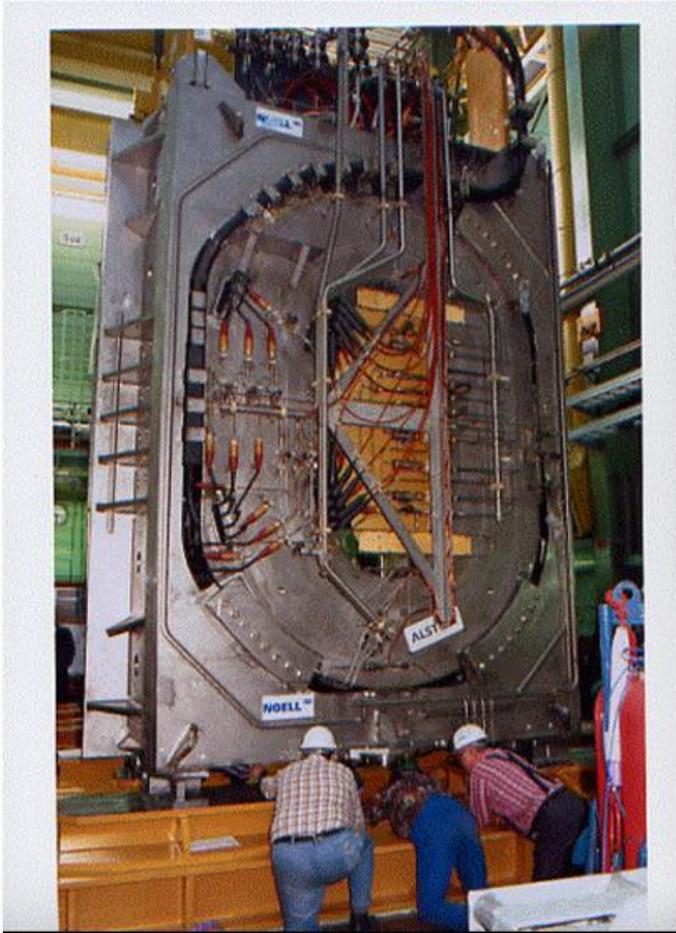


**ITER Option 2 (low void  
fraction 2007)**





## Toroidal field model coil TFMC



- Model coil realized and tested by Europe in 2001-2002
- Height 4 m
- Width 3 m
- $B_{\max}$  7.8 T
- $I_{\max}$  80 kA

## Centre NeuroSpin



- Maîtrise d'ouvrage: **DSV**
- Projet 2002-2007
- Collaboration interne DSV - **DSM/DAPNIA** (conception aimants, gradients, antennes, gestion de projet) et **CEA-Saclay** (réalisation du bâtiment)
  - Situé à Saint-Aubin sur le centre de Saclay
  - Maîtrise d'œuvre: Cabinet d'architecture VASCONI
  - Environ 150 chercheurs à terme (50% permanents)
  - **Grand Instrument pour la Biologie**
    - Centre européen avec accueil de groupe étrangers
- Equipement de 4 Imageurs/Spectrographes R.M.N.
  - Recherche clinique 3T; 7T; **11,75T**
  - Recherche Pré-clinique 17T



## MRI for the future : towards the Very High Fields ...

### Push the limits

- MRI « high field » : 7 tesla and more
- MRI « research »: 3 – 5 tesla

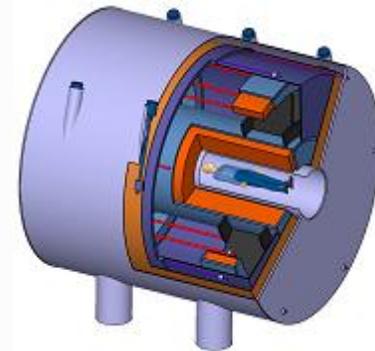
Medical MRI : 0,1-1,5 tesla



*Magnet 3.0T (Bruker) SHF*



MRI « very high fields » : 11.7 tesla

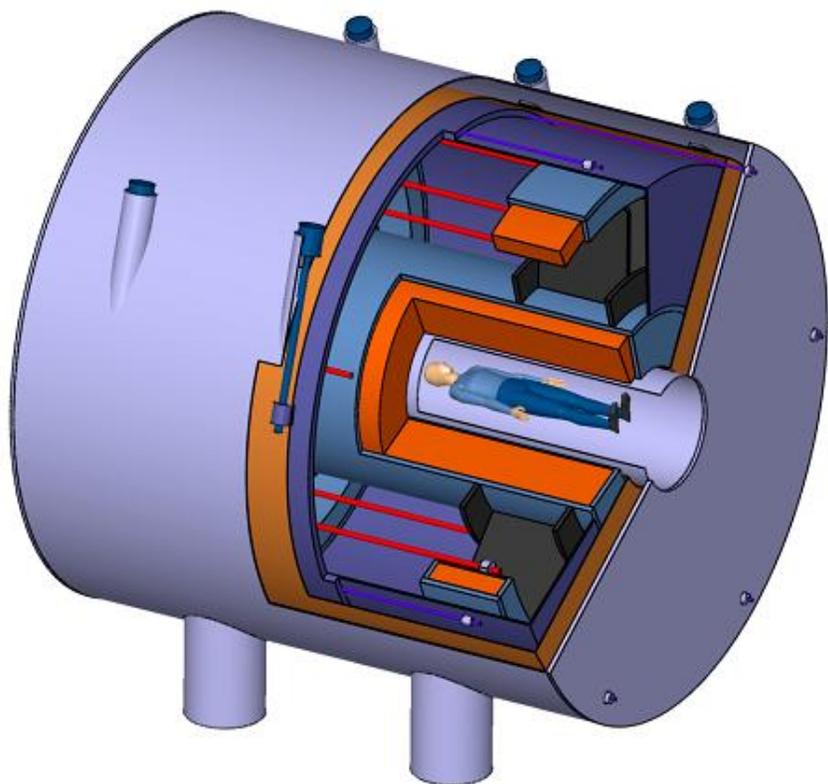


*B0 11.7 T*

*Magnet 1.5T (GE) SHF/CBA*

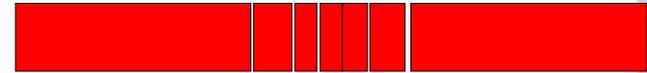
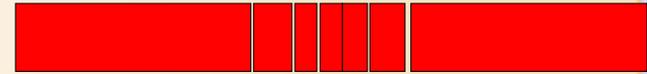
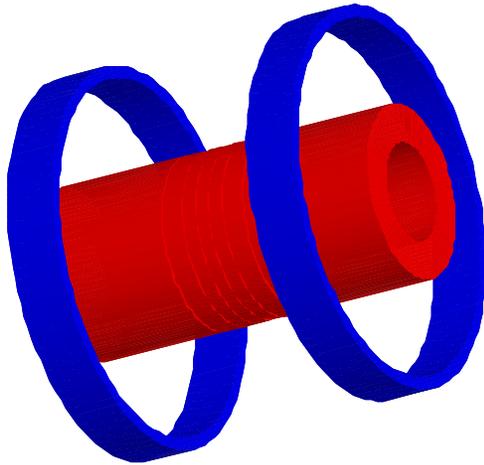


## Neurospin ISEULT: un aimant produisant un champ de 11,75 T homogène spatialement et stable dans le temps dans un diamètre de 900 mm



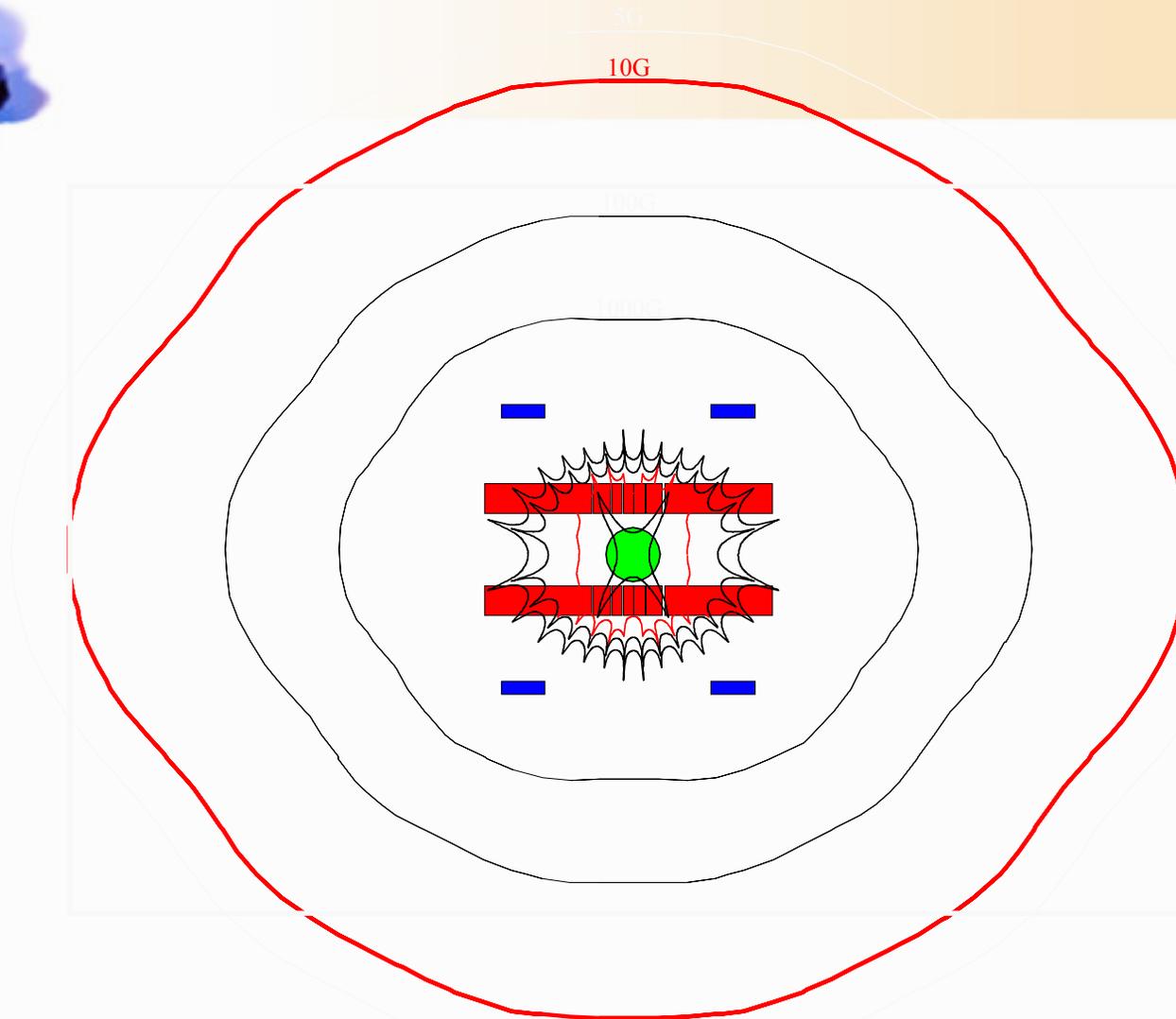
<b>B0</b>	<b>11.75 T horizontal</b>
<b>Supraconducteur</b>	<b>NbTi</b>
<b>Diamètre interne</b>	<b>≥ 90 cm</b>
<b>Dérive</b>	<b>≤ 0.05 ppm/h</b>
<b>Homogénéité</b>	<b>≤ 0.25 ppm/25 cm dsv ≤ 0.10 ppm/10 cm dsv</b>
<b>Champ de fuite axial/radial</b>	<b>5 G : 9.6 m / 5.1 m 1 G : 14.2 m / 8.8 m</b>

## Magnet Key Features



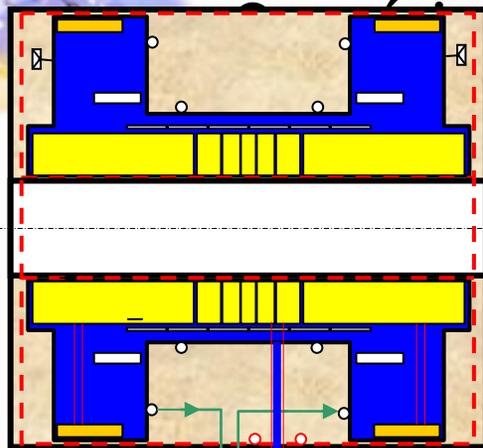
Stored Energy	298 MJ
Operating current	1411 A
Critical current on the load line	1534 A
Temperature margin	1 K
Winding volume (Cable+Hell+Spacers)	9.7 m <sup>3</sup>
Winding pack length	4.m
Winding inner diameter	1.m
Winding outer diameter	4.m
Current density inside winding	28 A/mm <sup>2</sup>
Estimated magnet weight	150 tons

# Active shielding and homogeneity



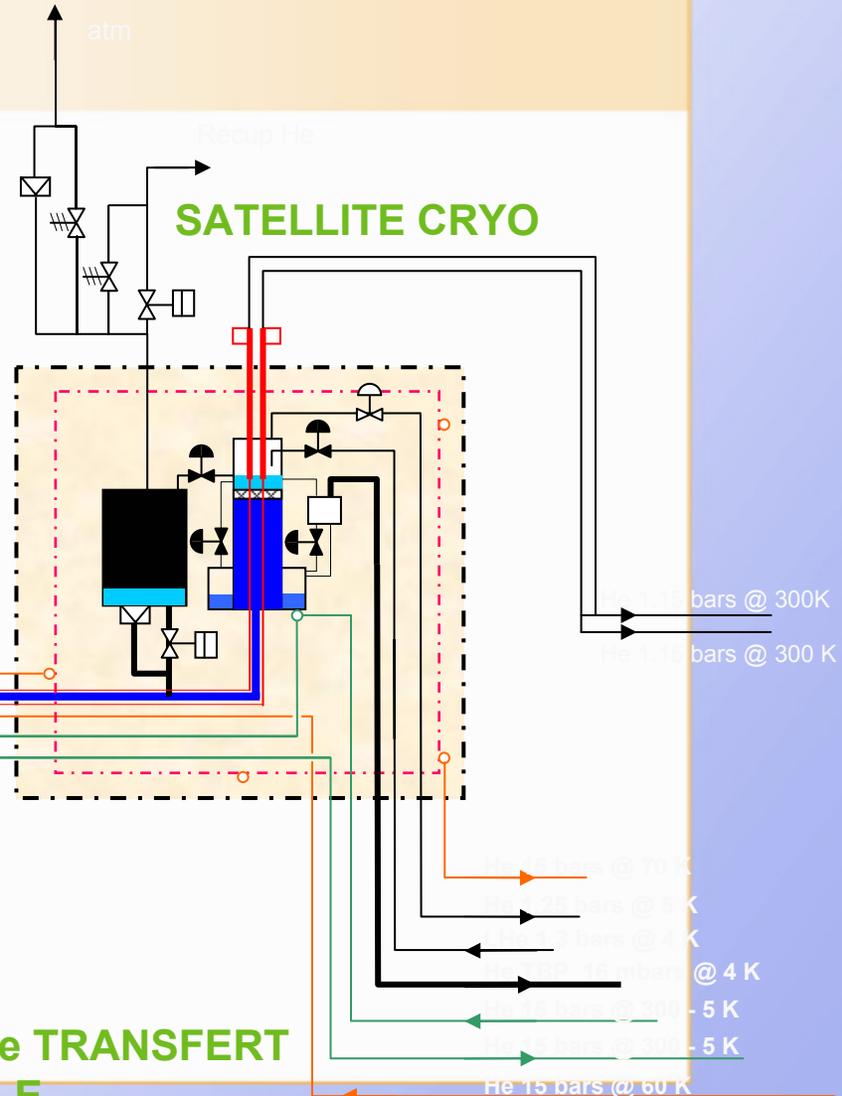
# CRYOSTAT AIMANT

générale



CALODUC 1.8 K

SATELLITE CRYO



- Circuit de pré-refroidissement (300 → 5K)
- Circuit des écrans (60 K)
- Circuit électrique (busbars)
- Caloduc HeII

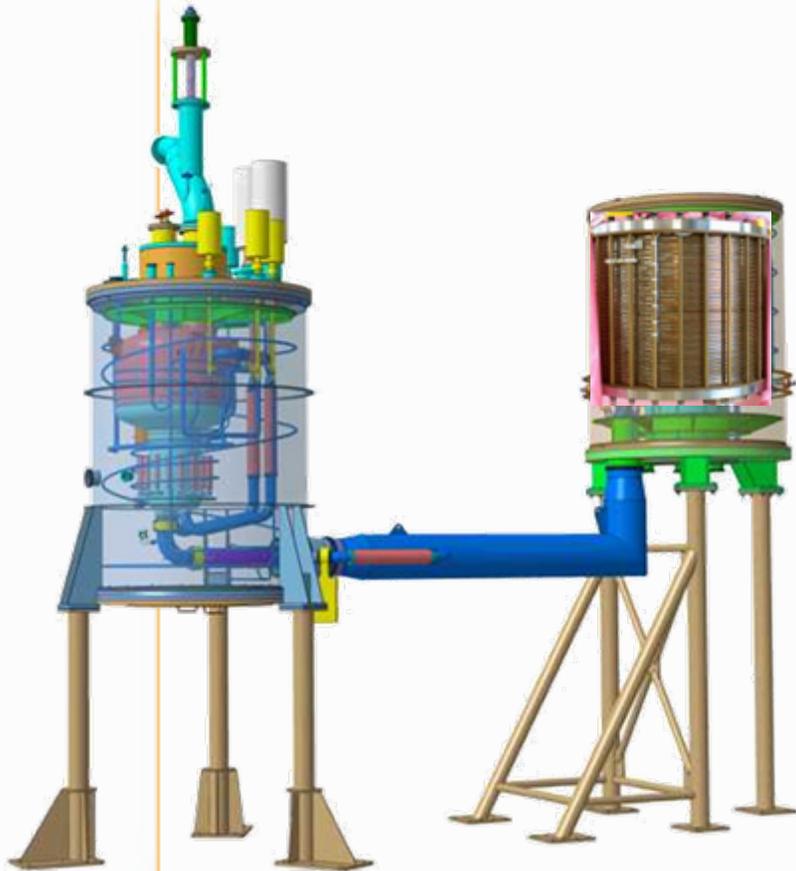
LIGNE de TRANSFERT  
MULTIPLE



## SEHT: plan de développement pour ISEULT

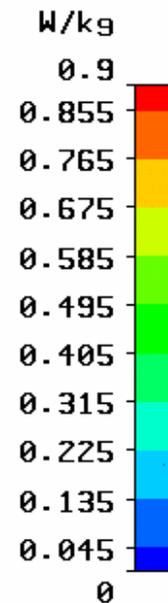
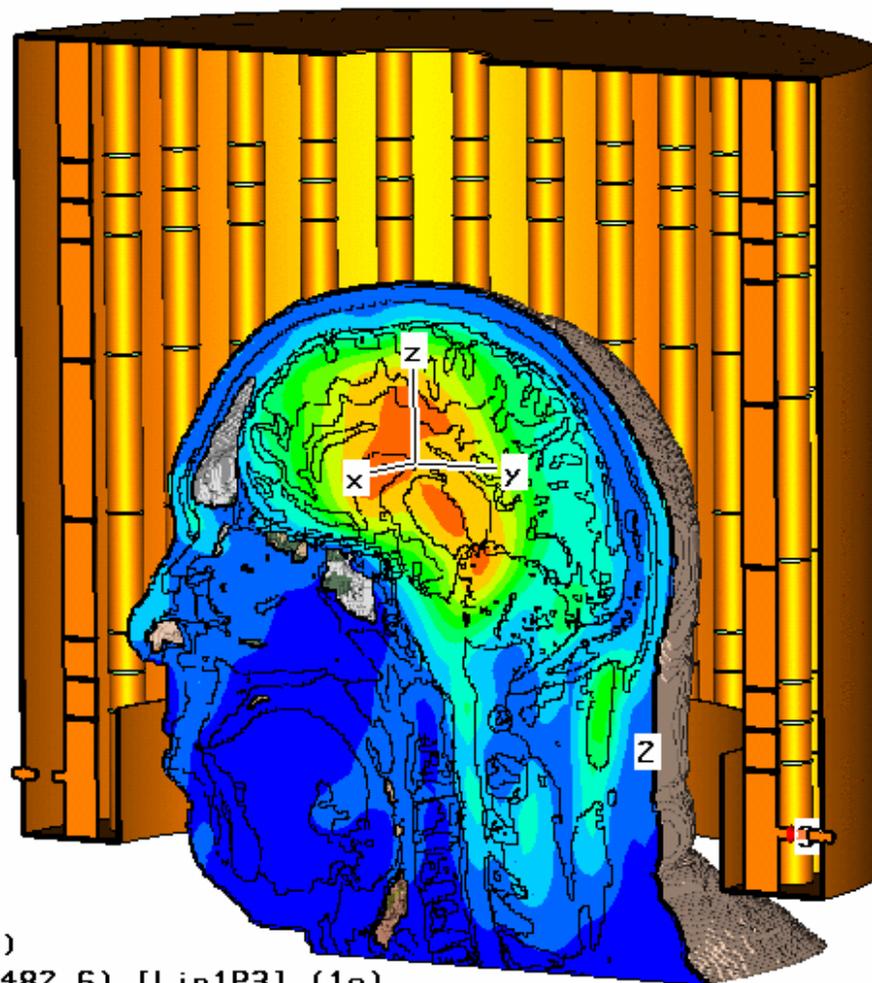
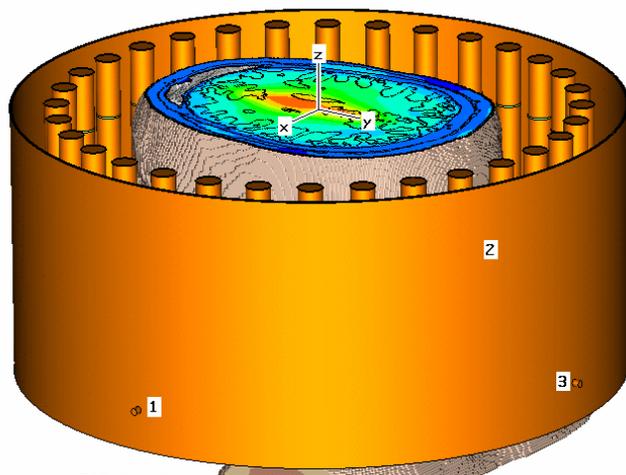
- Récupération d'un aimant 8T d'un diamètre utile de 600 mm
- Etude et réalisation des cryostats aimant, satellite et caloduc
- Connection au réfrigérateur CELLO via une boîte de cryodistribution
- Etude et réalisation du contrôle commande (MCS), du système de protection (MSS), du système d'acquisition lent et rapide associé et de l'alimentation électrique

Budget de 1.3M€ (50% en 2006)  
Début d'installation dans le hall 07/2007  
Station opérationnelle Automne 2007





Clamp to range: (Min: 0/ Max: 0.9)



Type	= SAR (rms)
Monitor	= loss (f=482.6) [Lin1P3] (1g)
Plane at x	= 0
Frequency	= 482.6
Maximum-Zd	= 0.823506 W/kg at -8.52651e-014 / 0 / 16.6915



## Conclusion

La physique des hautes énergies a joué le rôle moteur dans le développement industriel des aimants supraconducteurs

- Les autres domaines de recherche sont : la fusion thermonucléaire contrôlée , la séparation magnétique , les trains à suspension magnétique et surtout les aimants RMN
- La seule application « grand public » de la supraconductivité est constituée par les aimants d'imagerie médicale



## Unit stored energy of SC magnets

