

Cours de Magnétisme

Conception, Simulation, Réalisation et
Mesures

un beau chemin pour les éléments
magnétiques



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, M.A.TORDEUX 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



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 »

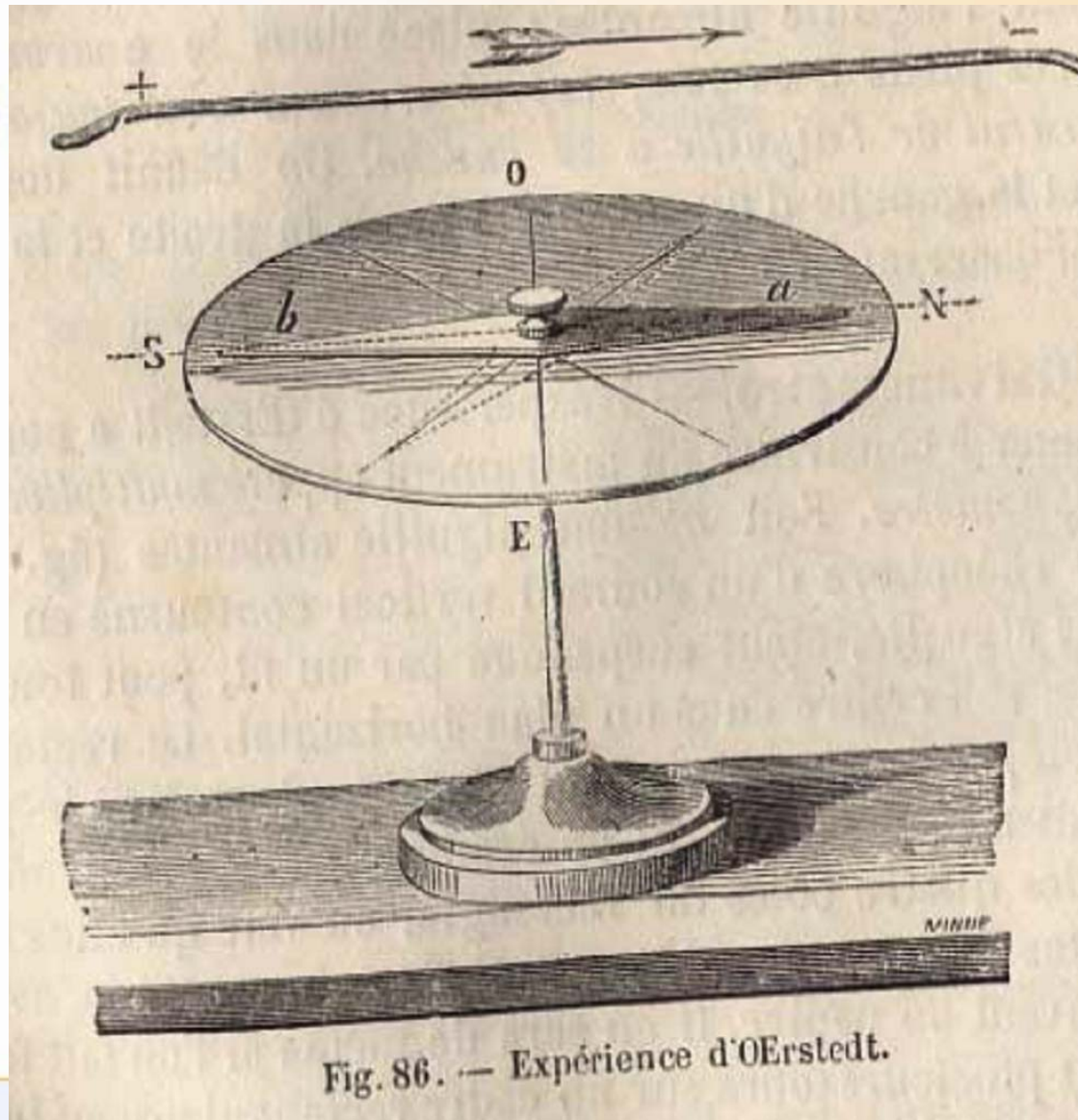


Généralités sur le magnétisme

1. Champ créé par un courant rectiligne: expérience de H.C.Oersted , définition de l' Ampère.
2. Champ créé par une spire circulaire
3. Définition des tubes de flux , équivalence aimants permanents.

Champ du solénoïde: solénoïde mince ,solénoïde épais , efforts magnétiques

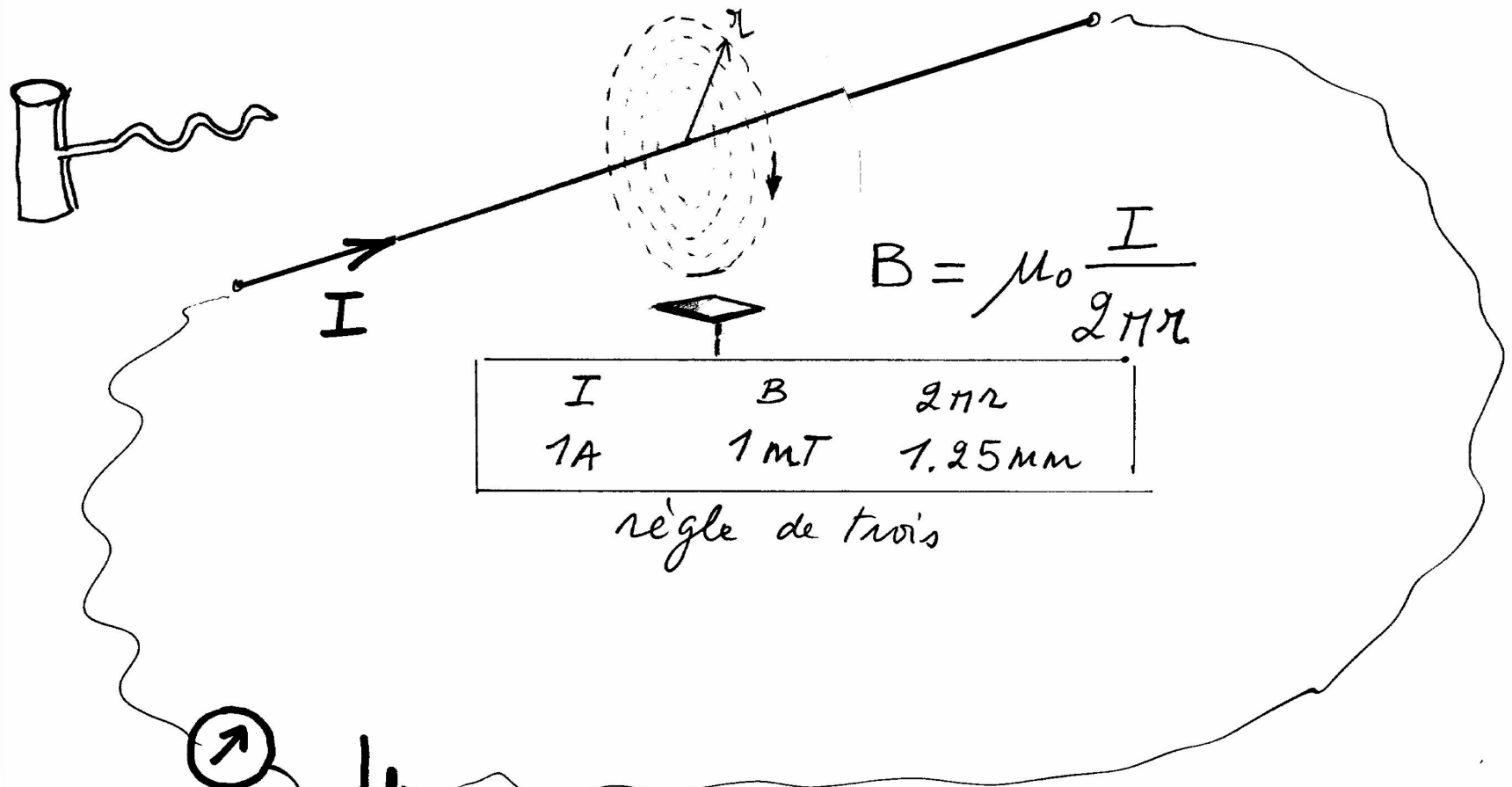
Expérience de J.C.Oersted (1820)



Expérience de H.C. Oersted

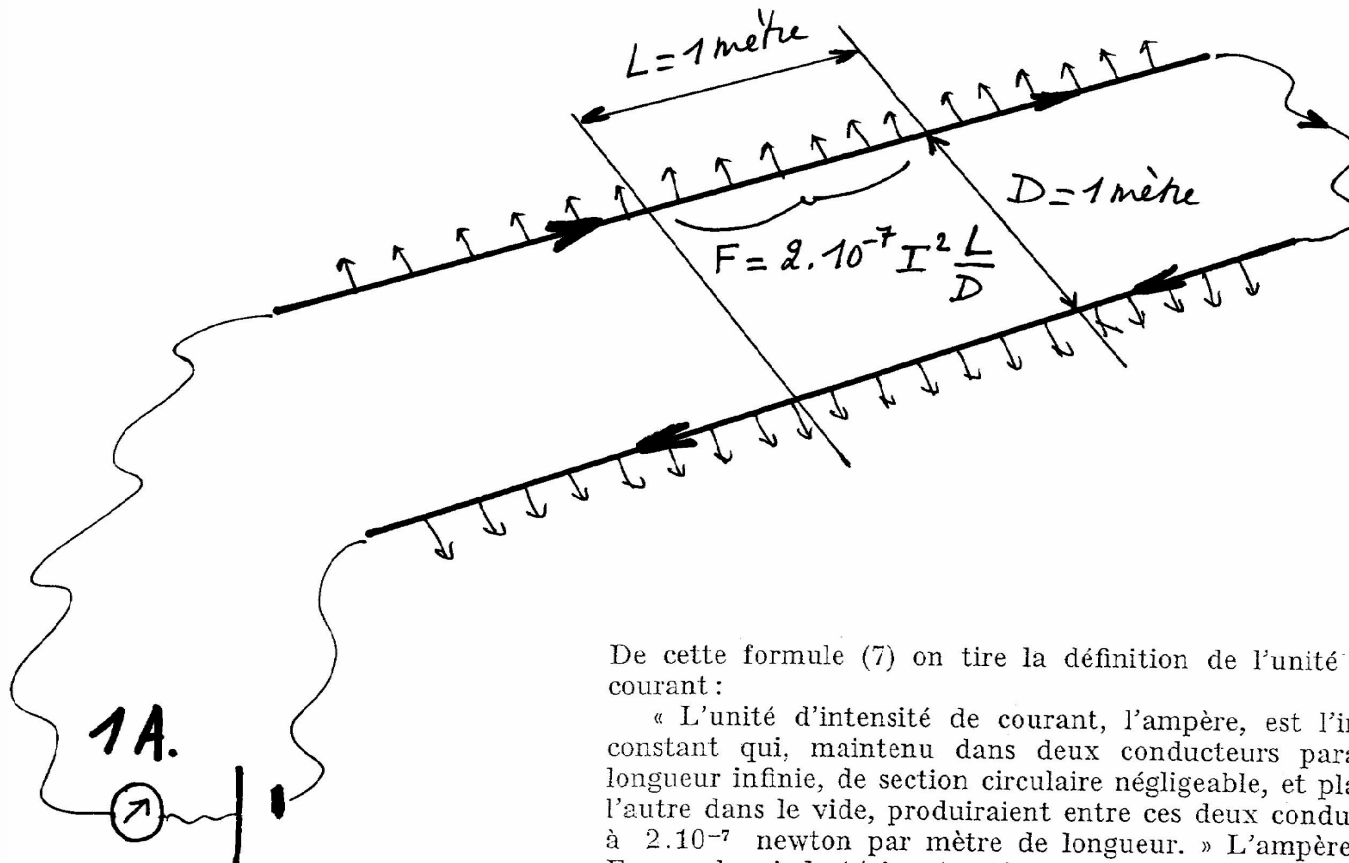
(juillet 1820)

foussole



Expérience de André Marie AMPÈRE

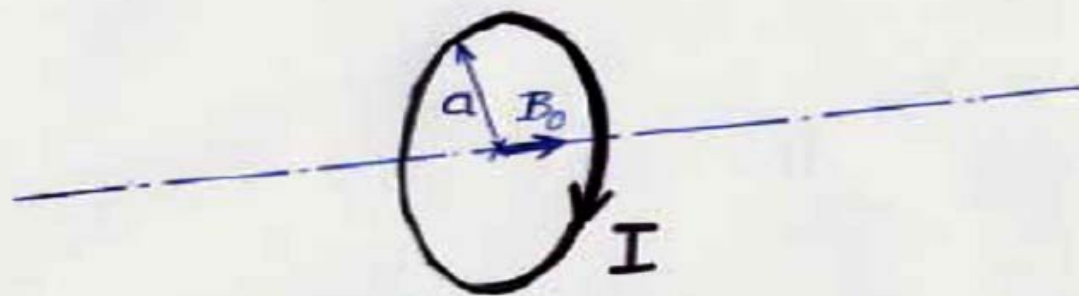
~ 1820



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



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

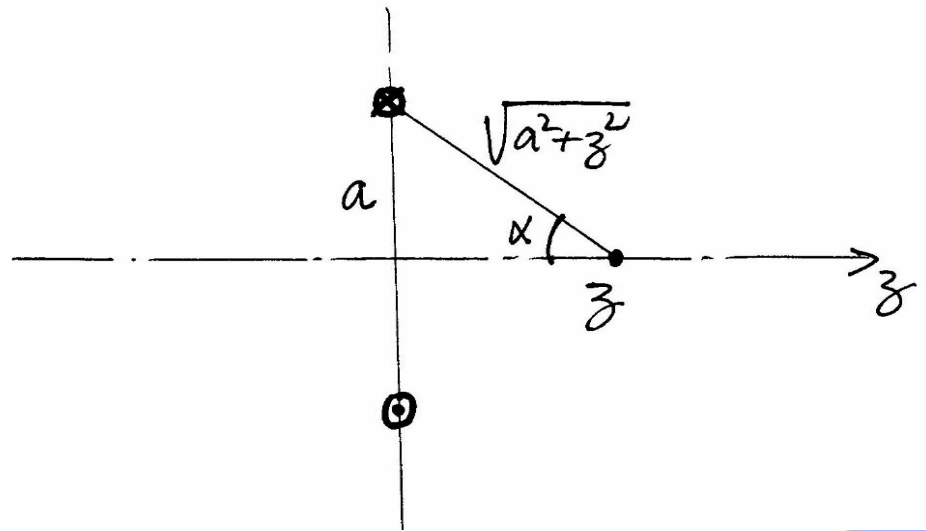
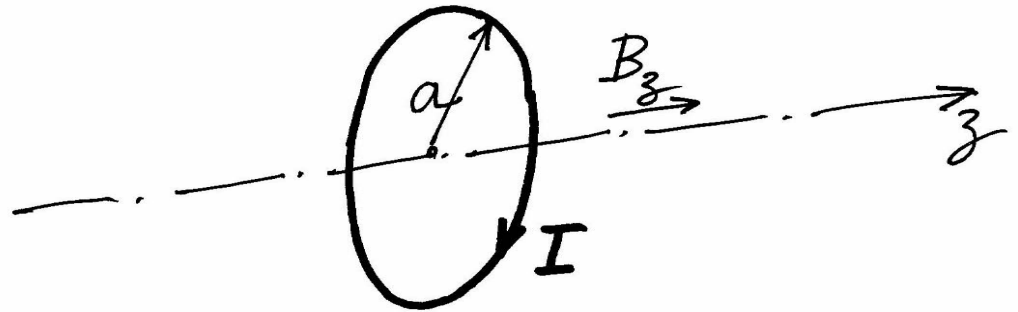
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

diamètre

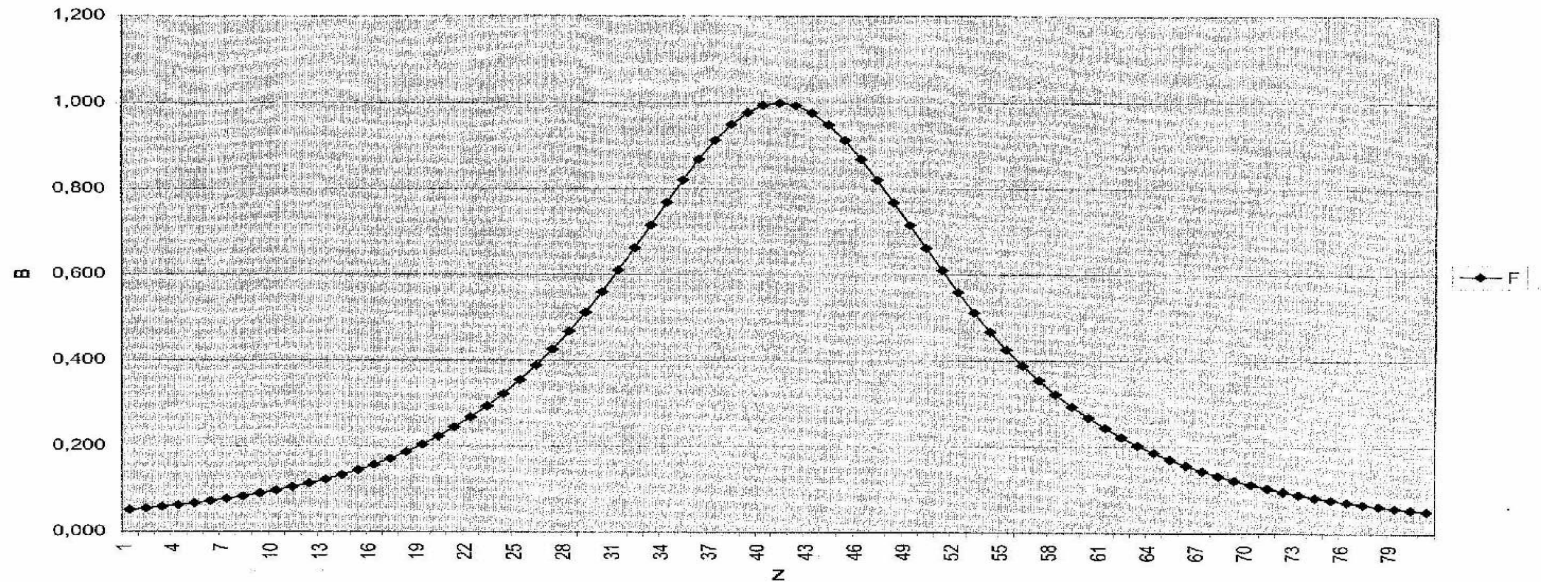
I	B_0	$2a$
1A	1mT	1.25mm

Champ d'une spire circulaire

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



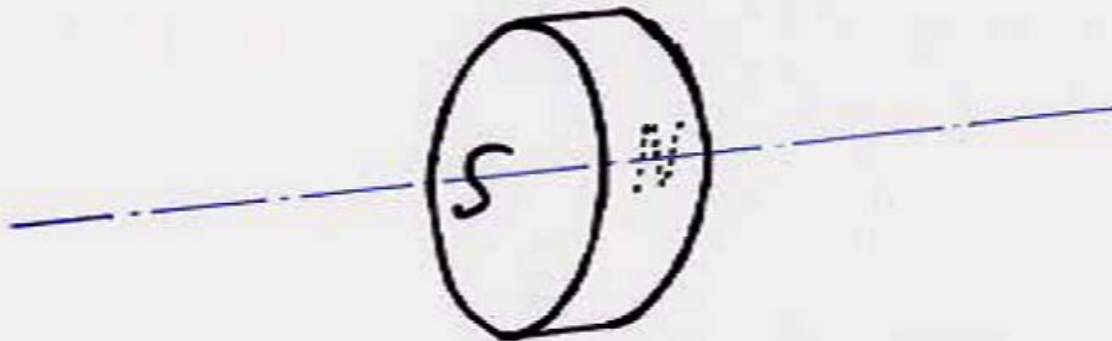
Champ d'une spire circulaire



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

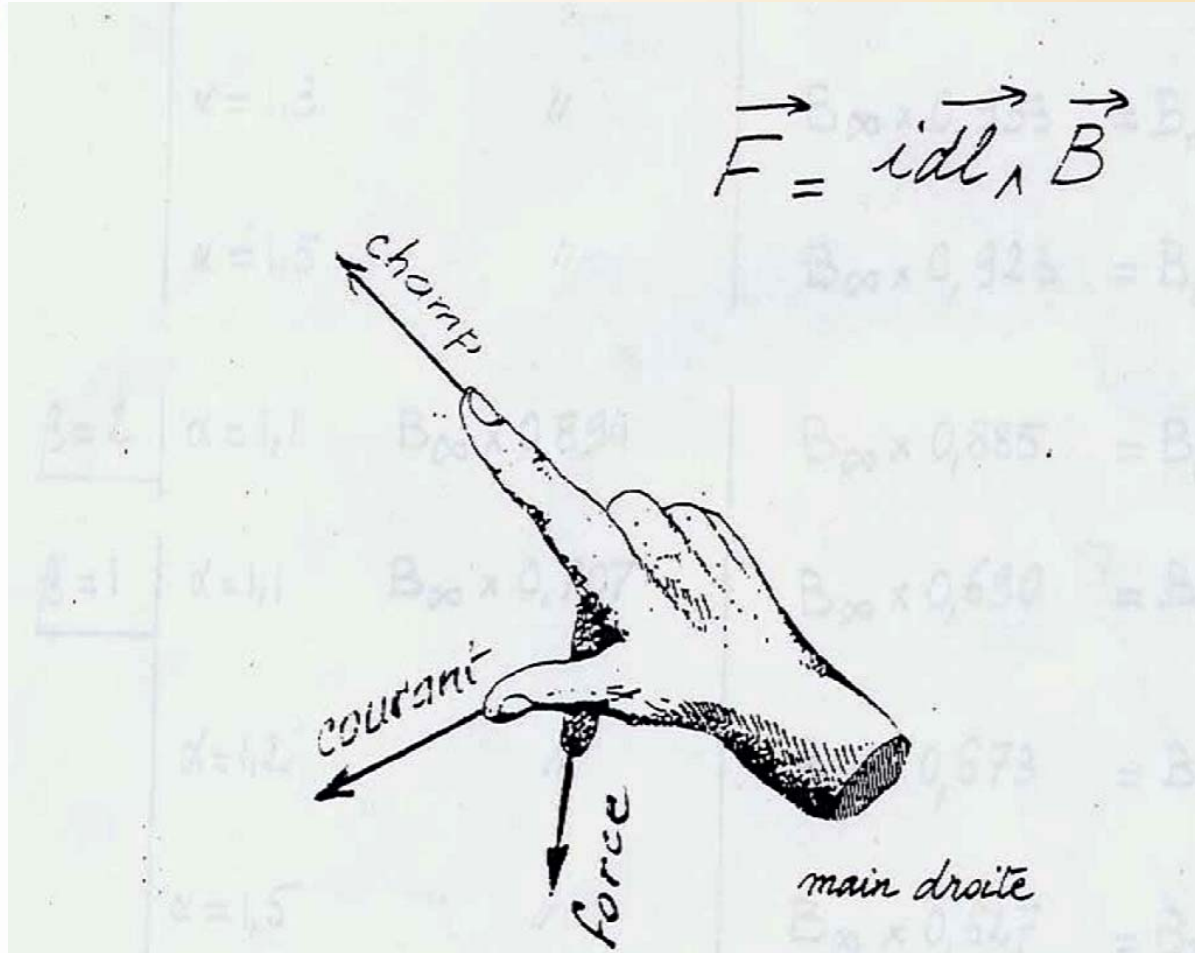


Le flux sort du pôle Nord et va
du Nord au Sud à l'extérieur de l'aimant



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

$$F = BiL$$

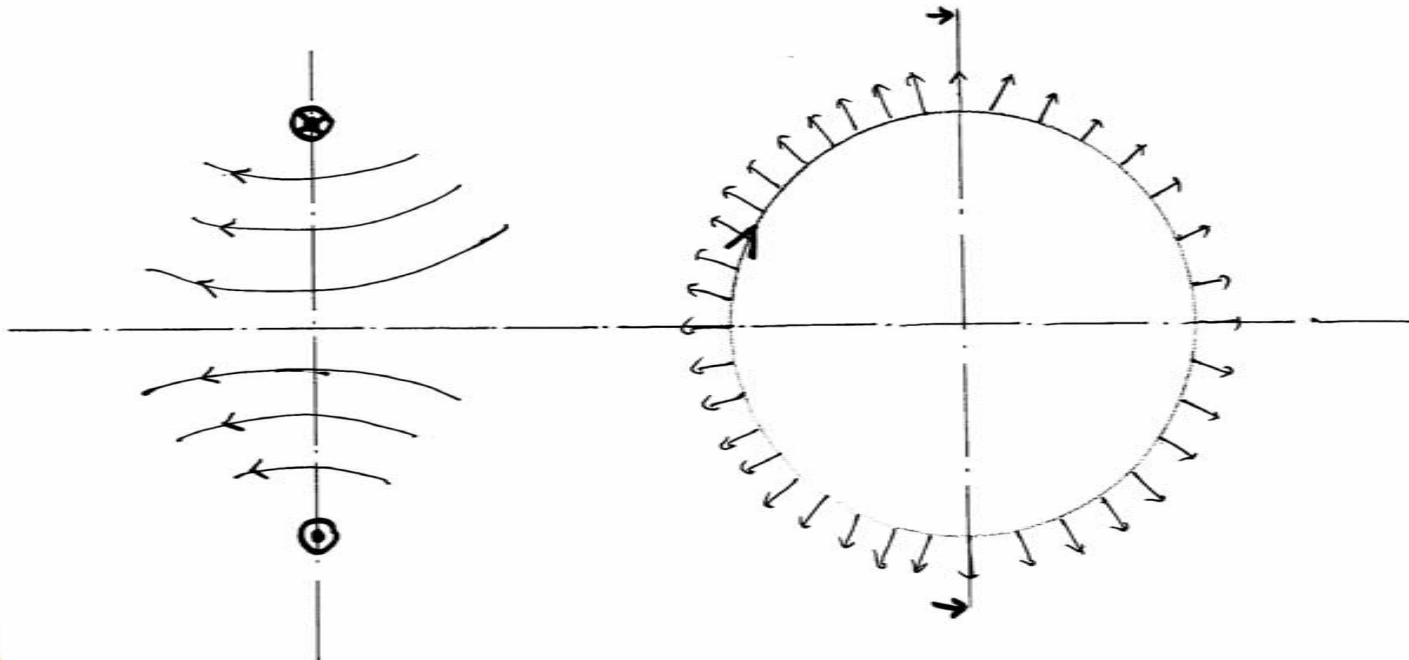


« Hoop stress »

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

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

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

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

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

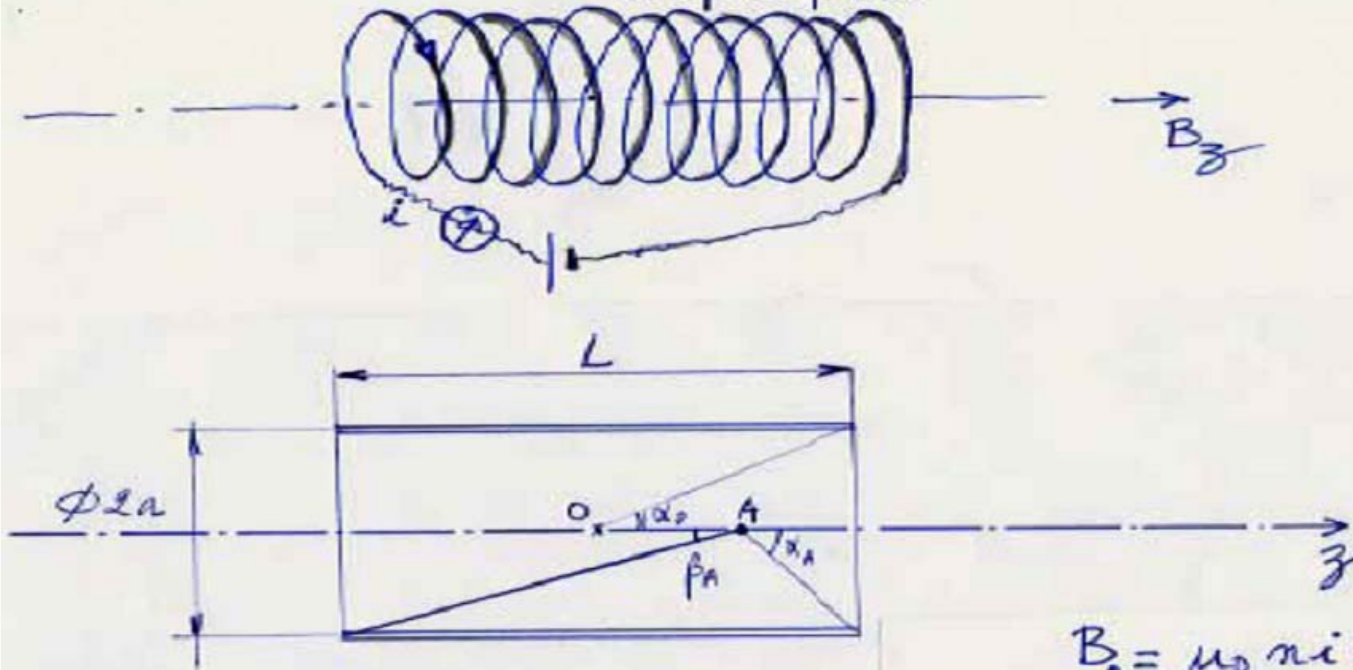
$$\vec{E} = - \operatorname{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

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

Champ du Solénoïde mince

Solénoïde mince de longueur finie

n spires par m



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

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

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

Solenoïde épais

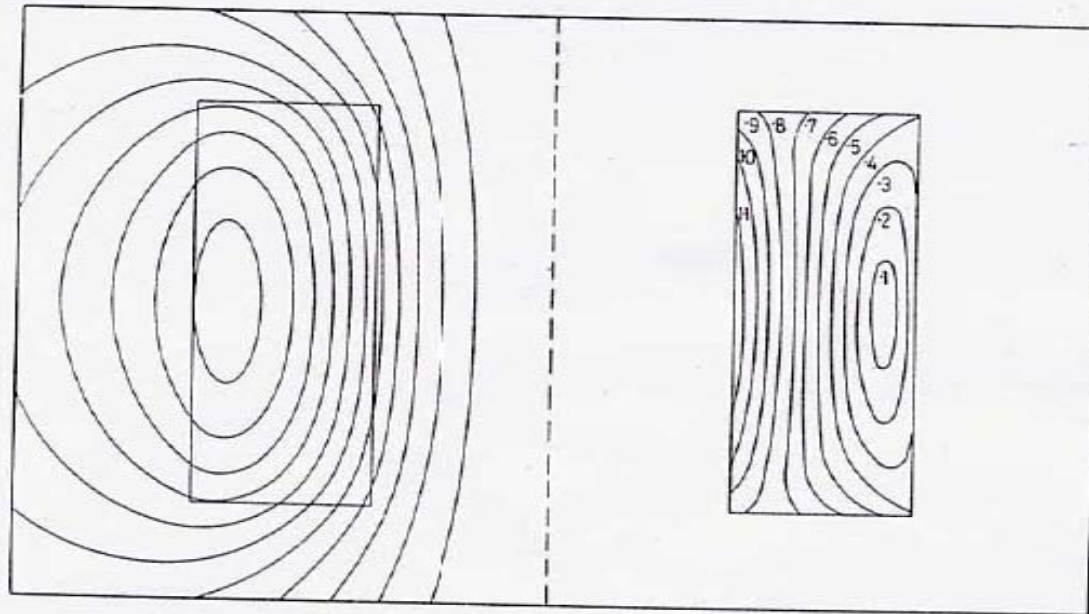


Fig. 3.6. Computer plot of the field in a simple solenoid showing, on the left hand, magnetic lines of force and, on the right hand contours of constant field intensity $[B]$ relative to the central field B_0 (C. W. Trowbridge, Rutherford Laboratory, private communication).

La compréhension des forces est primordiale

42 MAGNETIC FORCES AND STRESSES

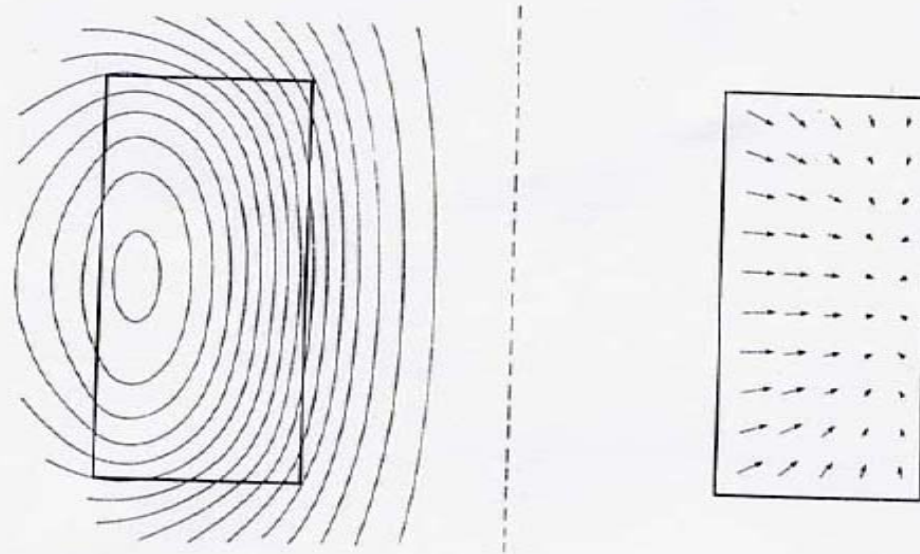
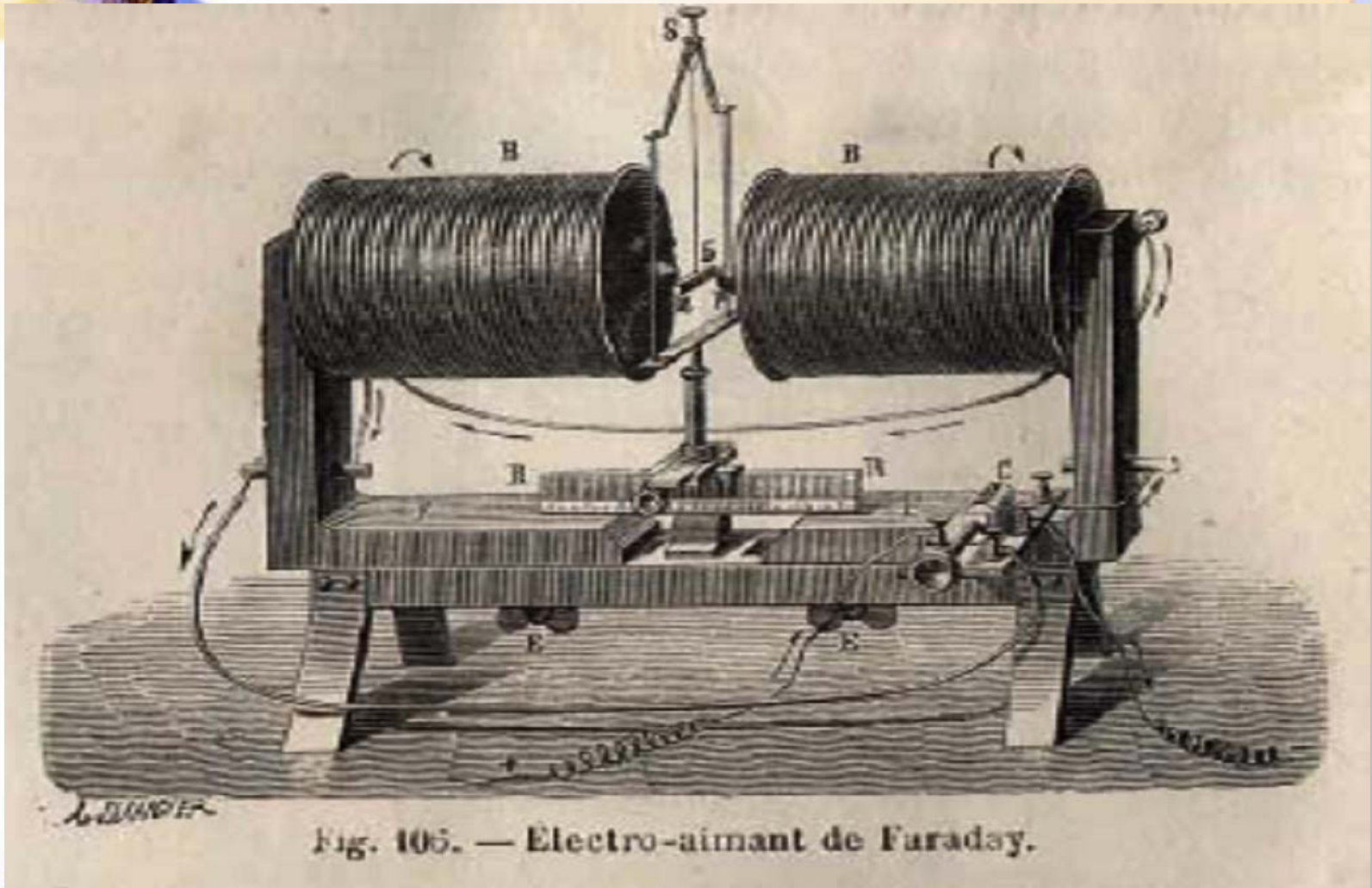


Fig. 4.1. Computer plot for a solenoid showing, on the left-hand side, magnetic lines of force and, on the right, vectors of electromagnetic force per unit volume, represented in amplitude and direction by length and angle of arrows (C. W. Trowbridge, Rutherford Laboratory, private communication).

Circuit magnétique avec fer





Rôle du circuit magnétique

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

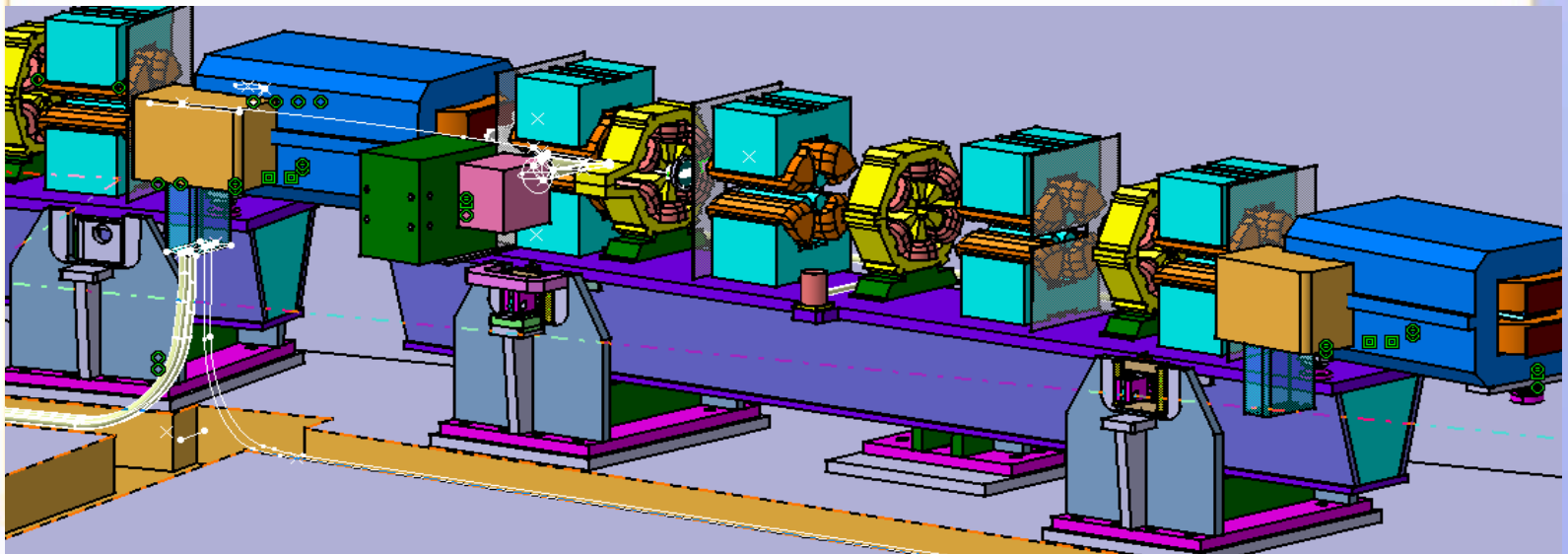


Les différents aimants d' accélérateurs

1. **Électroaimant dipolaire: structure, lignes de flux , aspect technologique.**
2. **Électroaimant quadrupolaire: structure, lignes de flux , aspect technologique.**
3. **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 ²	0.74 T	11 T/m	16 T/m ²
Length(mm)	1052	320 ou 460	160	2160	400	150





Electroaimant dipolaire

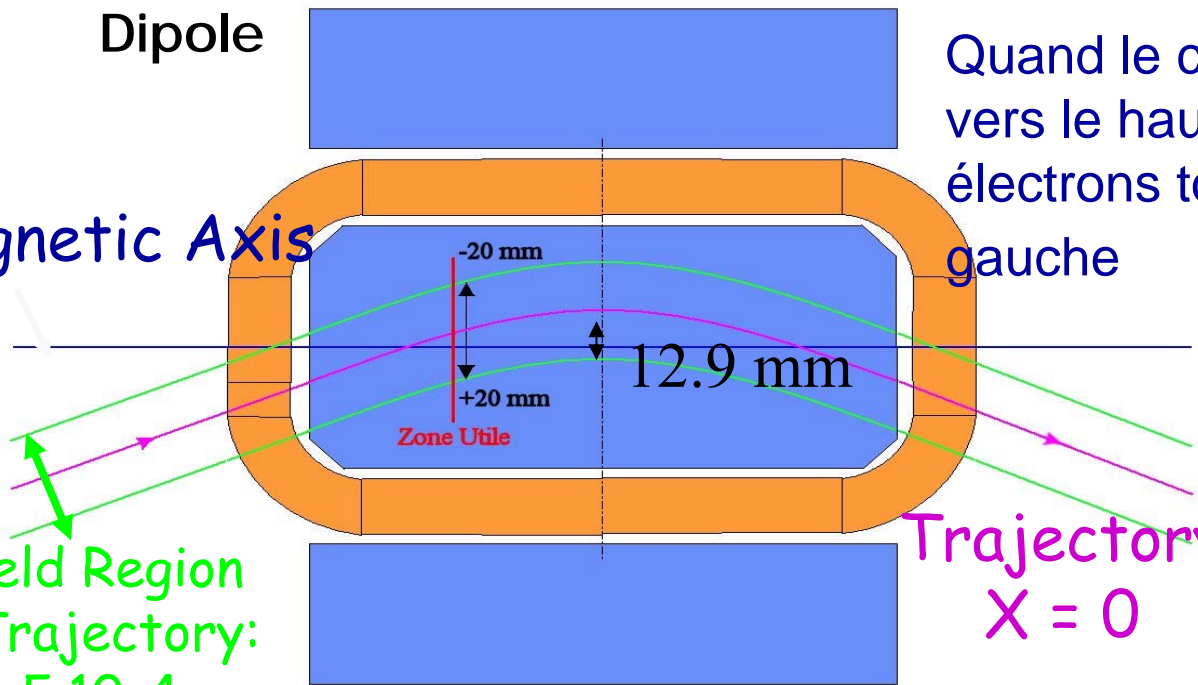
- 1. Structures
- 2. Lignes de flux
- 3. Aspect technologique



Dipole

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

Magnetic Axis



Trajectory
 $X = 0$

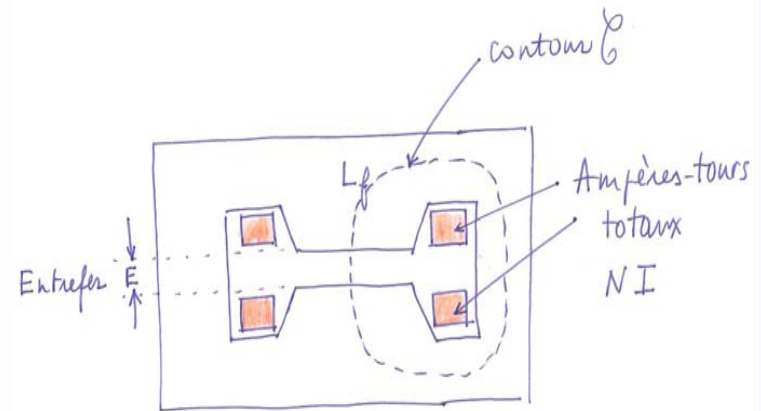
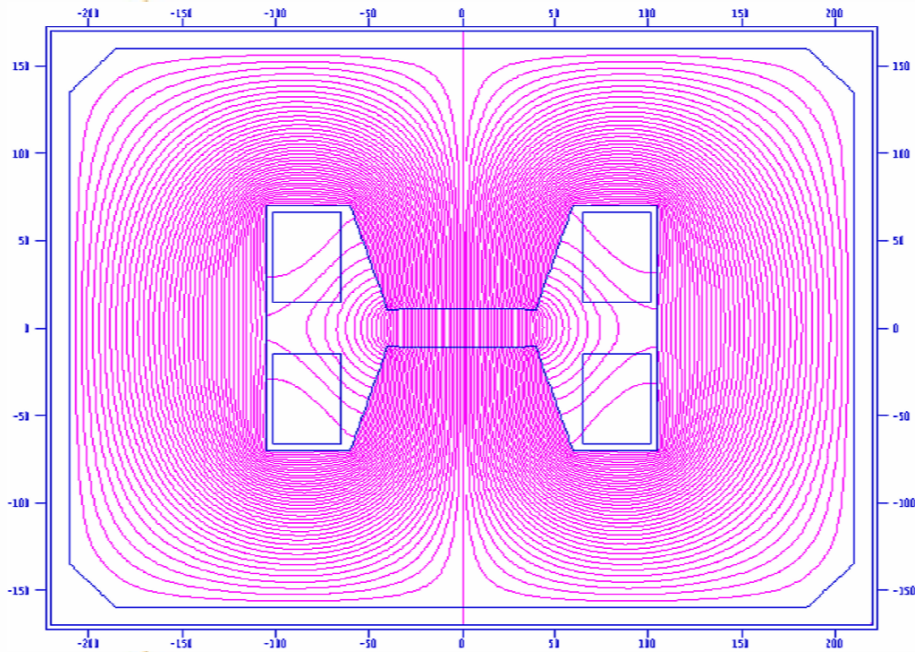
Good Field Region
around Trajectory:
 $DB/B < 5.10^{-4}$

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'Amperè :

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

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

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

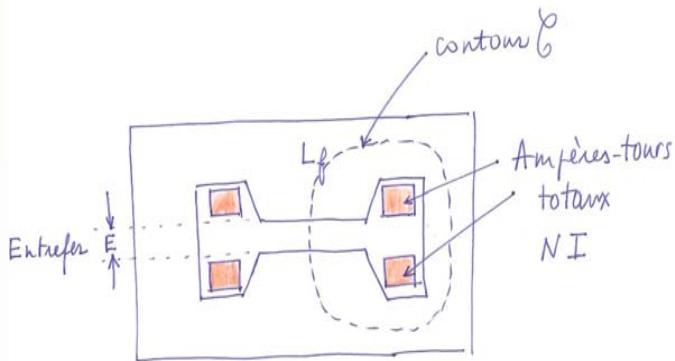
$\mu_2 \# 500$

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

1 A

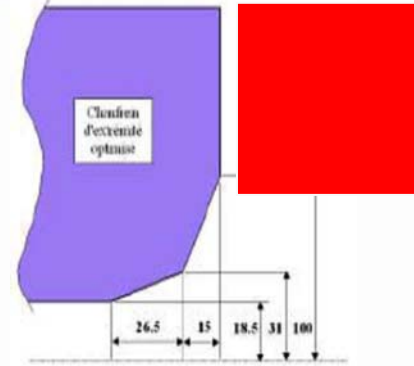
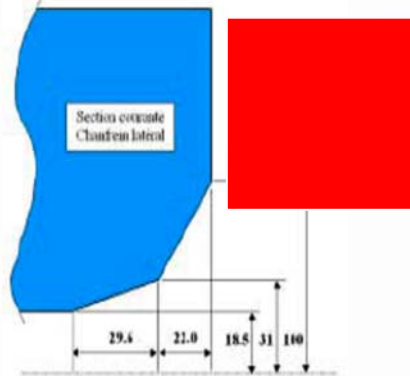
1 mT

1.25 mm





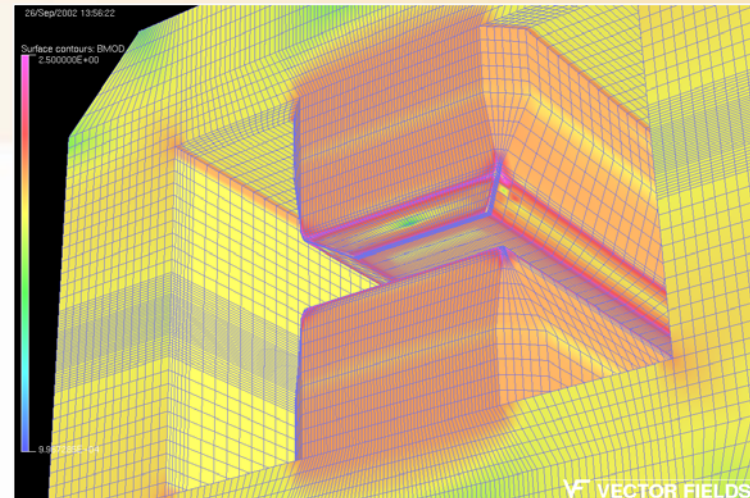
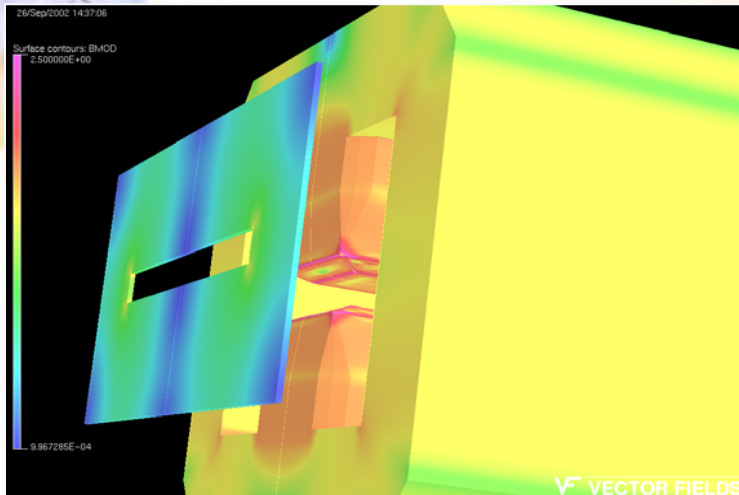
Le chanfrein latéral et le chanfrein d'extrémité



Le chanfrein latéral est utilisé pour limiter la saturation.

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

Conception magnétique des dipôles

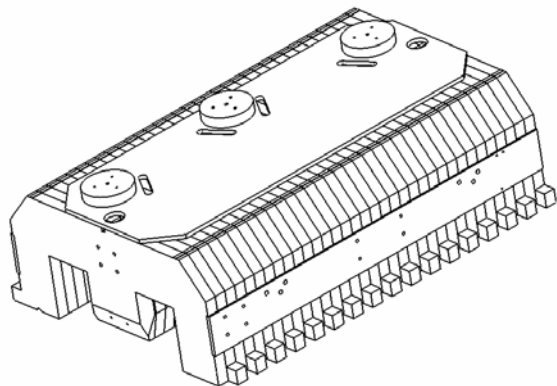


Le logiciel utilisé dans cet exemple pour calculer le champ magnétique est « TOSCA3D » de la Société VectorFields.

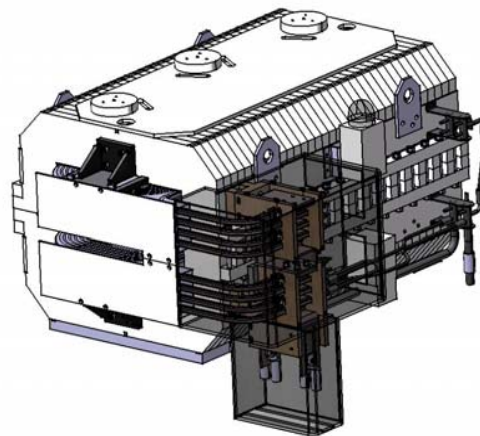
La structure en « H » permet de limiter la saturation et de produire un champ symétrique.

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

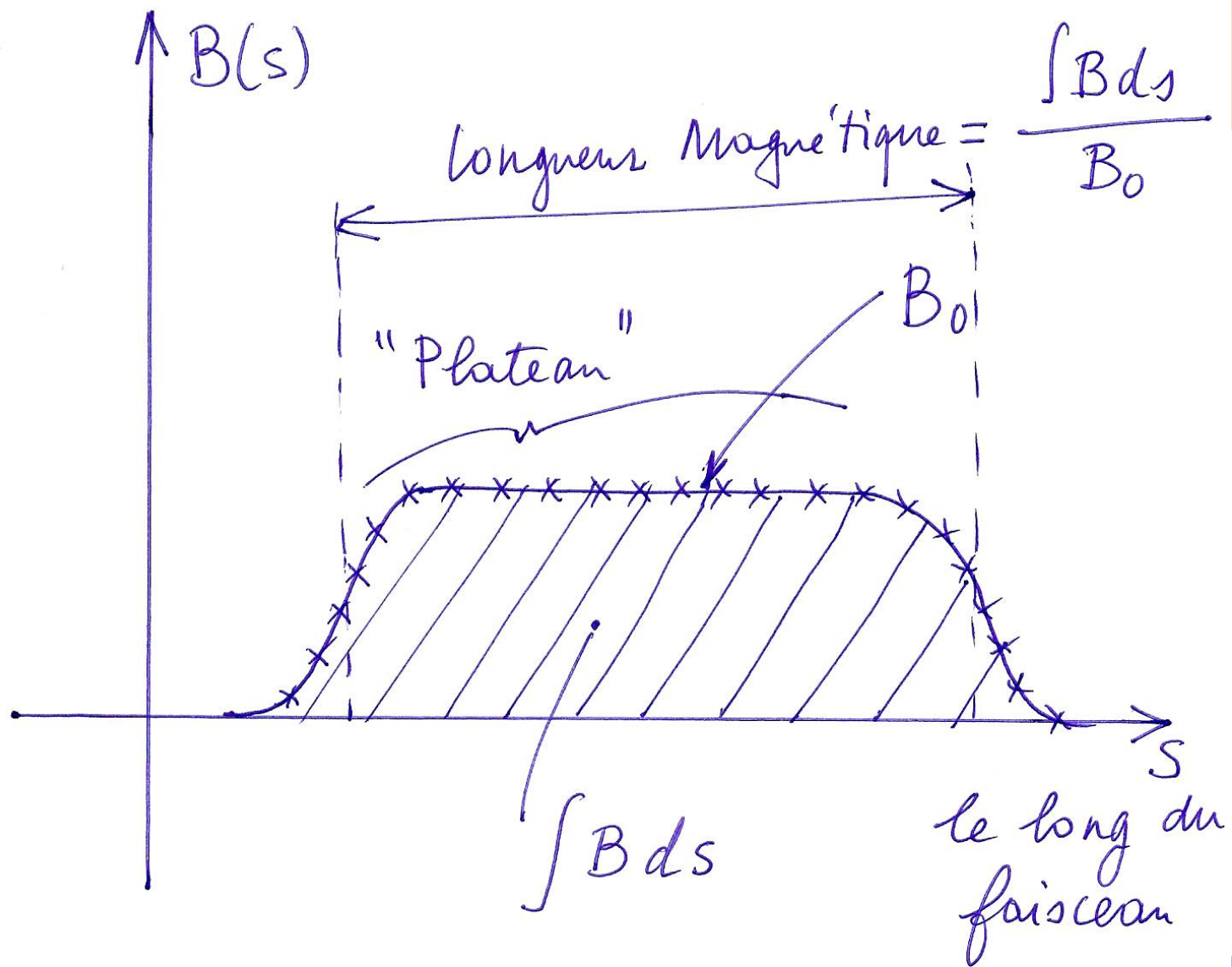


Spécifications des bobines

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





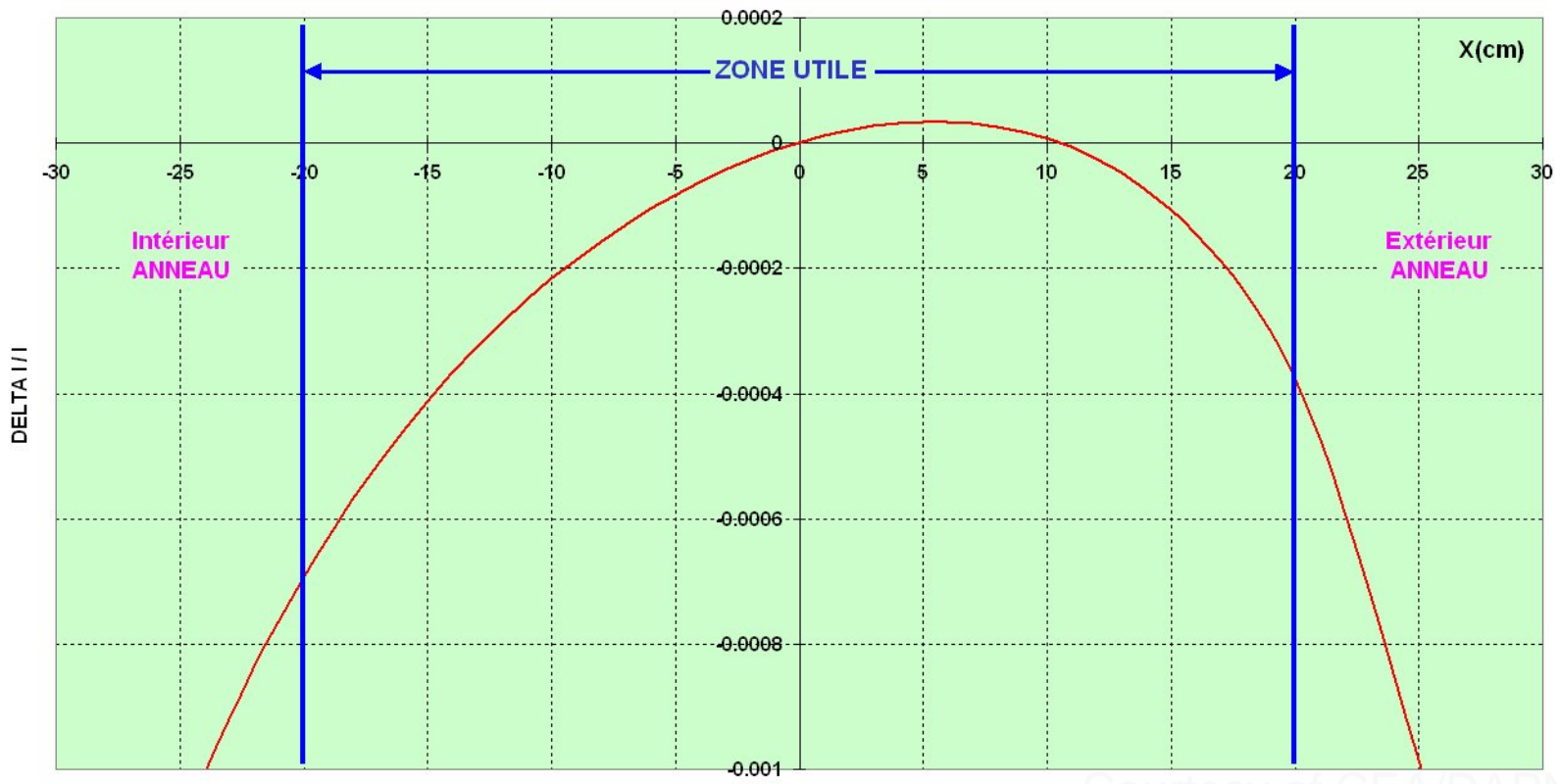


Définition de la longueur magnétique

- 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 - B₀=17131 Gauss



Courtesy of CEVDAP/INIA



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.**



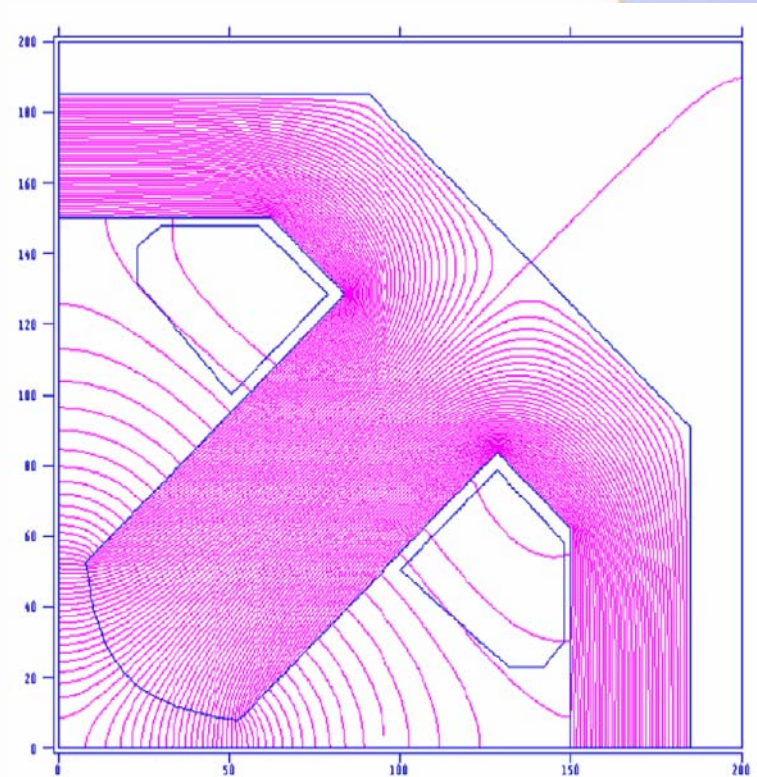
Structure du Quadrupole

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 quadropole

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 pôles 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 quadrupôle le premier défaut a une variation en x^5 , c' est un dodécapôle
- 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

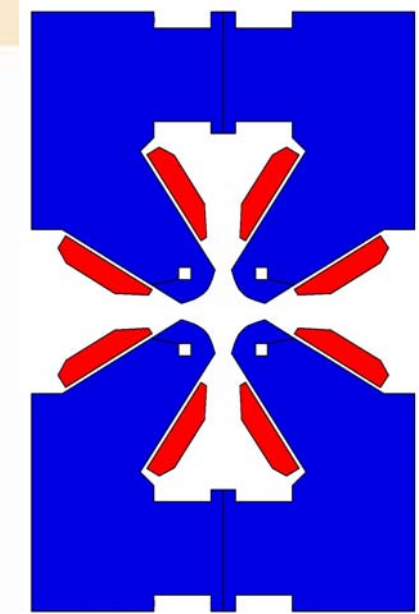


Soleil a deux types de quadrupoles:

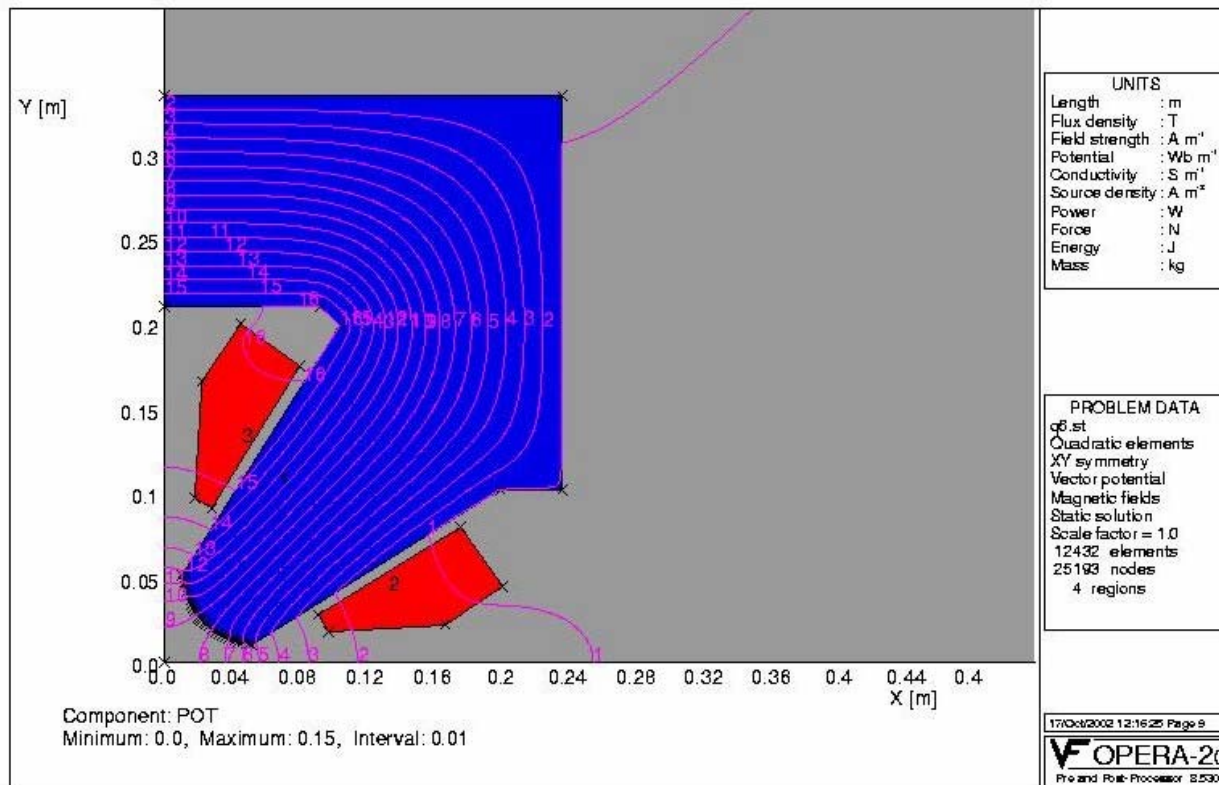
- 128 quadrupoles courts (19T/m)
- 32 quadrupoles longs (23T/m)

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.

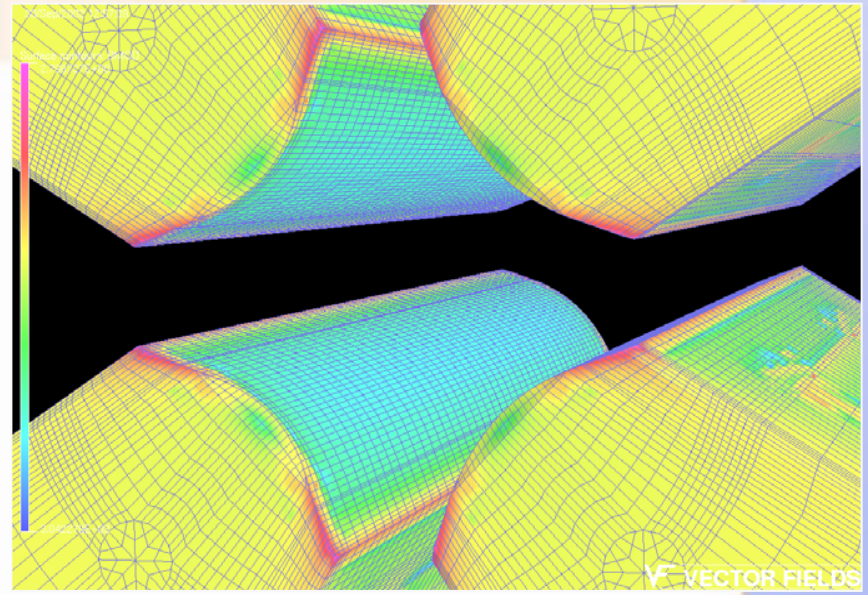
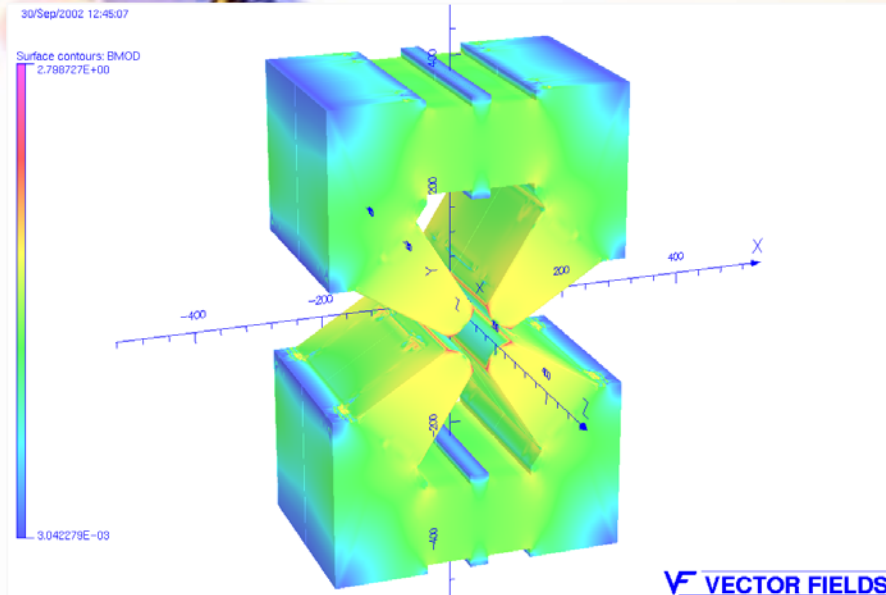


Quadrupole Magnetic Design



Les dimensions de la culasse ont été optimisés pour un gradient
 $G = 23\text{T/m}$

Conception Magnétique du Quadrupole



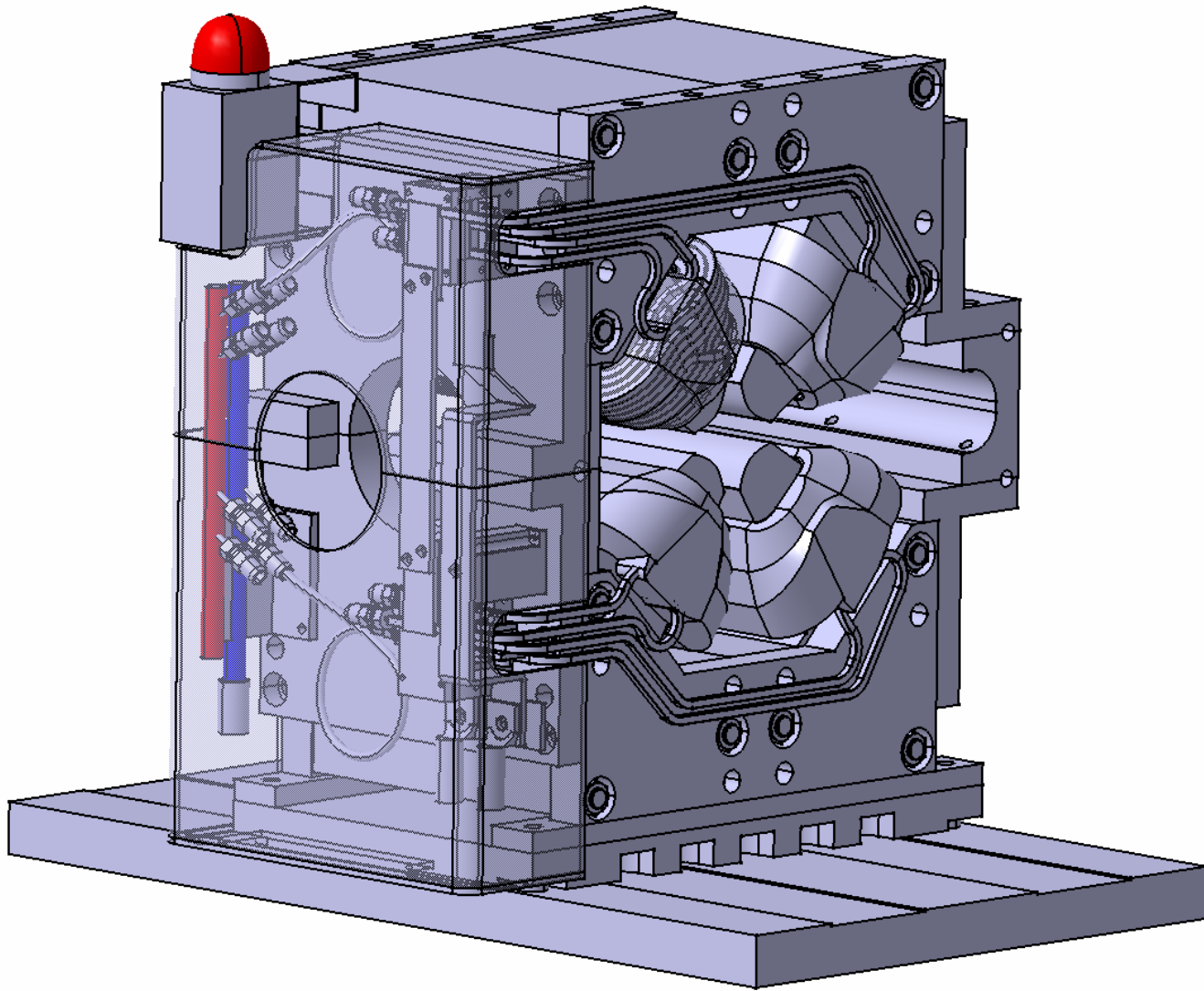
Courtesy of CEA/DAPNIA

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 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



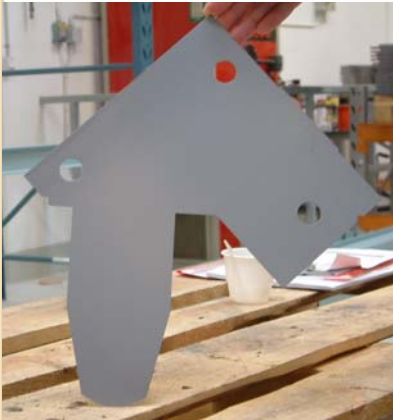
1



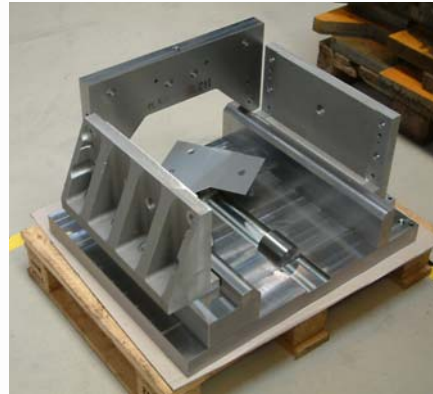
2



3



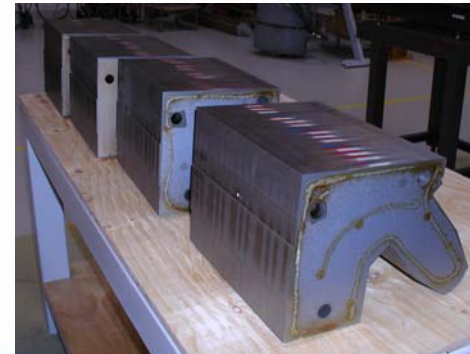
4



5



6



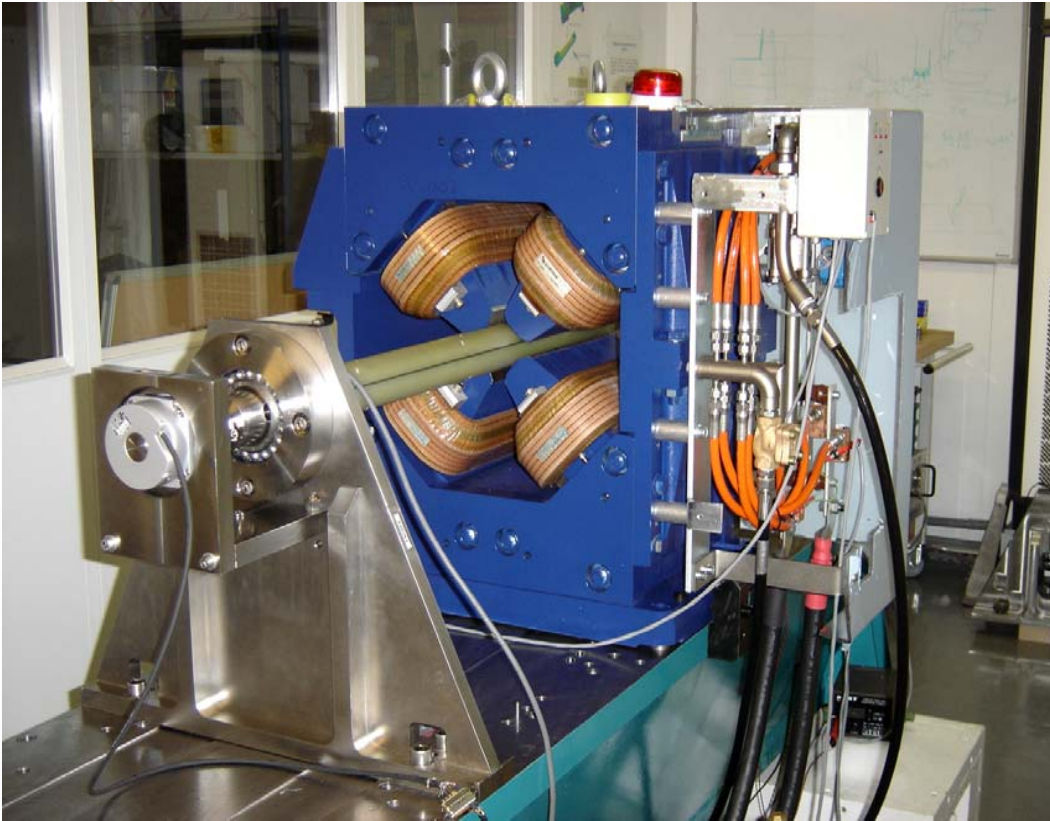
Photos of Quadrupole production:
 Mould(1) Coil(2) Lamination(3)
 Tooling(4&5) Yoke Quarter(6)

Courtesy of DANFYSIK



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

BMS description:dedicated harmonic bench « Banc Multipolaire Soleil »

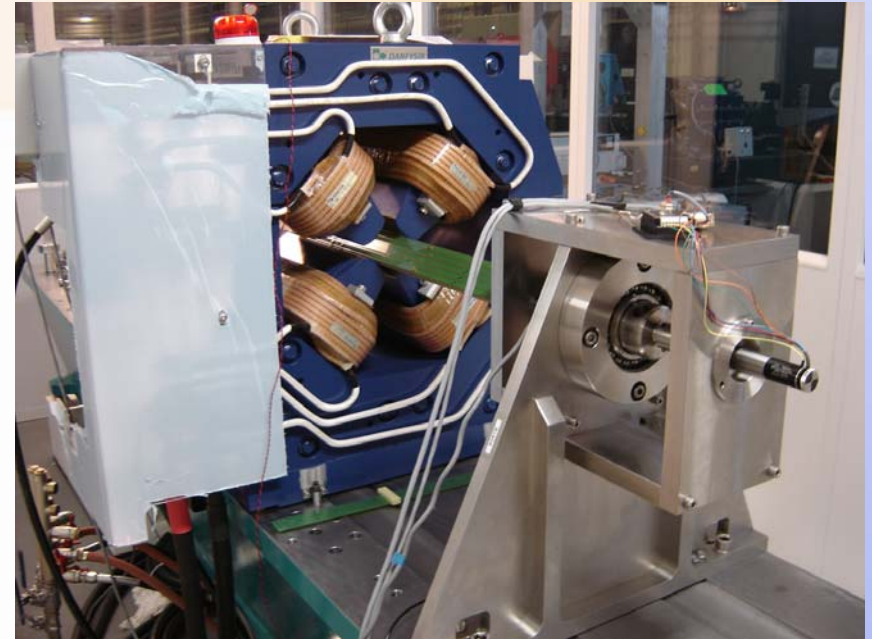
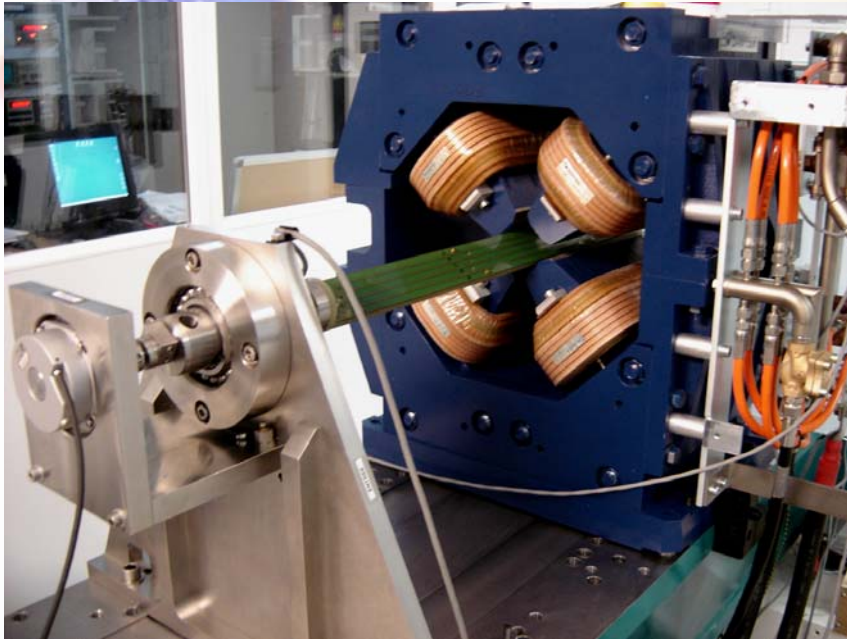


Le BMS est basé sur une poutre anneau avec les mêmes interfaces mécaniques , électriques et hydrauliques.

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

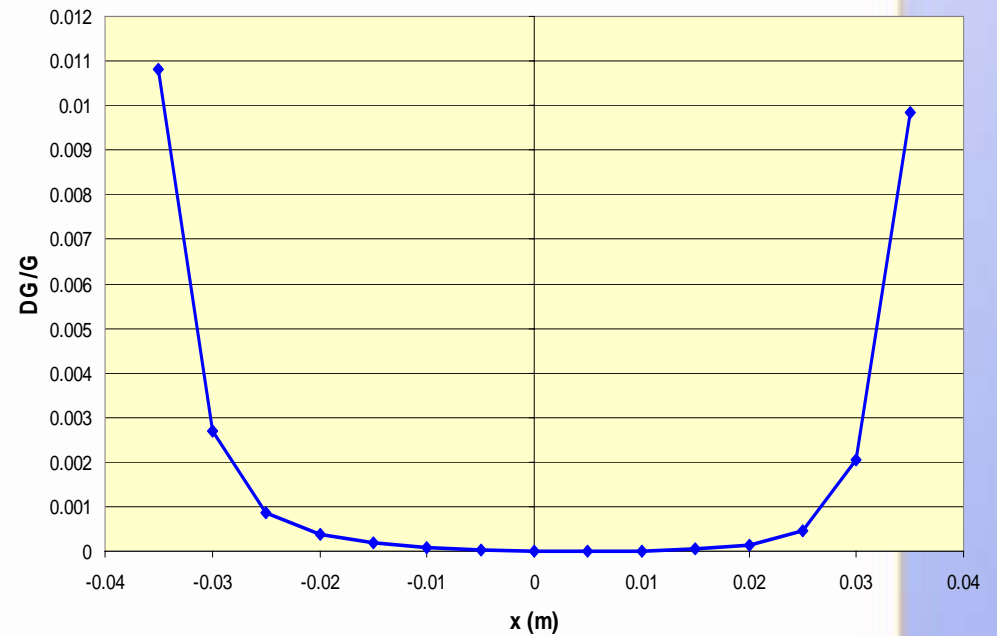
Angular measurement: Heidenhain encoder 720000 steps/tour with absolute index

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.

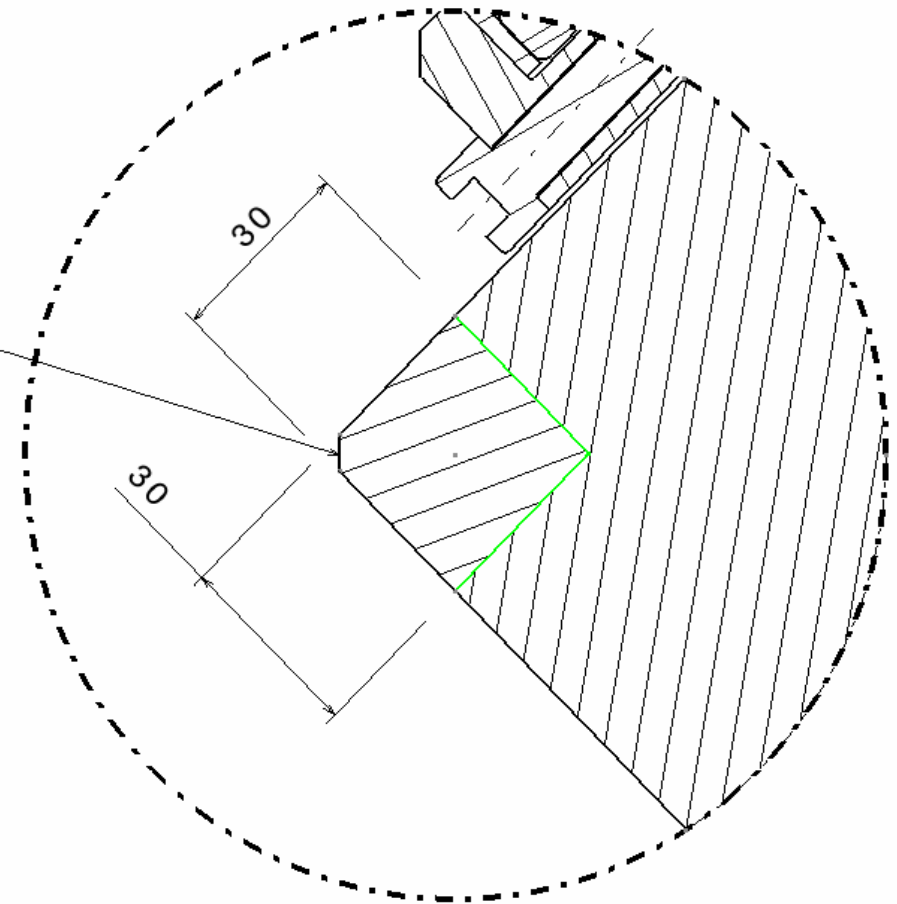


After R=0.032 m the curve is extrapolated

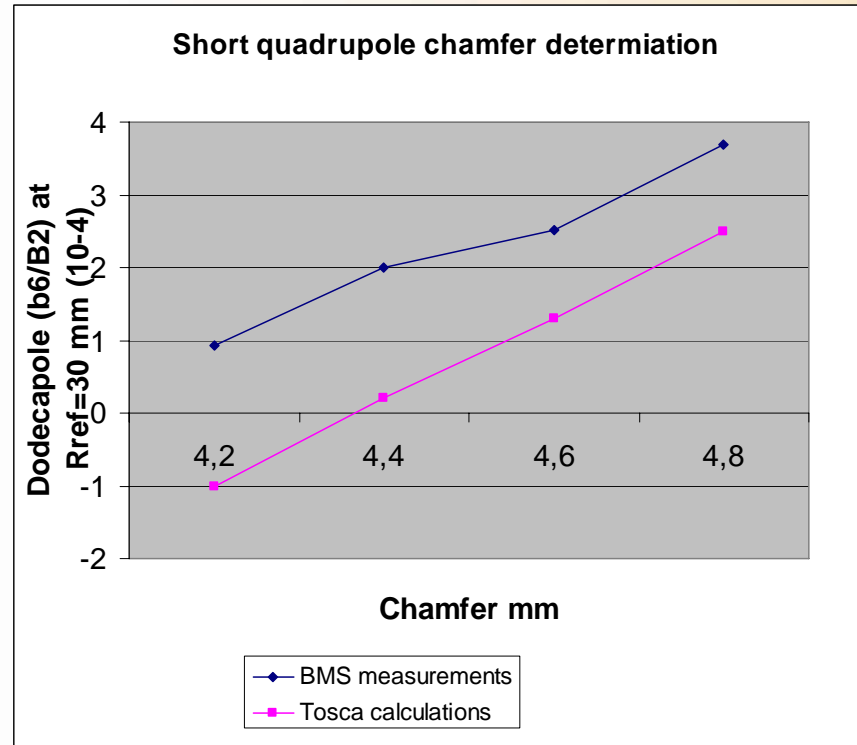
Optimisation du chanfrein d'extrémité

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



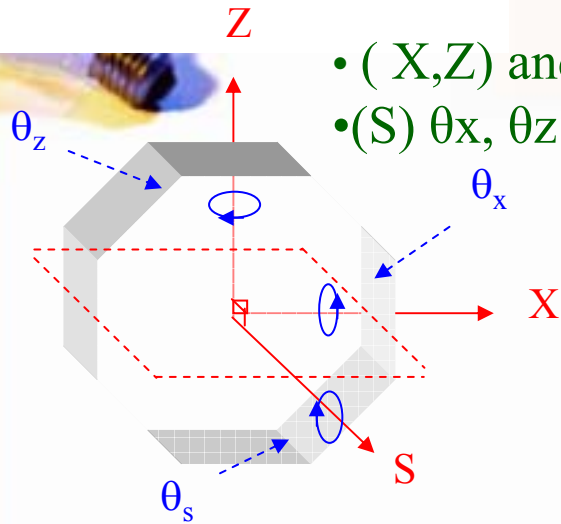
- A set of different chamfers has been tested
- Both short prototype Quadrupole **QC** & long prototype Quadrupole **QL** have been measured on BMS
- 12 pole component behaviour is plotted
- Final chamfers have been fixed for series production

Qu' avons nous appris en mesurant les Quadrupoles ?

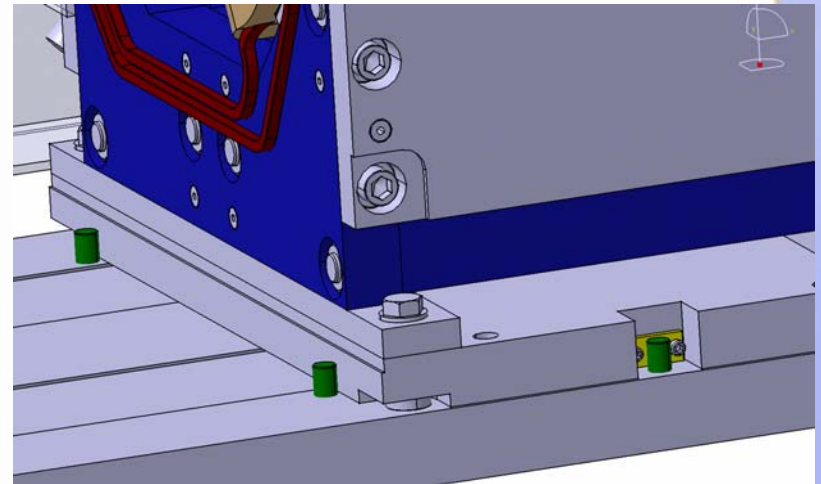
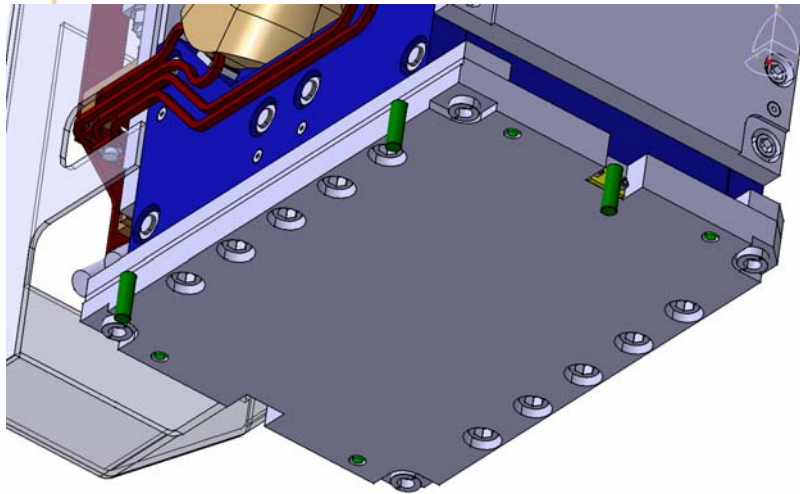


- La précision relative de la connaissance du champ magnétique est remarquable.
- La compréhension des erreurs systématiques et les méthodes de mesure développées depuis 3 décennies permettent d'améliorer la précision sur les harmoniques et de réaliser un gradient quasi constant;
- La recherche du centre 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 θ_s are adjusted by 4 washers and 1 lateral shim
- (S) θ_x , θ_z are given mechanically by construction.





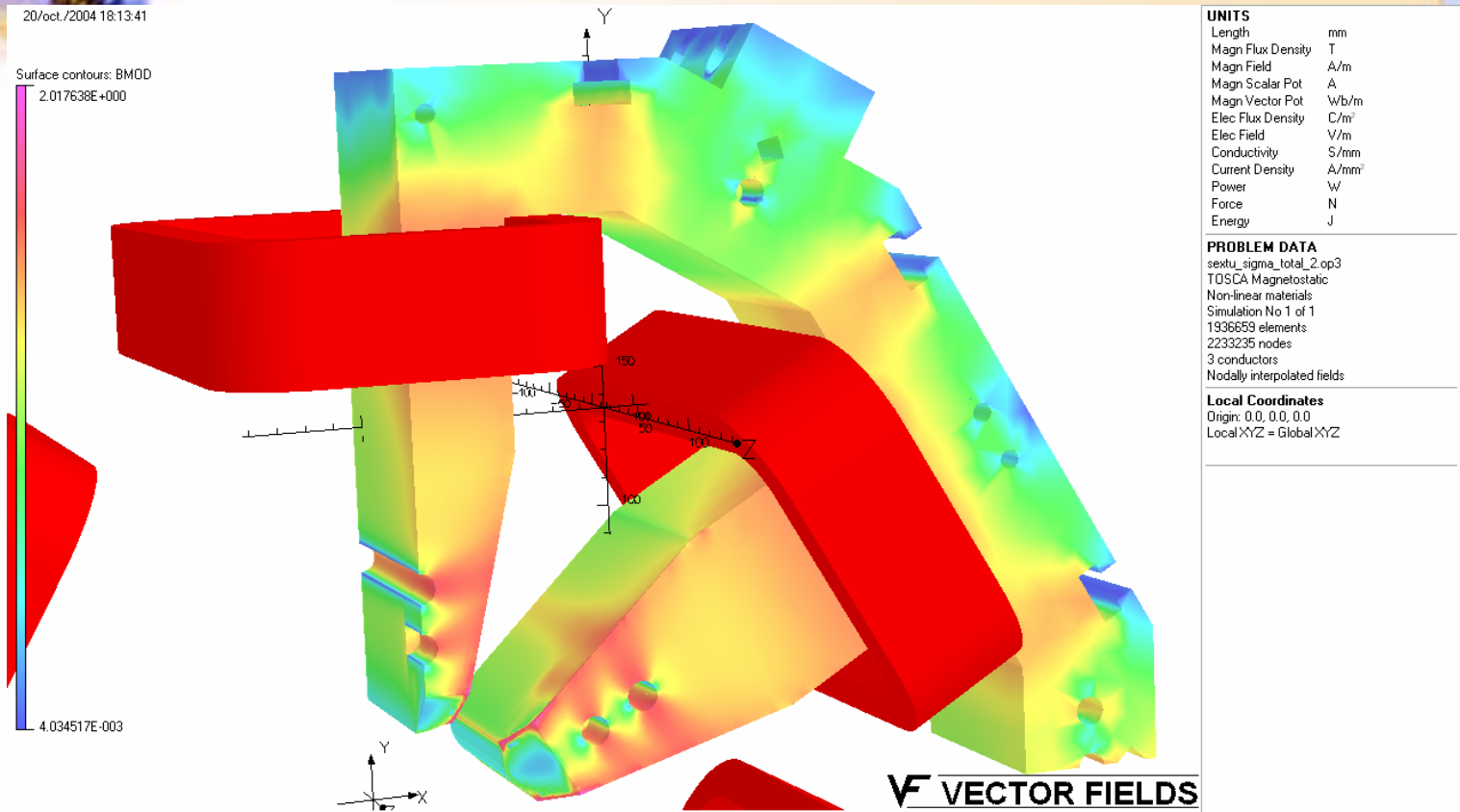
- Electroaimant sextupolaire
- 1. Structure
- 2. Lignes de flux
- 3. Aspect technologique

- 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 acceptation 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

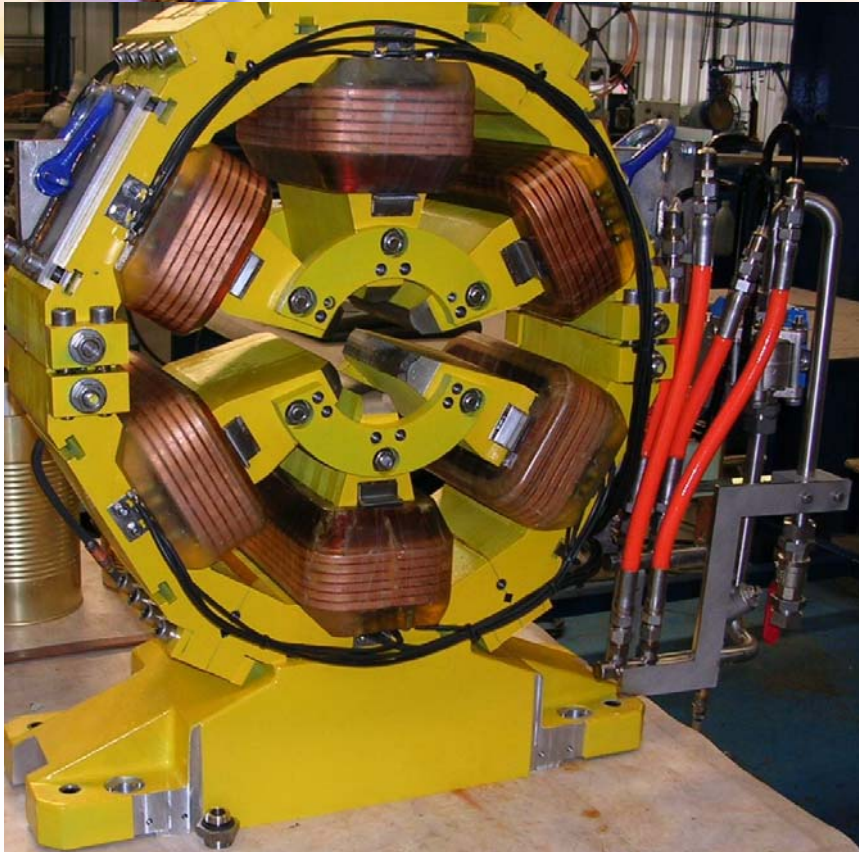
- 320 T/m²
- Longueur magnétique de 160 mm
- Soit un champ B_2 à 32 mm de :
$$320 * 0,16 * 0,032 * 0,032 = 52,4 \text{ mT.m}$$
- Correcteurs
 - B_x : 5,5 mT.m (0.6 mrad)
 - B_z : 7,6 mT.m (0.8 mrad)
 - Q_t : 2,0 mT.m à 32 mm ($G_x = 0,39 \text{ T/m}$)

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

Courtesy of SIGMAPHI

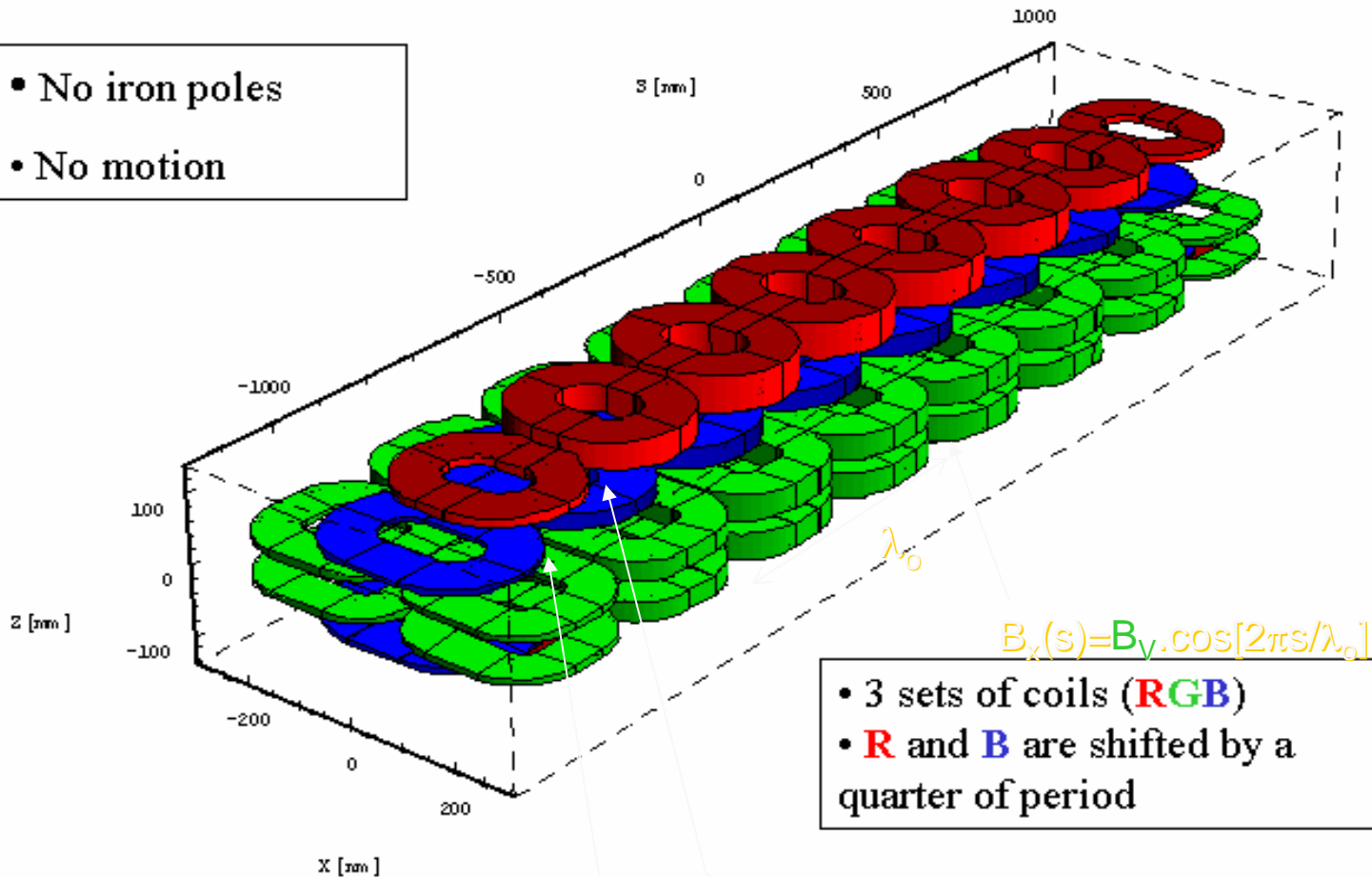
Tableau des Caracteristiques des onduleurs SOLEIL phase 1



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

HU640 principe de création du champ

- No iron poles
- No motion



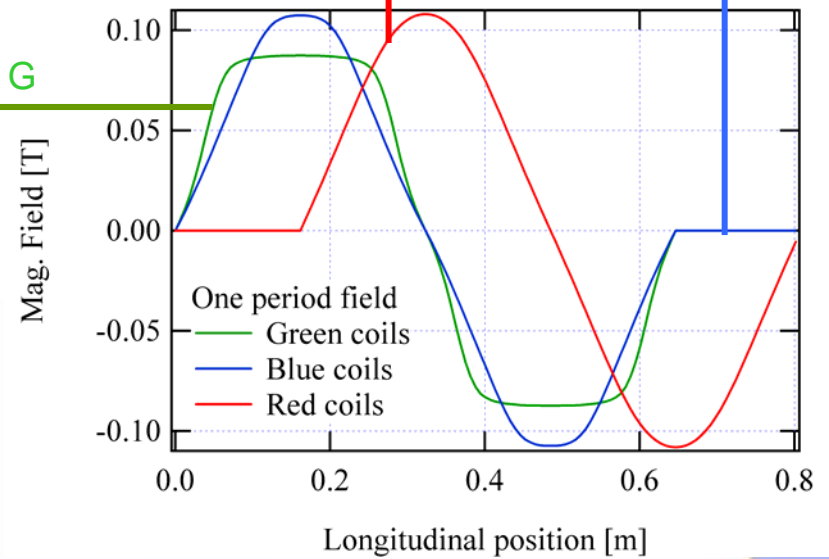
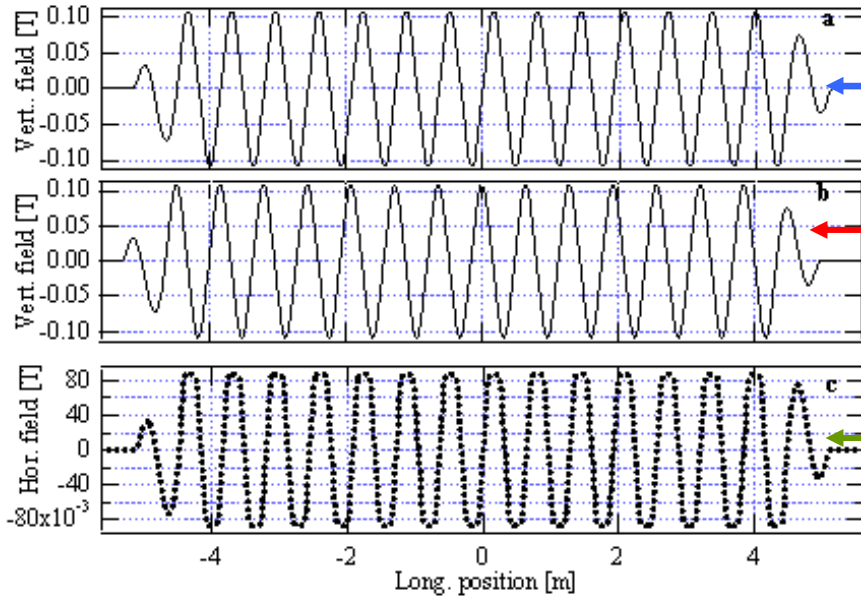
- 3 sets of coils (RGB)
- R and B are shifted by a quarter of period

Radia code: <http://www.esrf.fr>

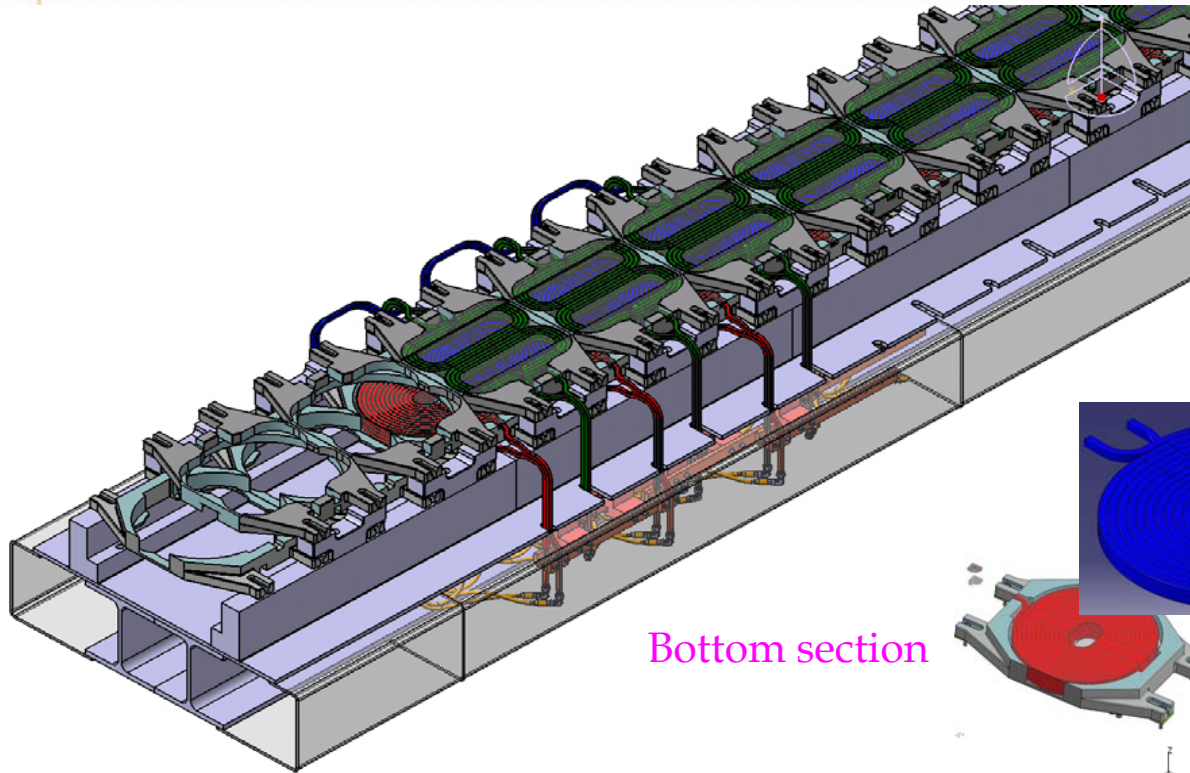
$$B_z(s) = B_B \cdot \cos[2\pi s / \lambda_0] + B_R \cdot \sin[2\pi s / \lambda_0] = B_{z_0} \cdot \cos[2\pi s / \lambda_0 + \phi]$$

Magnetic field

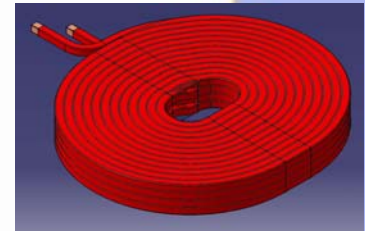
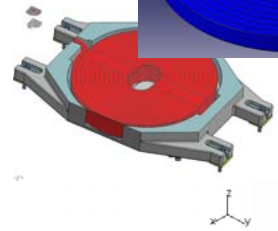
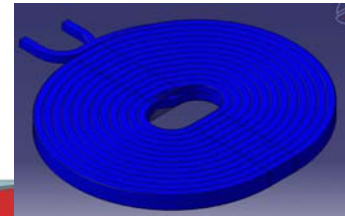
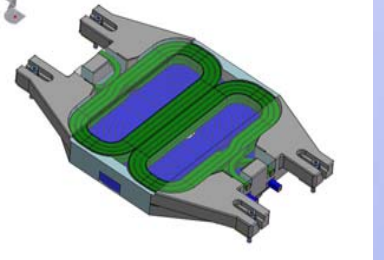
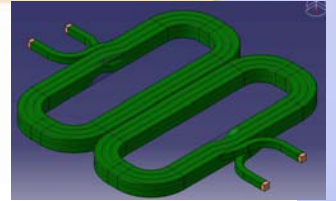
$I_G=590$ A $I_B=430$ A $I_R=350$ A



HU640 Design: Coils



Bottom section

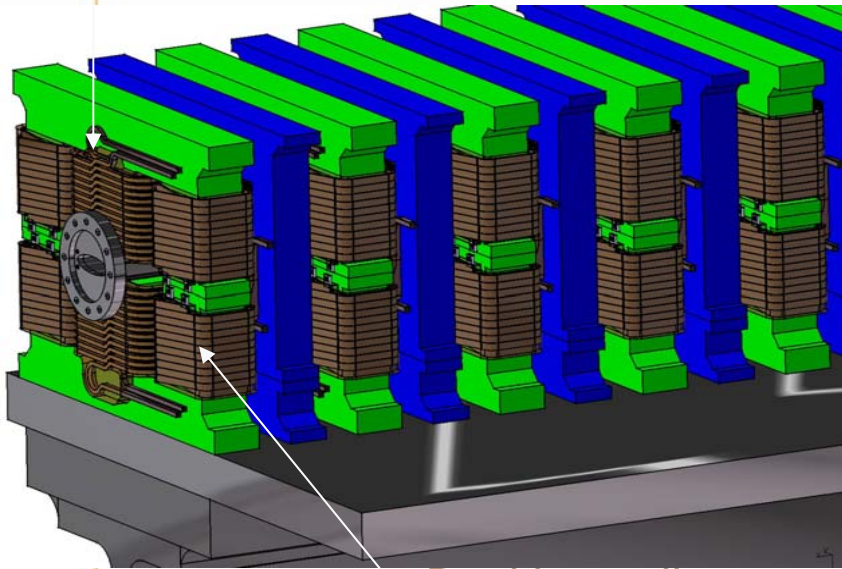


Magnetic design

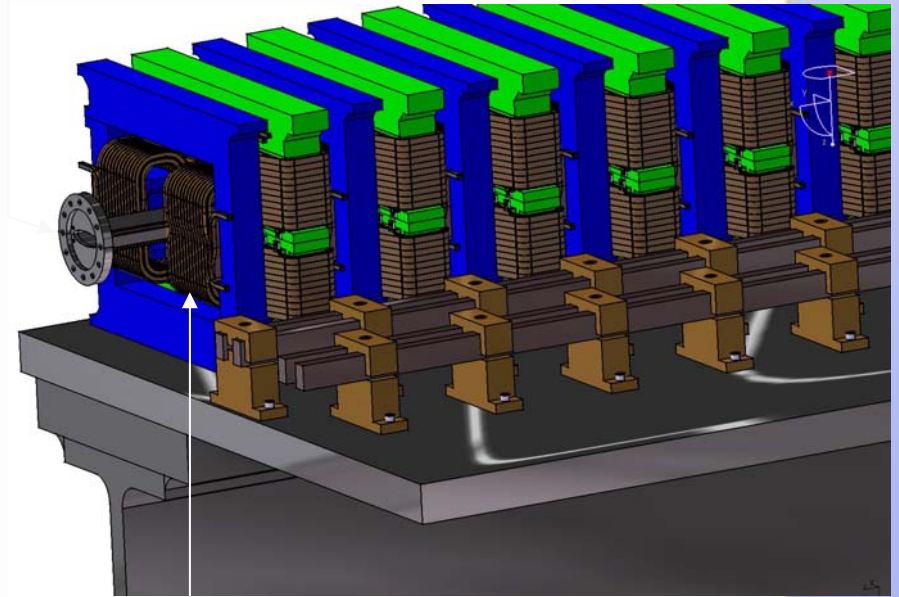


Production of
Vert. field

Extruded Vacuum
Chamber



Backleg coils



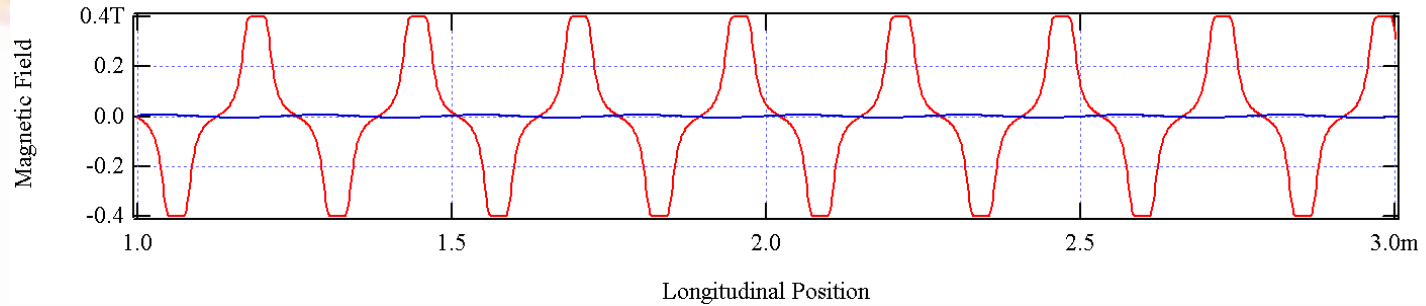
Production of
Vert. field

Courtesy of J-L. Marlais
et al. SOLEIL

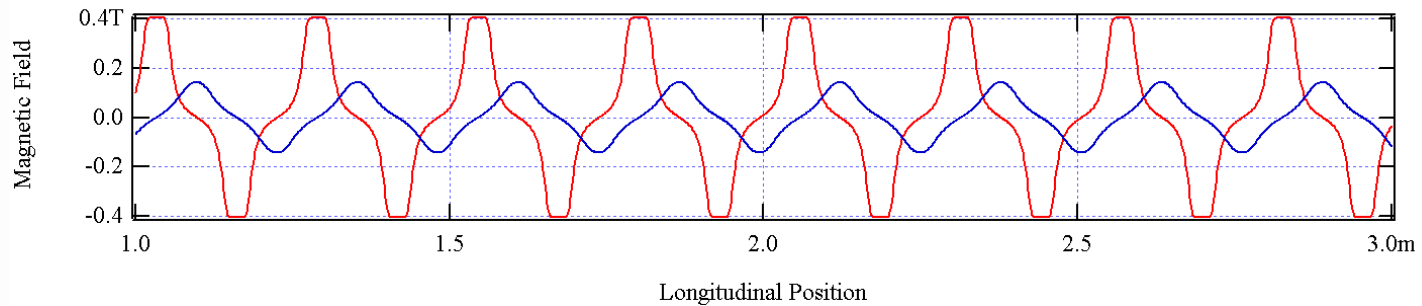
Annexe 2

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

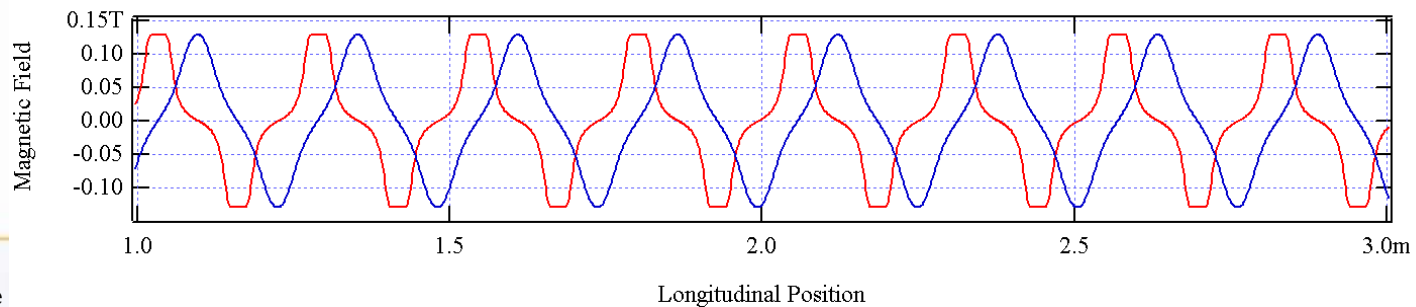
High-Excitation Planar Mode ($I_x = 3.0$ kA, $I_y = 2.65$ kA)



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



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

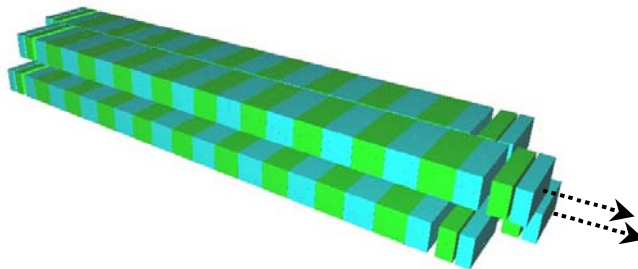


APPLE-II Configurations

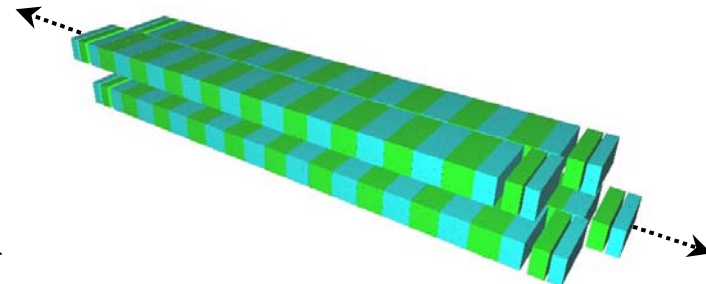
to Produce Circular and Tilted Linear Polarizations

(parameters of HU80, calculations by RADIA)

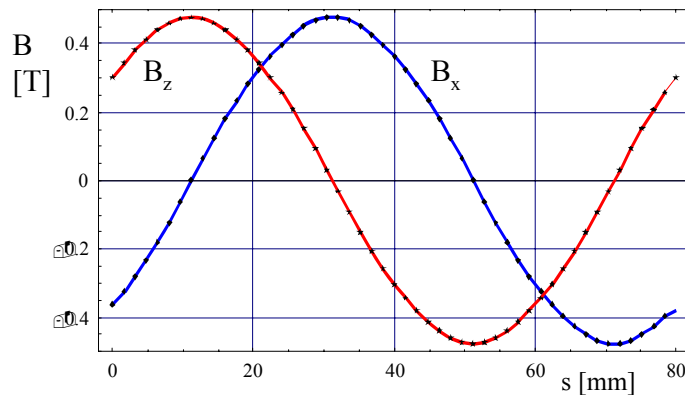
Circular/Elliptical Polarization
(parallel displacement of 2 magnet arrays)



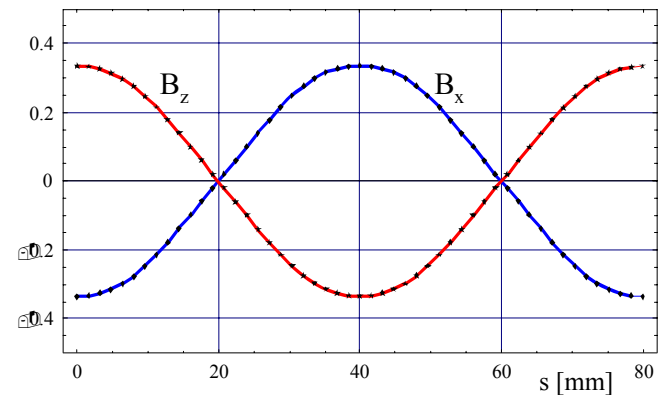
Tilted Linear Polarization
(anti-parallel displacement of 2 magnet arrays)



Gap: 17 mm

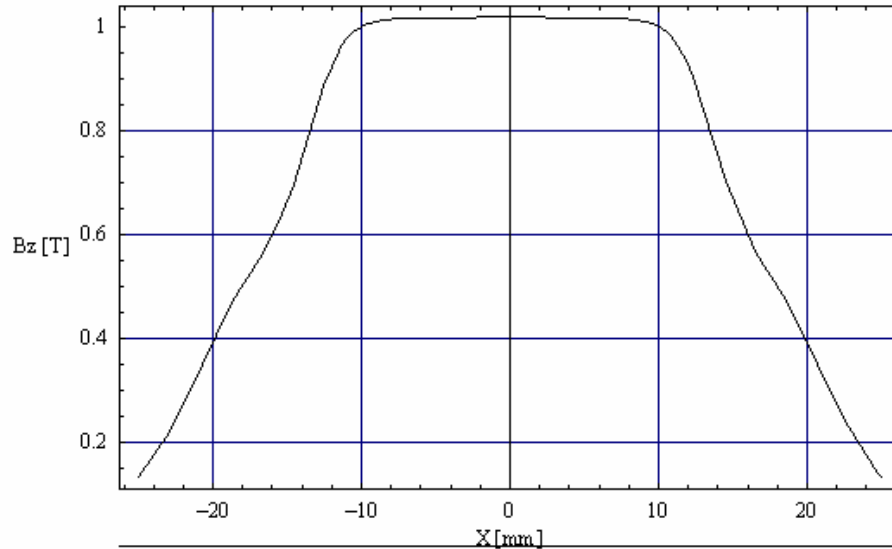
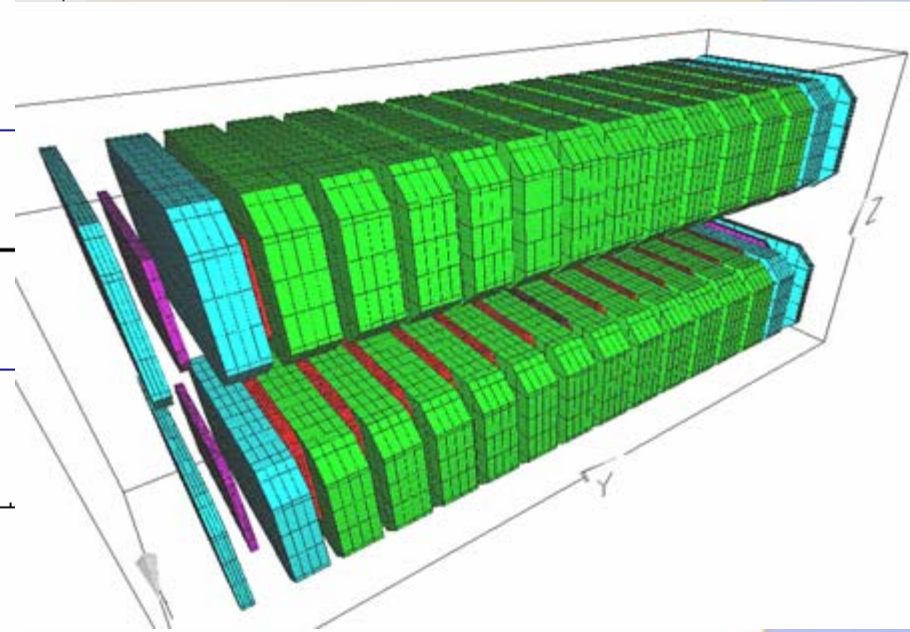
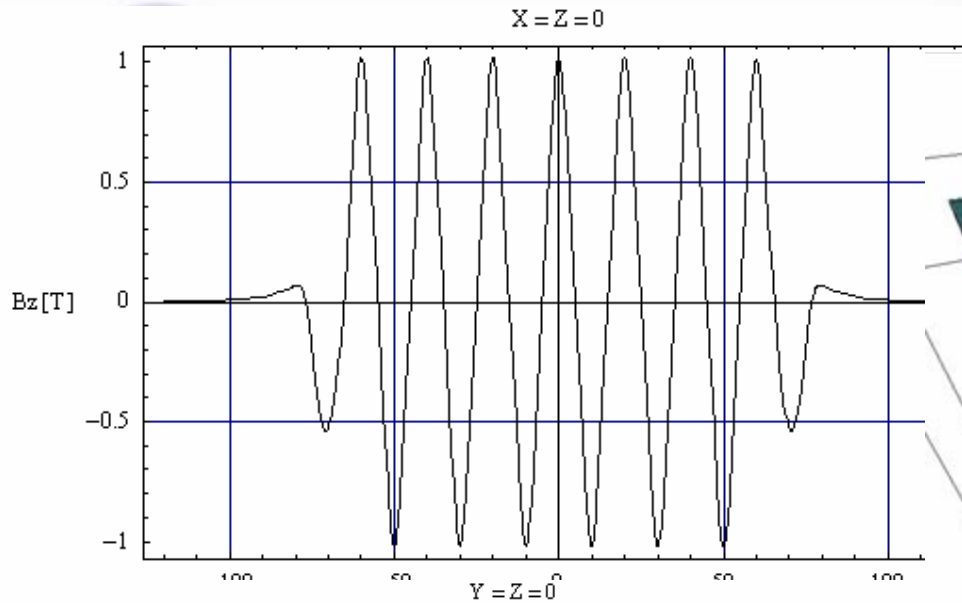


$$B_{x \max} \approx B_{z \max} \approx 0.48 \text{ T}$$



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

U20 Hybrid undulator sous vide



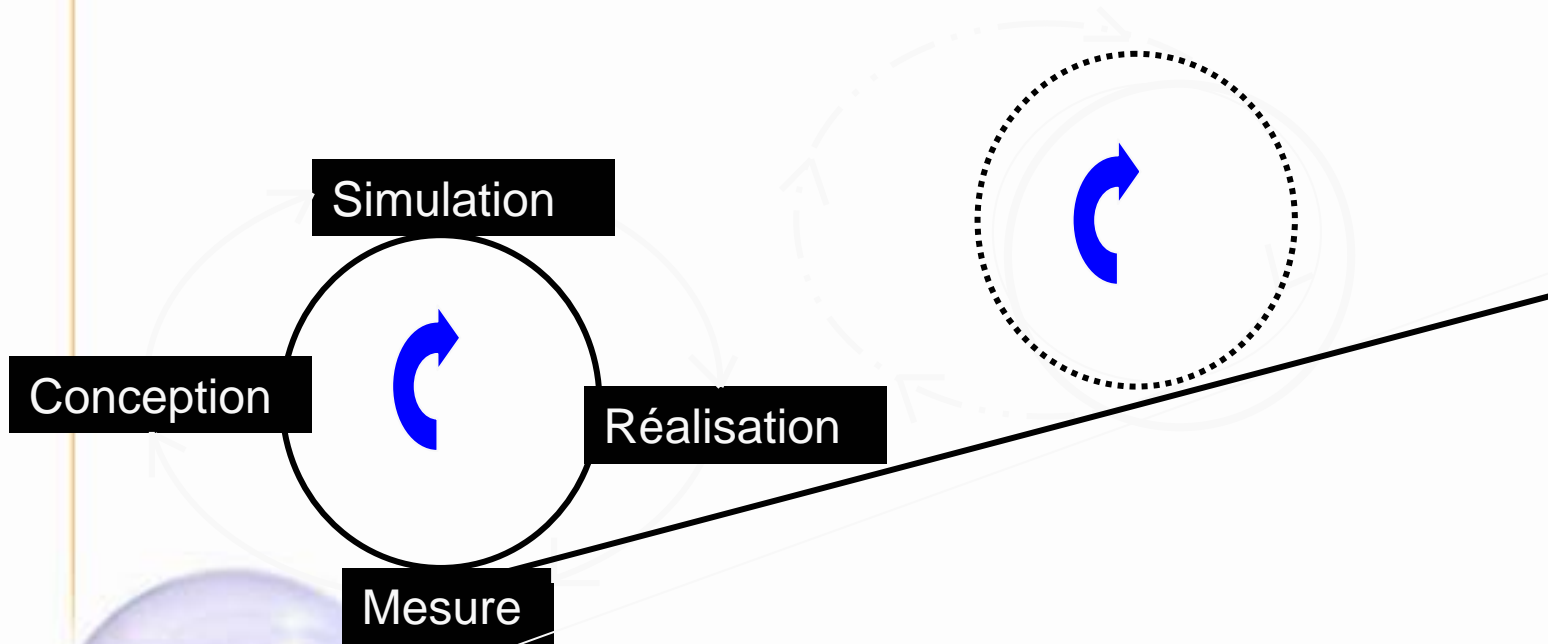
$B_0 = 1.02$ T
Gap = 5.5, per = 20
SmCo17 (50,7.5,30)
VP (33,2.5,22)
 $N_{per} = 98$



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.



Calcul des Ampères-tours d'un sextupole

- 1. Considérons le trajet
- curviligne OSCMO
- 2. Appliquons le théorème d' Ampère: sur OS , B est
- colinéaire avec dl
- 3. En négligeant H dans le fer on
- obtient la formule de la force
- sextupolaire
- $S = 3 \cdot \mu_0 \cdot NI / A^2$
- La force sextupolaire s'exprime en



Calcul des Ampères-tours d'un dipole

1. Considérons le trajet curviligne OPCMO
2. Appliquons le théorème d' Ampère: sur OS , B est colinéaire avec dl
3. En négligeant H dans le fer on obtient la formule du Champ
$$B = \mu_0 \cdot NI / E$$

Besoins de la physique Accélérateurs



- ✓ **Connaissance du contenu harmonique du champ produit par les quadrupôles anneau.**
- ✓ **Localisation du centre magnétique à $25\mu\text{m}$ près selon x et z.**
- ✓ **Détermination du défaut de positionnement angulaire autour de s à 0.1 mrad près.**
- ✓ **Correction des décalages précédents.**

Histoire des calculs Magnétostatiques



- Une longue tradition en calculs des aimants d' accélérateurs existe et s' est développée en raison de leur poids et de leur prix.
- Les calculs 3D se sont généralisés dans les dix dernières années et permettent une prédetermination à quelques 10⁻⁴
- Les performances et les exigences de précision se sont accrues parallèlement.
- Les supports intuitifs sont à développer dans le dialogue homme-machine mais surtout par la confrontation avec les mesures