



Magnétisme

Aimants Chauds

B. Launé

CNRS/IN2P3/IPNO

Aimants

- Notions de base pour le design d'un aimant
- Aimants à bobines résistives
- Quelques équations compliquées passeront, mais seules les conséquences pratiques seront à retenir

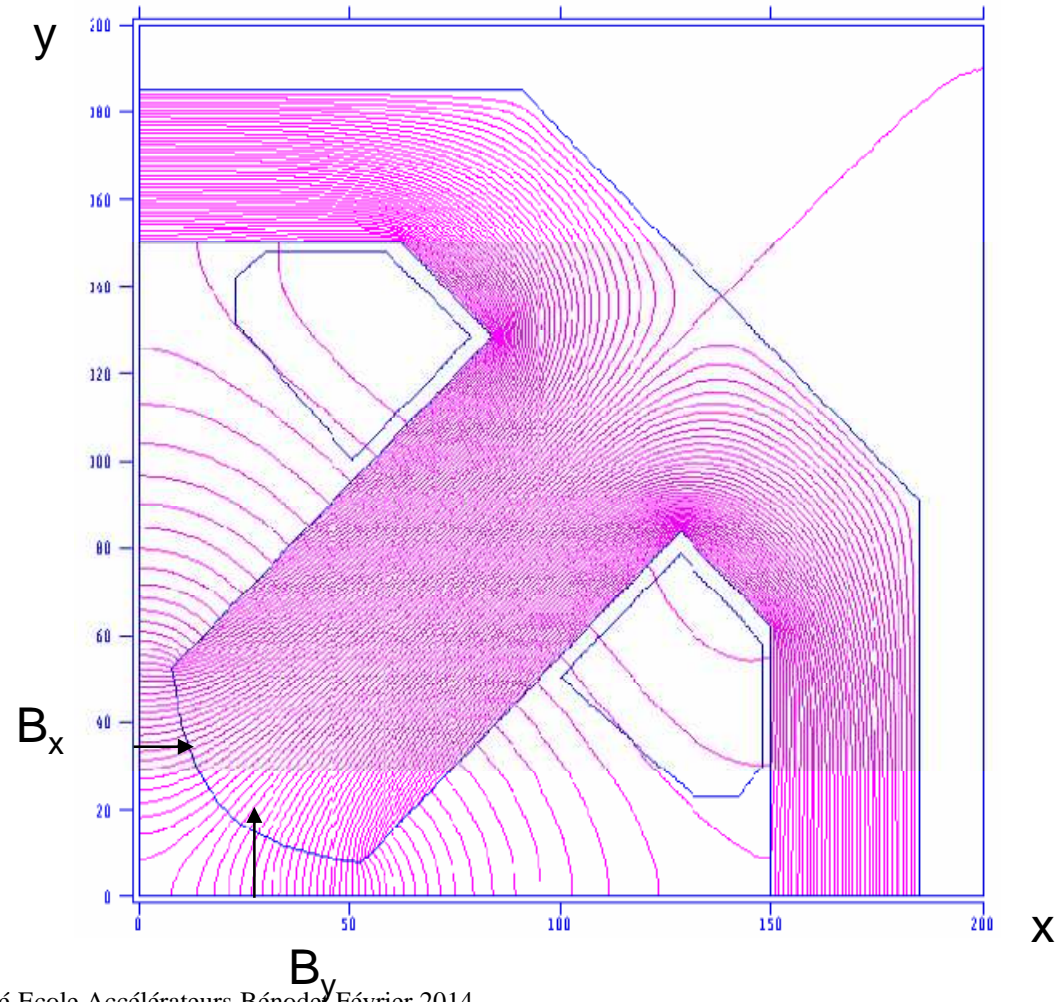
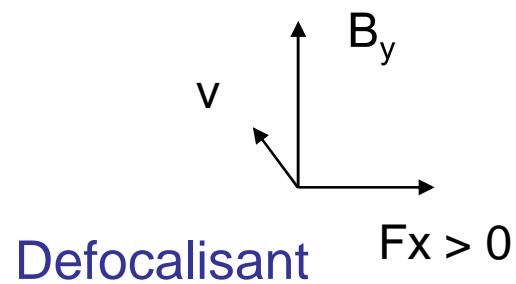
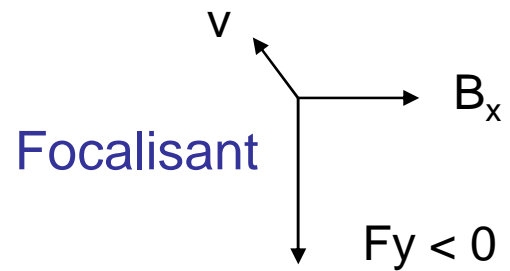
Comment focaliser? Le quadrupole magnétique

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

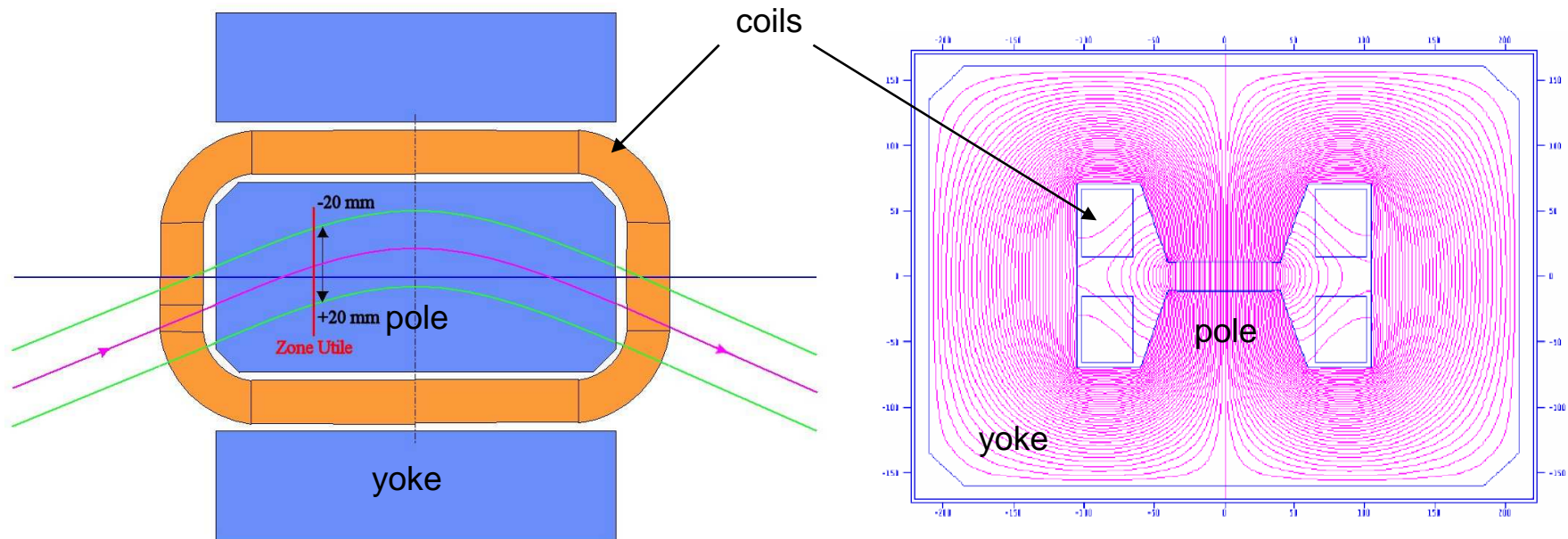
$$B_x = Gy$$

$$B_y = Gx$$

G : gradient (T/m)

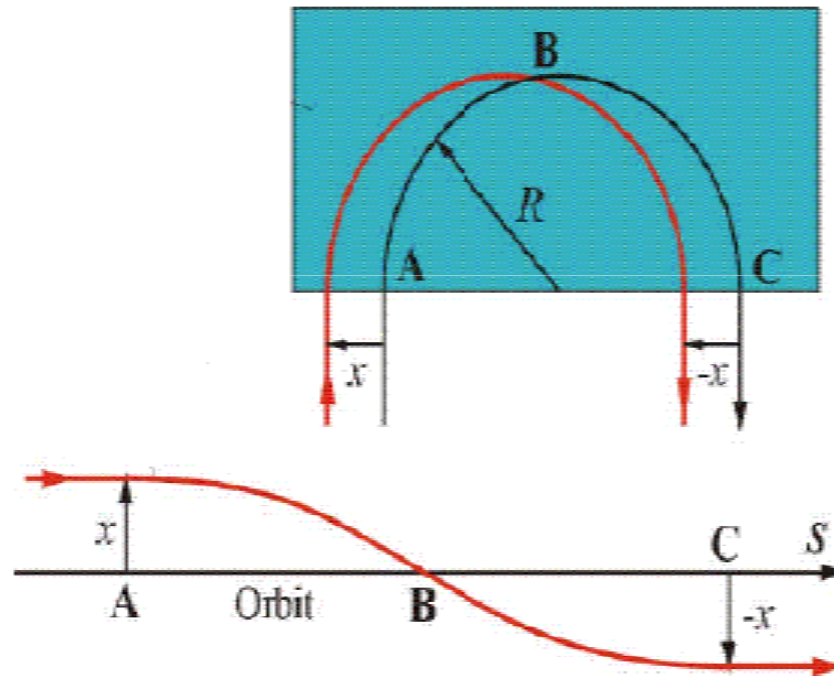


Déviation (Bending): dipole

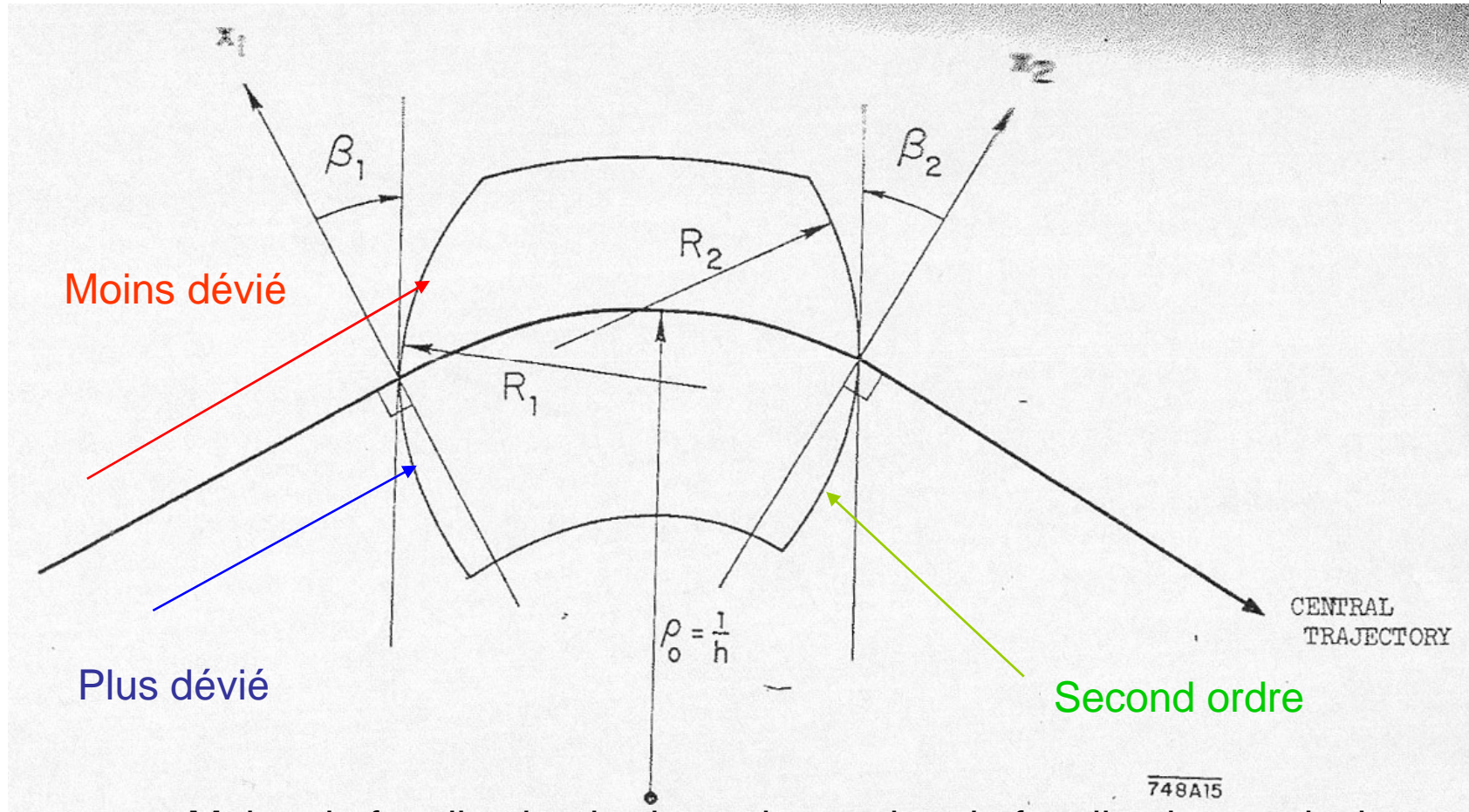


Yoke : culasse
Coil : bobine

Dipole : focalisation



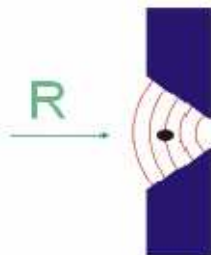
Edge focussing



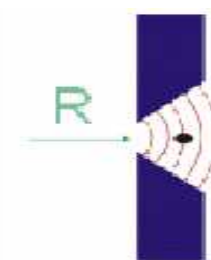
Moins de focalisation horizontale => plus de focalisation verticale

Indice de champ

Field index



Focalisant horizontalement, défocalisant verticalement



Focalisant verticalement, défocalisant horizontalement

$$n = - \frac{R}{B} \frac{\partial B}{\partial x}$$

$0 < n < 1$ focalisant dans les deux plans

Equations de Maxwell : B, H, D, E

Equations de Maxwell

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

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

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

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

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

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

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

B_{\perp} and H_{\perp} : composantes continues

H_{\perp} and B_{\perp} : composantes discontinues

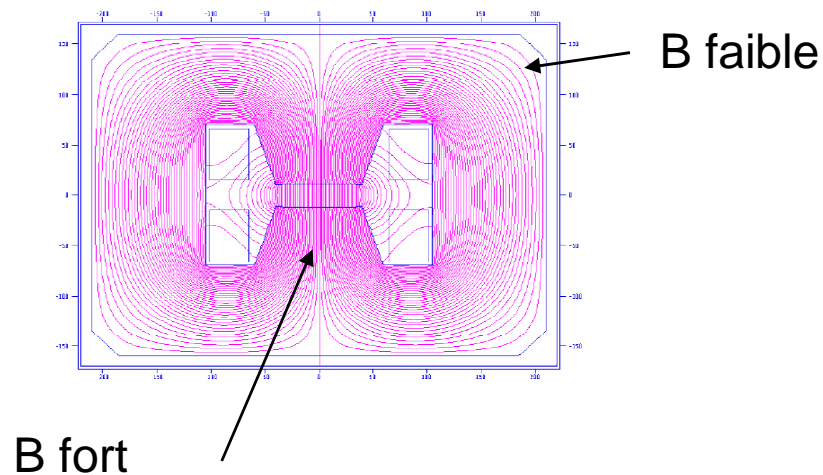
$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

B : champ magnétique

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

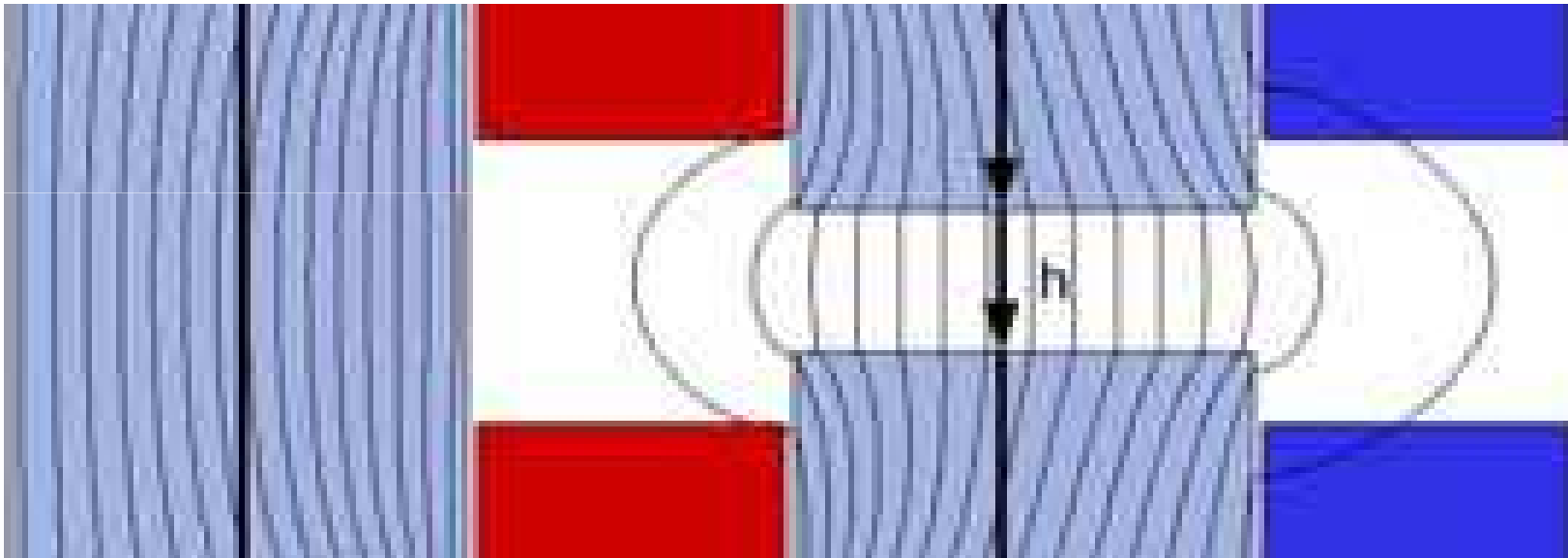
$$\iint \vec{B} \cdot d\vec{s} = Cte$$

Les lignes de flux sont des boucles
 Les lignes de flux se rapprochent : B augmente
 Les lignes de flux s'éloignent : B diminue



Diffraction des lignes de champ

Discontinuité des composantes



Propriétés de l'acier

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

B : induction magnétique (T ou Gauss)

H : champ magnétique (A/m)

μ_r : perméabilité magnétique relative

μ_0 : perméabilité magnétique du vide ($4\pi 10^{-7}$)

μ_r pour l'acier doux : jusqu'à 100-1000

μ_{Metal} : jusqu'à 20 000 (blindage du champ terrestre)

Ecrit aussi :

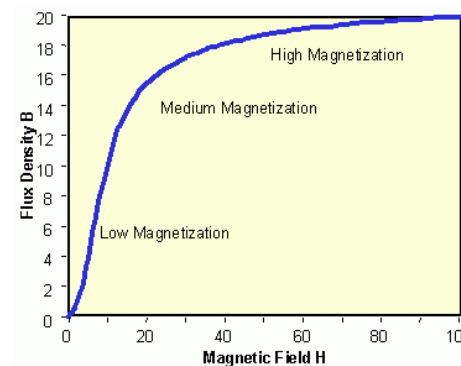
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$$

M : magnétisation

Saturation du fer! Max M=2.14 T

NON LINEAIRE!

Prédictions difficiles!



Theorème d 'Ampère

$$\text{curl} \vec{H} = NI$$

$$\int_{\text{air}} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{\text{iron}} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

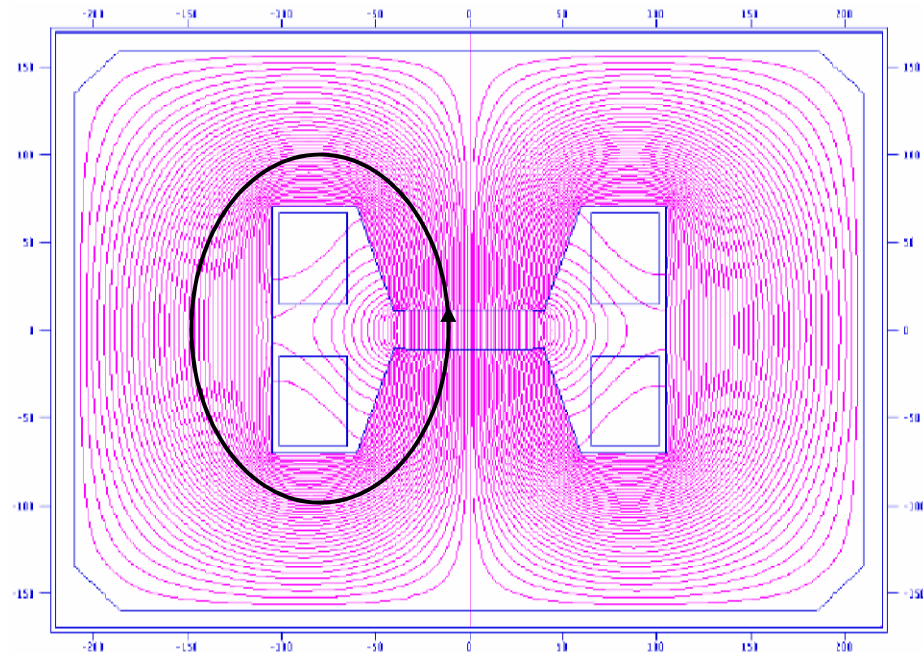
$$\int_{\text{air}} \frac{\vec{B}}{\mu_{\text{air}}} \cdot d\vec{l} + \int_{\text{iron}} \frac{\vec{B}}{\mu_{\text{iron}}} \cdot d\vec{l} = NI$$

↑
faible

$$B = \frac{\mu_0 NI}{d}$$

d : gap ou entrefer

NI : Ampère-tours



La contribution du fer est dominante pour les aimants à température ambiante

Saturation du fer : $\mu(B)$

Effet sur la courbe de montée en intensité d'un aimant

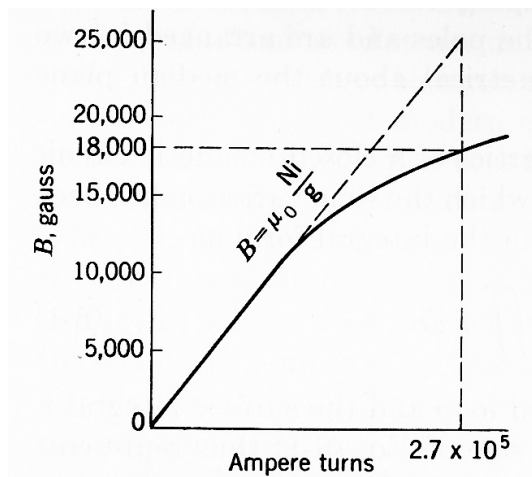


Fig. 8-3. Flux density in the gap versus excitation for the MIT cyclotron magnet.

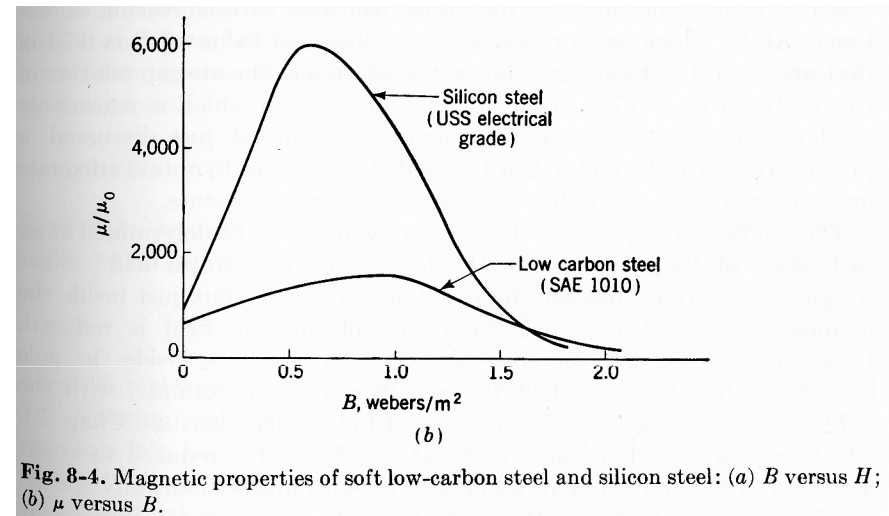
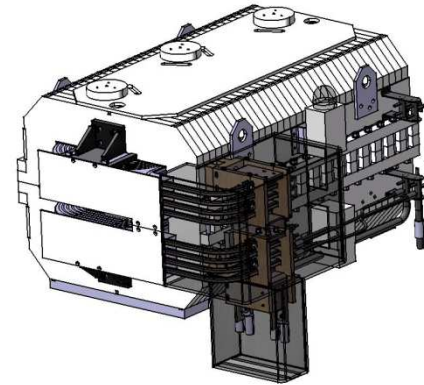
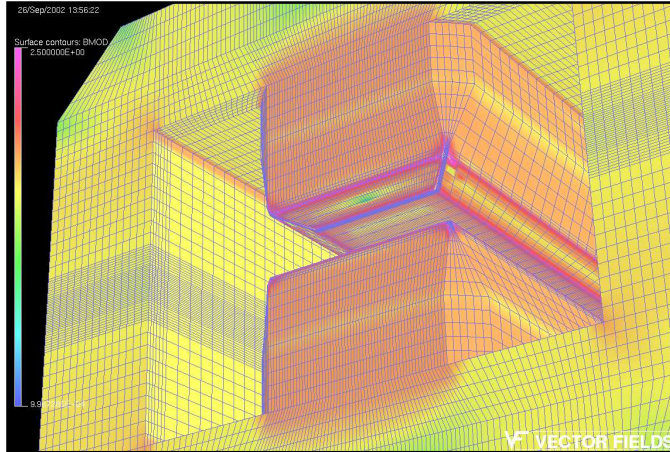


Fig. 8-4. Magnetic properties of soft low-carbon steel and silicon steel: (a) B versus H ; (b) μ versus B .

Dipôle magnétique

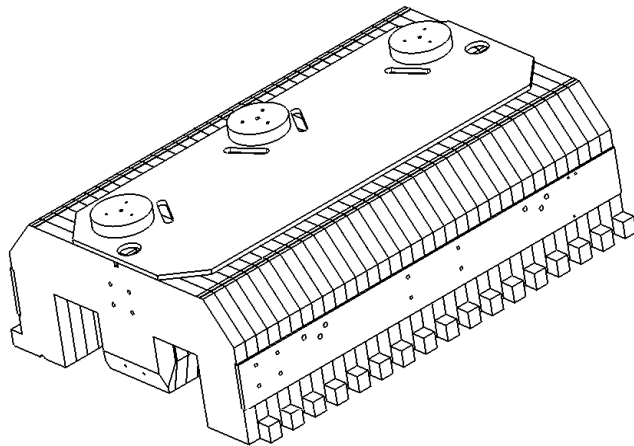


Historique d'un aimant

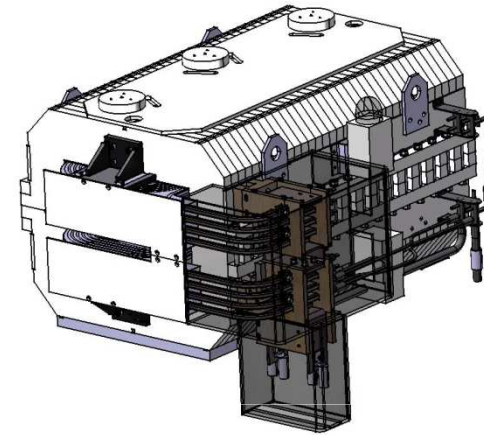
- Obtenir un cahier des charges : B, entrefer, zone utile
- calcul 2D (POISSON, OPERA2D)
- calcul 3D (OPERA3D, TOSCA)
- Optimisation (avec les bobines)
- Conception mécanique (CATIA..)
- Construction
- Mesures
- Alignement

Mécanique, alignement, thermique, électromagnétisme, vide, optique, puissance électrique, sûreté...

Construction aimant (SOLEIL)



Vue isométrique
Echelle : 1:5



Contrôle de l'acier : perméabilité, composition, ultrasons, dimensions
Usinage

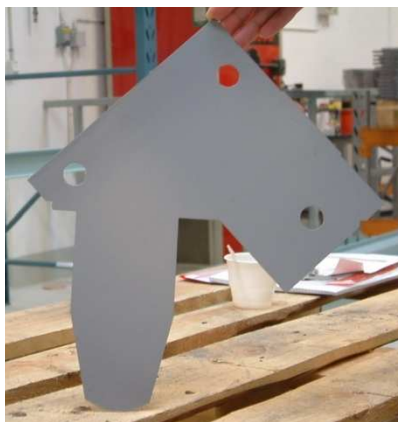
1



2



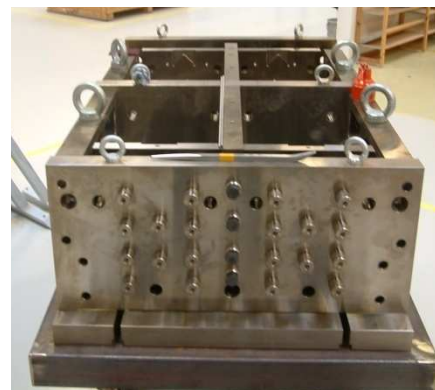
3



4



5



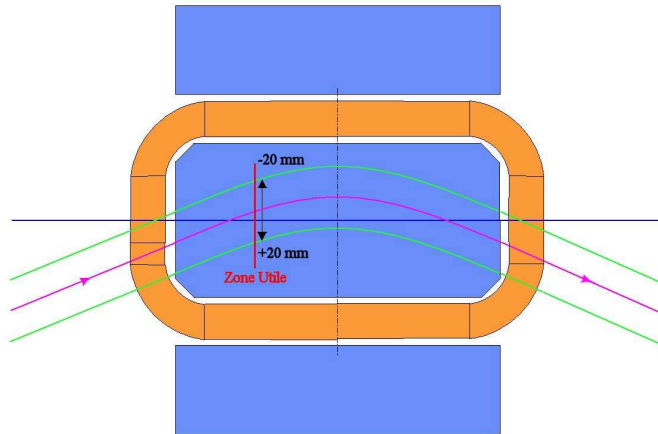
6



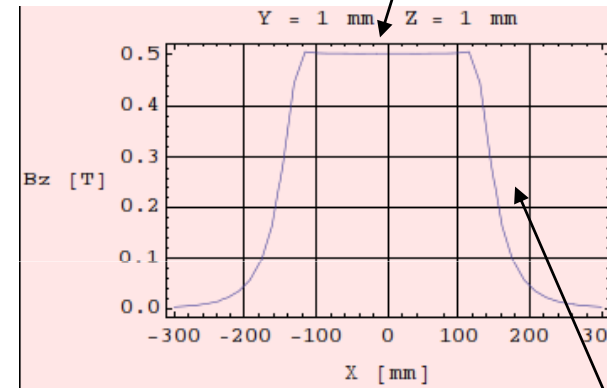
- 1 mold
- 2 impregnated coil
- 3 lamination
- 4-5 tooling
- 6 quarters

QP fabrication (Danfysik)

Intégrale de champ



Plateau



Longueur magnétique :

$$l_m = \frac{1}{B_0} \int B \cdot dl$$

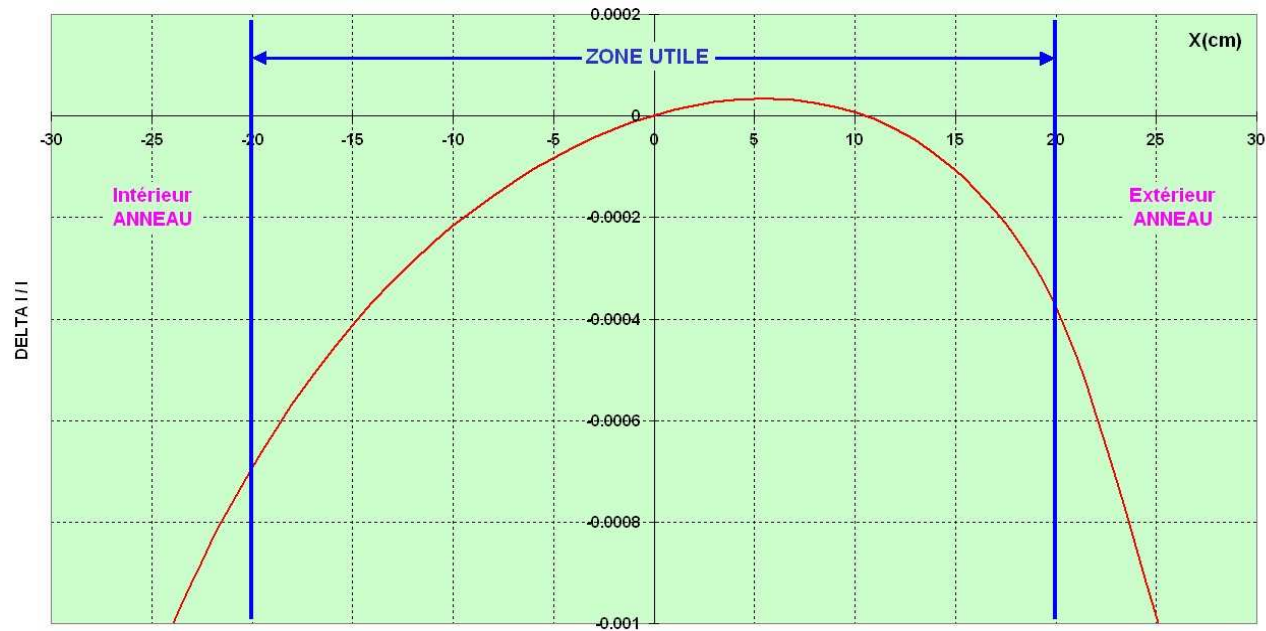
Champ de fuite

Angle de déviation :

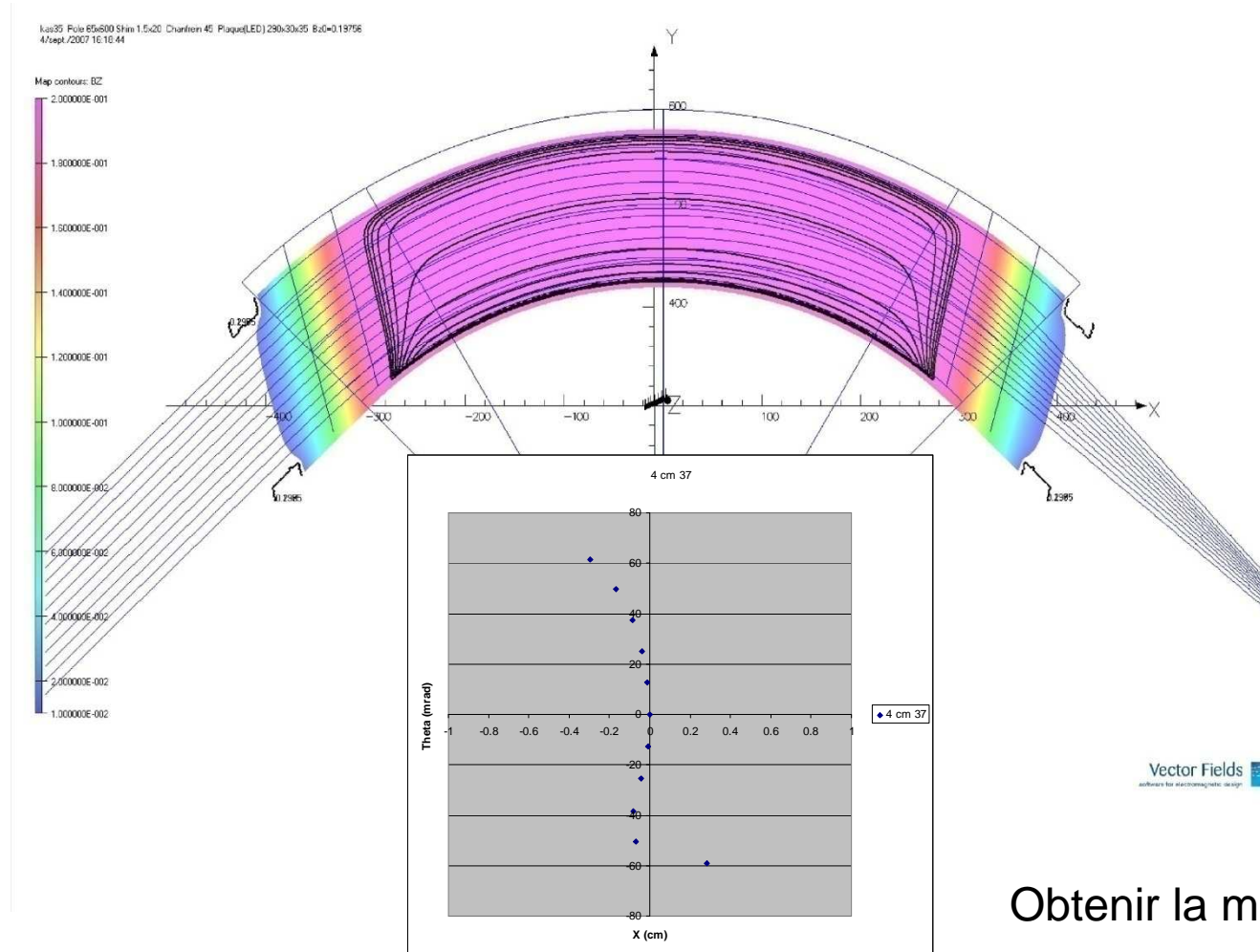
$$\theta = \frac{\int B \cdot dl}{B\rho}$$

Zone utile

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



Intégrer les trajectoires dans le champ magnétique (aimant GUINEVERE, TOSCA3D)



Obtenir la matrice exacte

Matrice d'un dipôle

$$R_h = \begin{bmatrix} \cos \theta & \rho \sin \theta & \rho(1 - \cos \theta) \\ -\frac{\sin \theta}{\rho} & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_v = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Drift en vertical

Edge focussing : matrice

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta}{\rho} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\tan(\beta-\psi)}{\rho} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

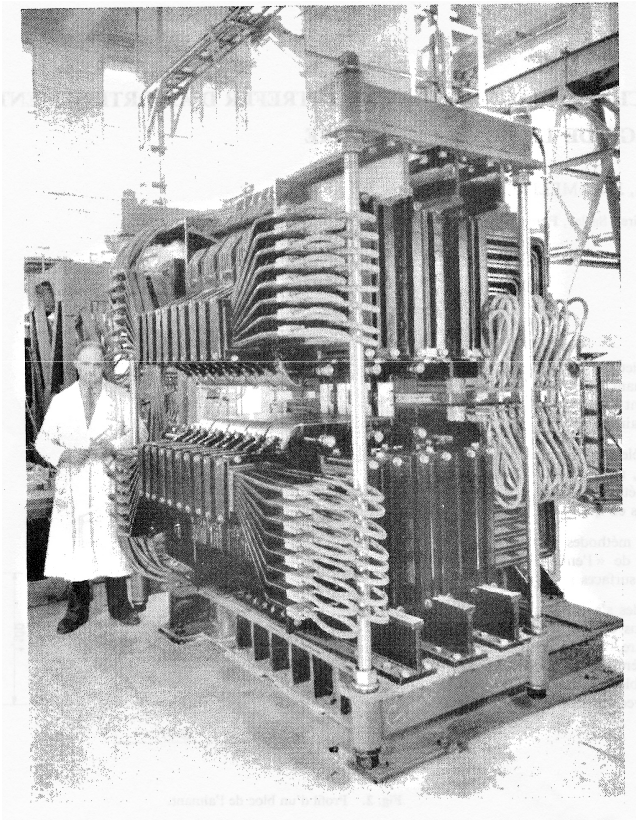
Definitions: β = angle of rotation of pole-face (see figure on following page for sign convention of β)
 ρ = bending radius of central trajectory
 g = total gap of magnet
 ψ = correction term resulting from finite extent of fringing fields.**

where

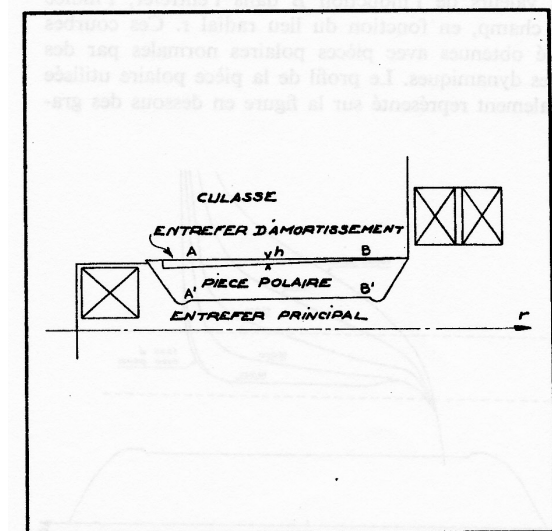
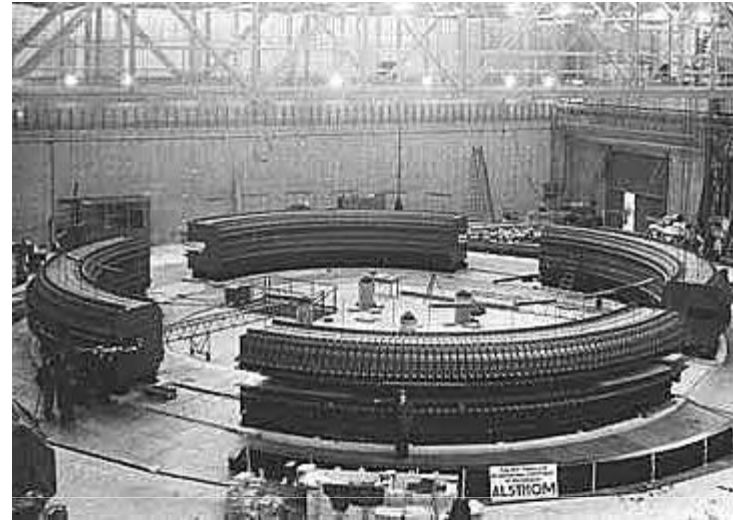
$$\psi = K_1 \left(\frac{g}{\rho} \right) \left(\frac{1 + \sin^2 \beta}{\cos \beta} \right) \left[1 - K_1 K_2 \left(\frac{g}{\rho} \right) \tan \beta \right]^*$$

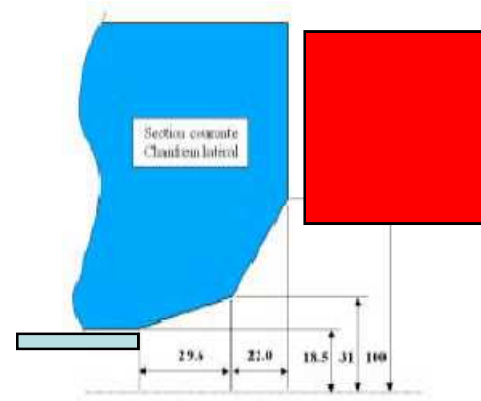
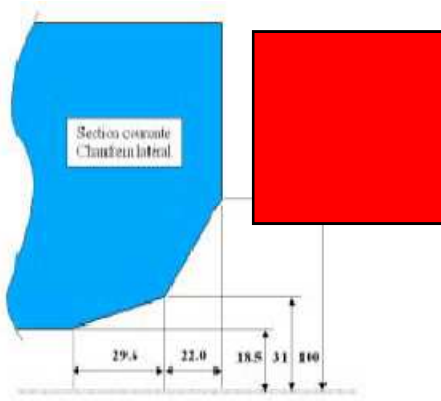
$$R_t = R_{\beta s} R_\theta R_{\beta e}$$

Exemple sans outils de calculs SATURNE 1 (1958)



maquette





Chanfrein

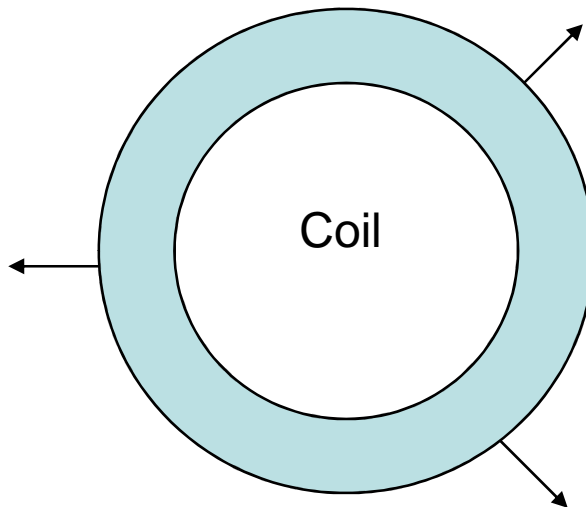
Latéral : améliorer la zone utile (saturation)
Extrémités: ajuster la longueur magnétique
Longueur magnétique = longueur de fer

shimming

Améliorer la zone utile
Précision sur le champ importante!

Force sur les conducteurs : Hoop stress

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \otimes \vec{B}$$

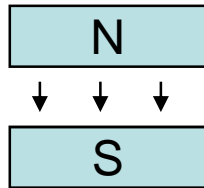


Loi du flux maximum
(Loi de Lenz)

Forces (II)

Forces sur l'acier : intégrale

~~$$\vec{F} = \mu_0 \int_S [(\vec{n} \cdot \vec{H}) \cdot \vec{H} - \frac{1}{2} \vec{n} (\vec{H})^2] ds$$~~



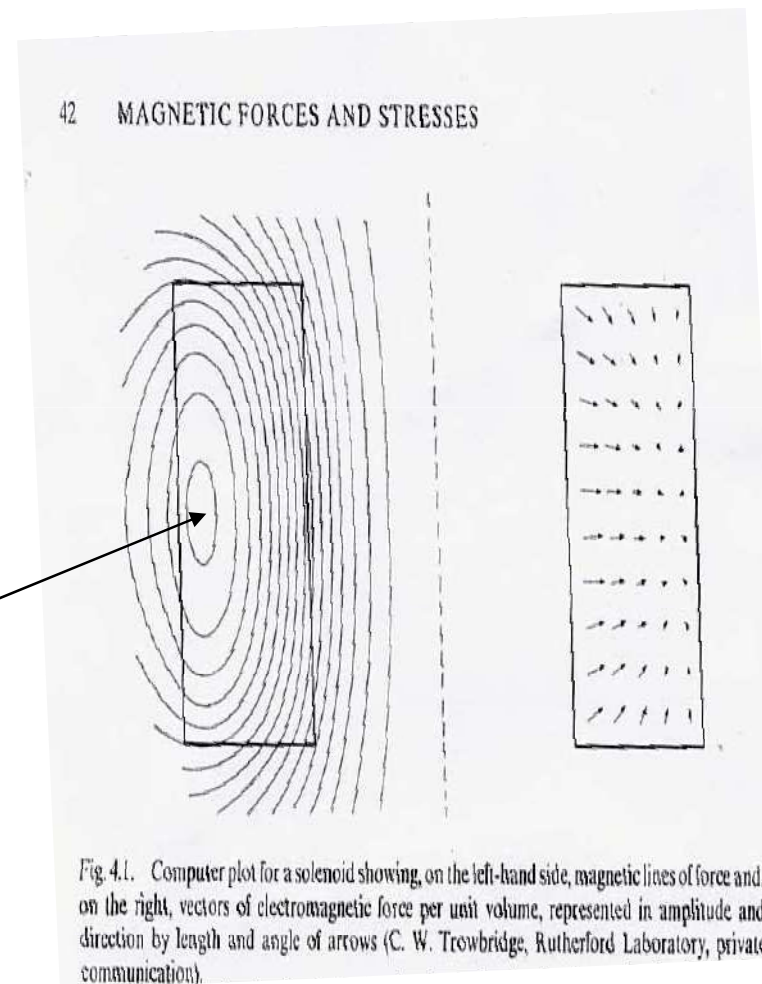
force portante :

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

A.N. : 1 m², 1 T $\mu = 4\pi 10^{-7}$ $F = 400\,000$ N, soit 40 t

Forces (III)

Lehmann point



Forces (IV)

- Attention à ne pas toujours suivre son intuition
- Exemple : forces entre les bobines répulsives à bas champ, attractives à haut champ (bobines dans l'air)
- Résultante souvent différence entre deux forces équivalentes

Energie Stockée

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

L : inductance

$$E \approx \iiint \frac{B^2}{2\mu_0} dv$$

$$L = N^2 BS$$

Attention à l'évacuation de cette énergie

$$e = -\frac{d\varphi}{dt}$$

→ Courants de Foucault (Eddy currents)
(laminations)

$$\varphi = \iint B \cdot ds$$

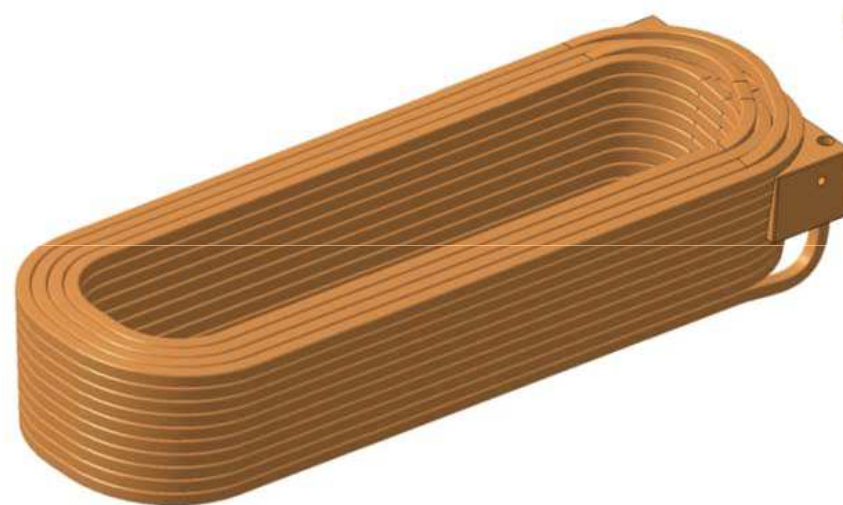
AN :

Différents types d'aimants

Standard Dipole Geometries

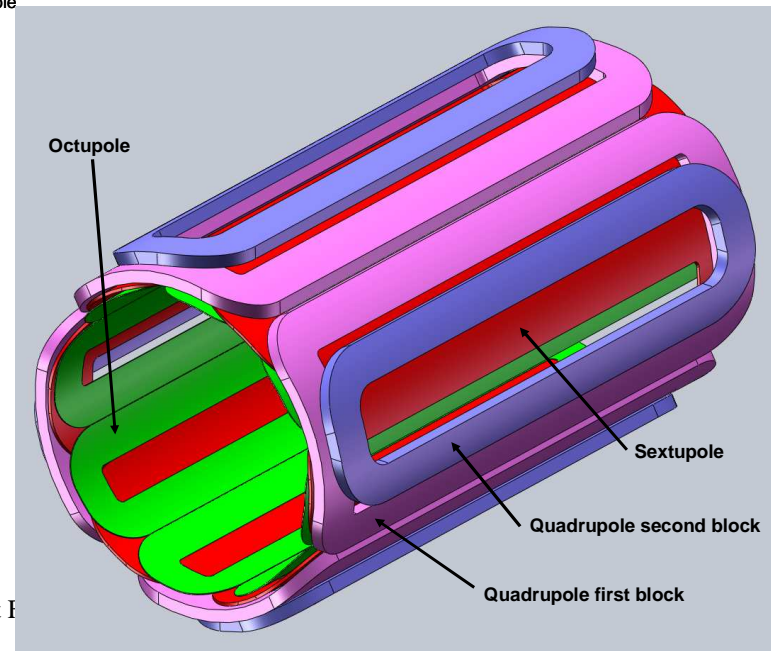
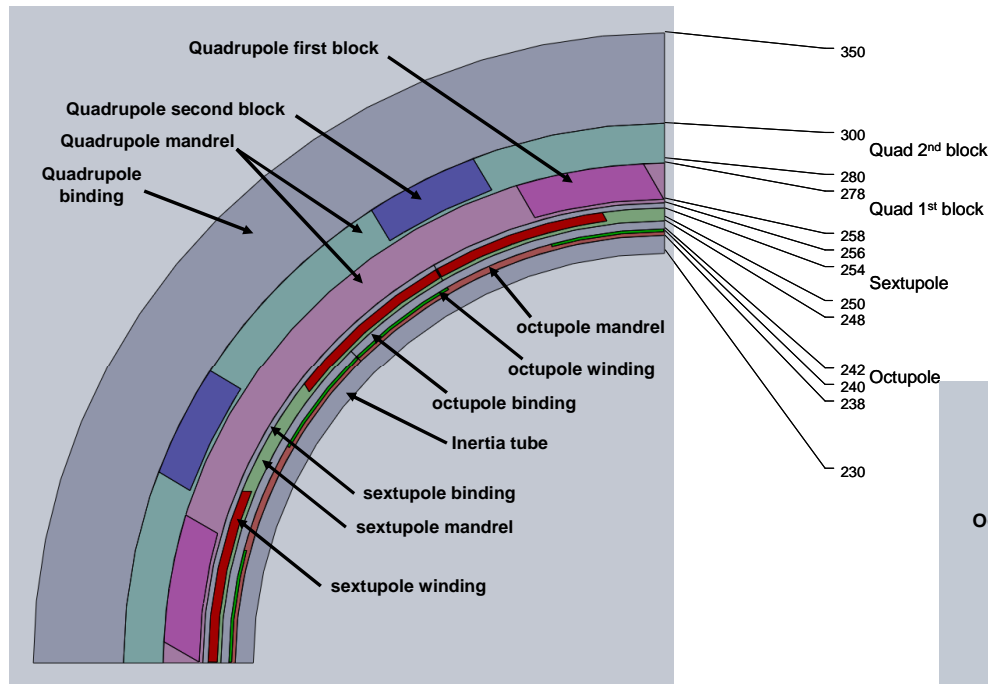
	C-core	H-type	Window Frame
advantages	easy access		no pole shims
	classic design	symmetric	symmetric
		rigid	rigid
			compact
disadvantages	pole shims req.	pole shims req.	
	asymmetric	difficult access	difficult access
	less rigid		insulation thickness

Différents types de bobines

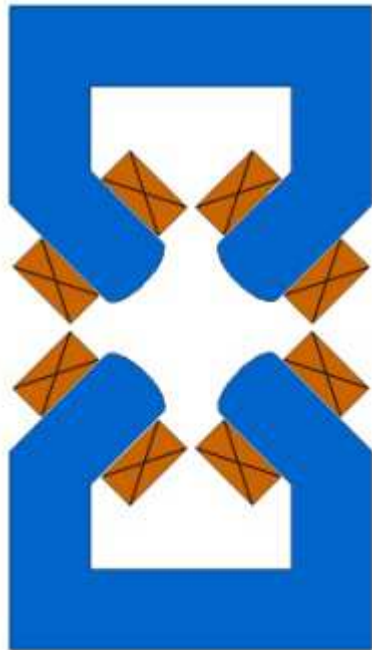


Répartition des conducteurs en $\cos n\Theta$

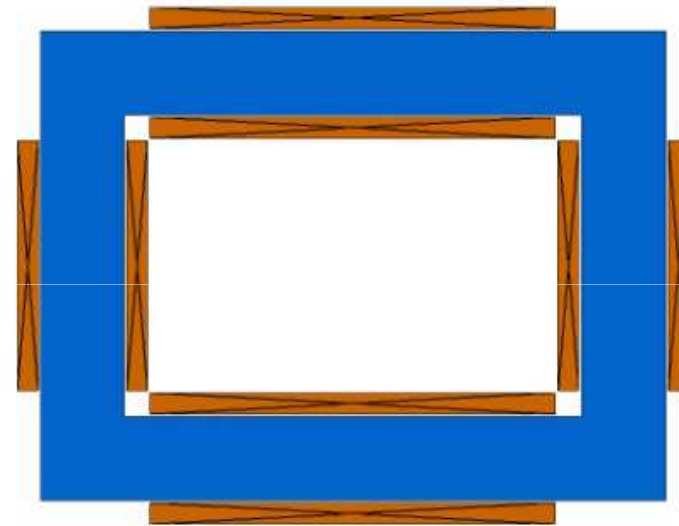
Autre manière de faire un champ constant, linéaire, quadratique...



Exemple de quadripoles



Collins

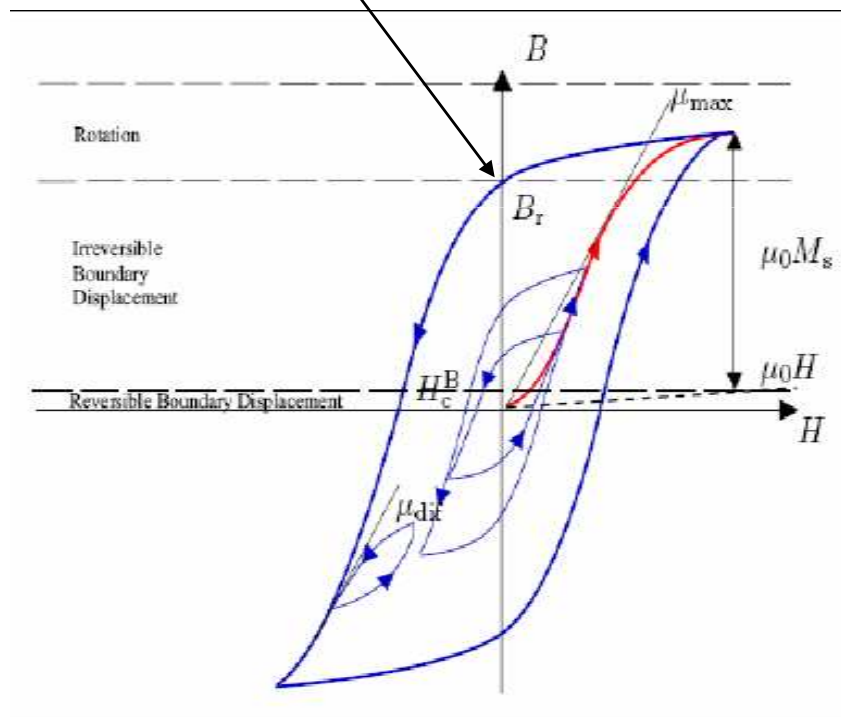


Panofsky

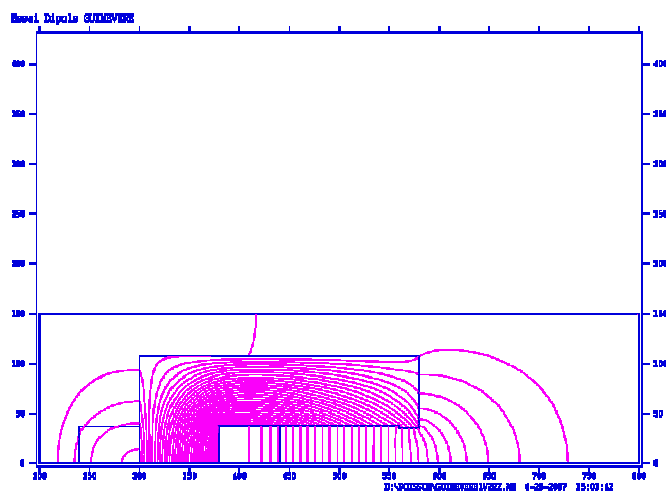
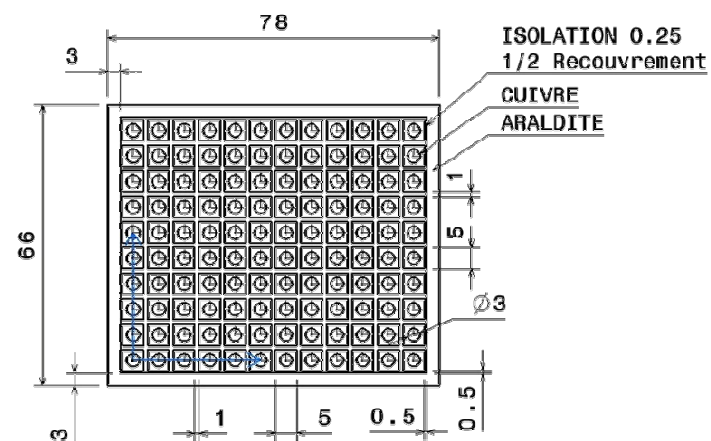
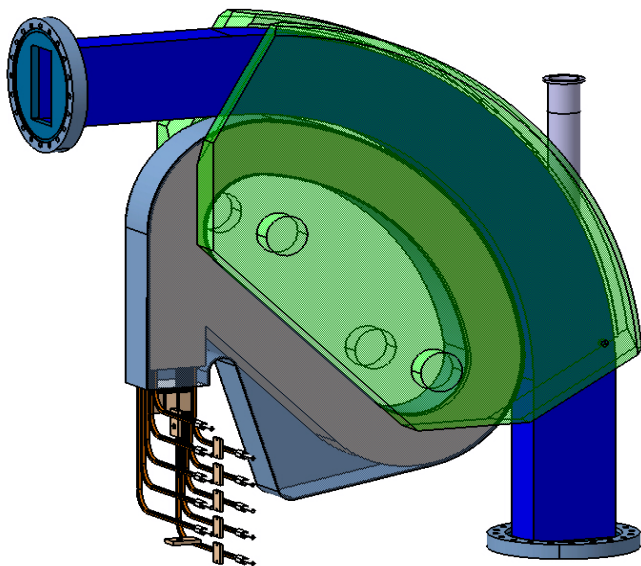
Hystérésis

Champ rémanent

Alimenter les bobines en négatif pour annuler si nécessaire



Dipôle GUINEVERE

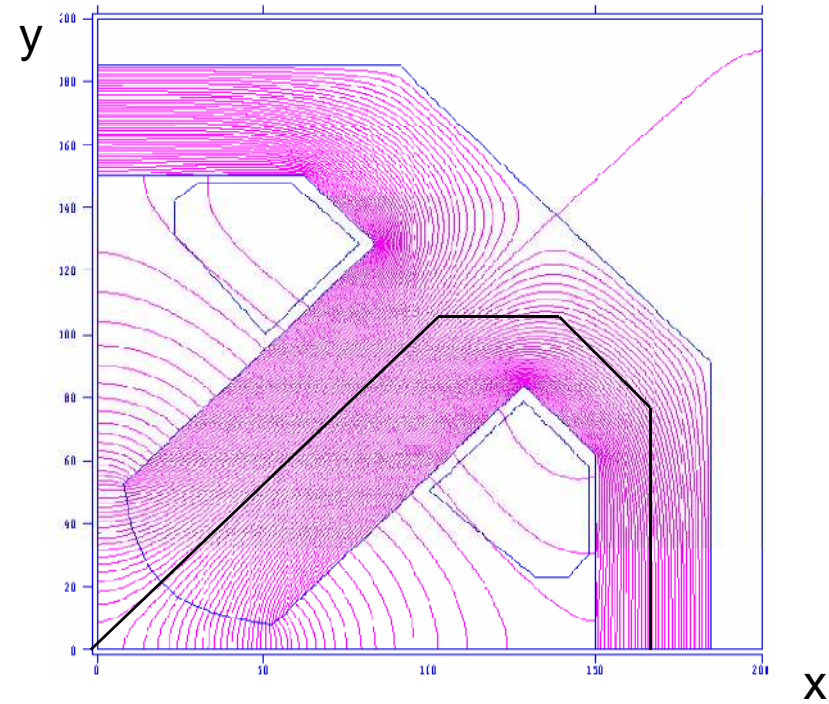


Bobines et
Alimentations à
étudier ensemble

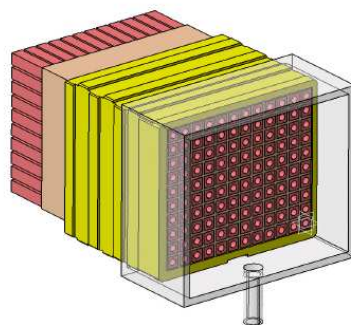
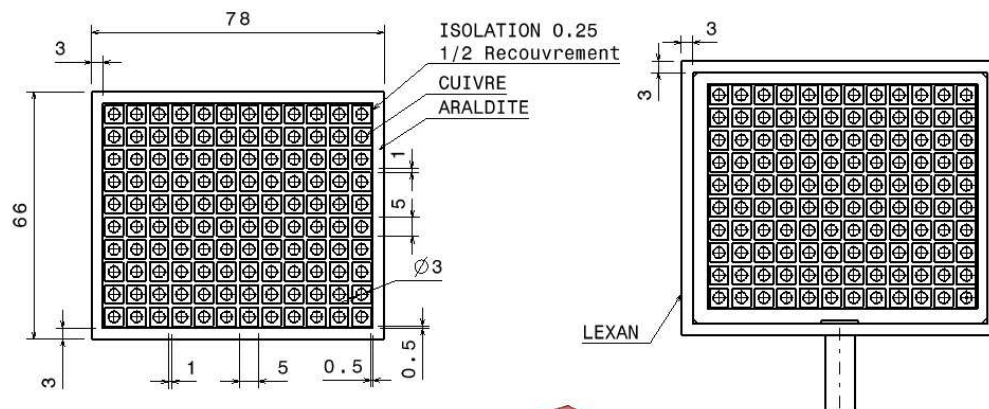
Calcul d'un quadrupole

théoreme d'Ampère
Avec μ_∞

$$G = \frac{2\mu_0 NI}{R^2}$$

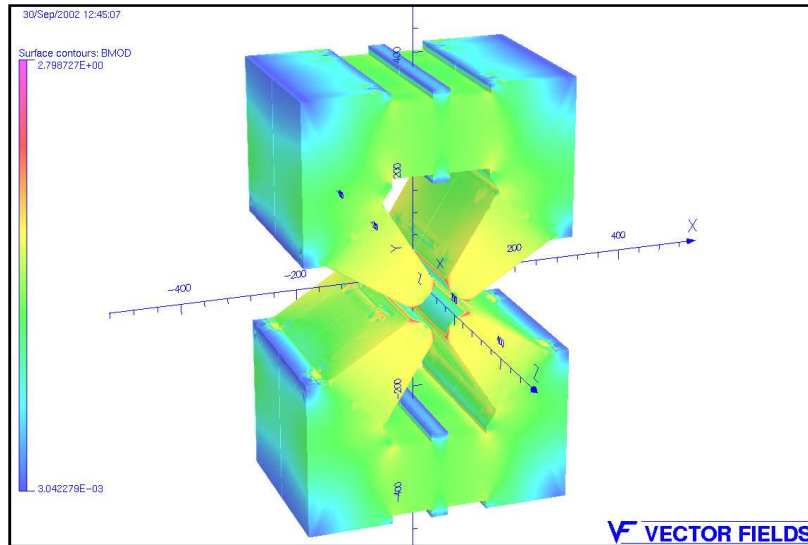


Calcul des bobines

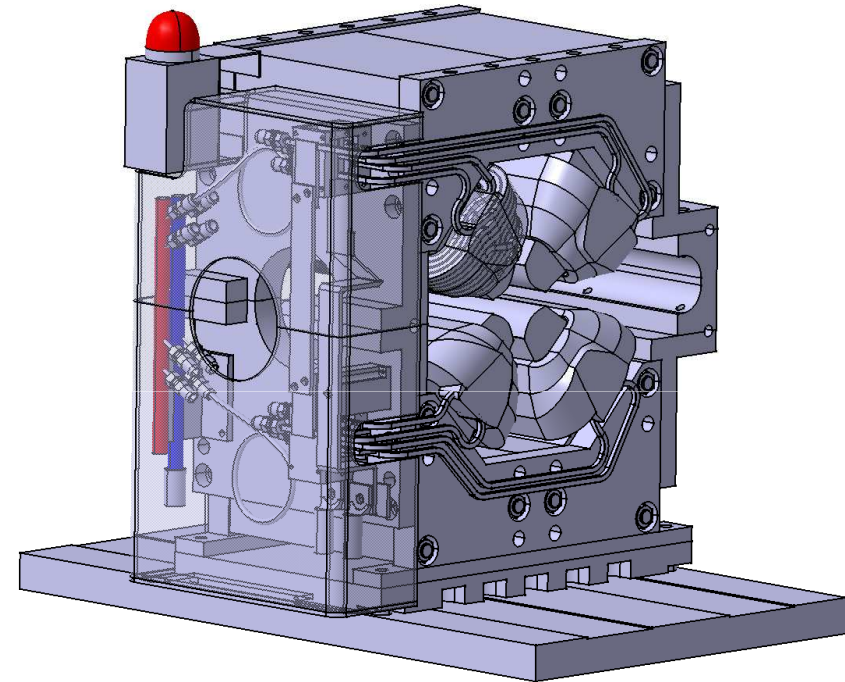


- Définir conducteur
- Nbre de couches/tours
- Résistance électrique
- $\Delta\rho$, Δp
- Tension à chaud
- Alimentation électrique
- Installation hydraulique
- Capteurs de débit, température

Quadrupole SOLEIL

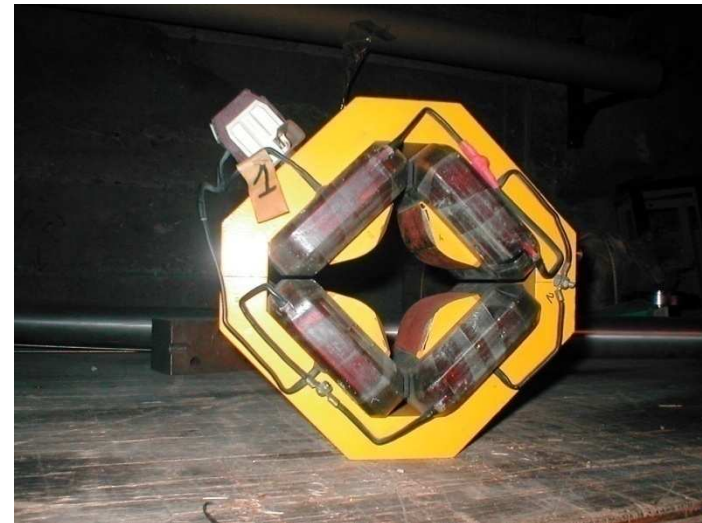


3d Calculation
(Ex: TOSCA)

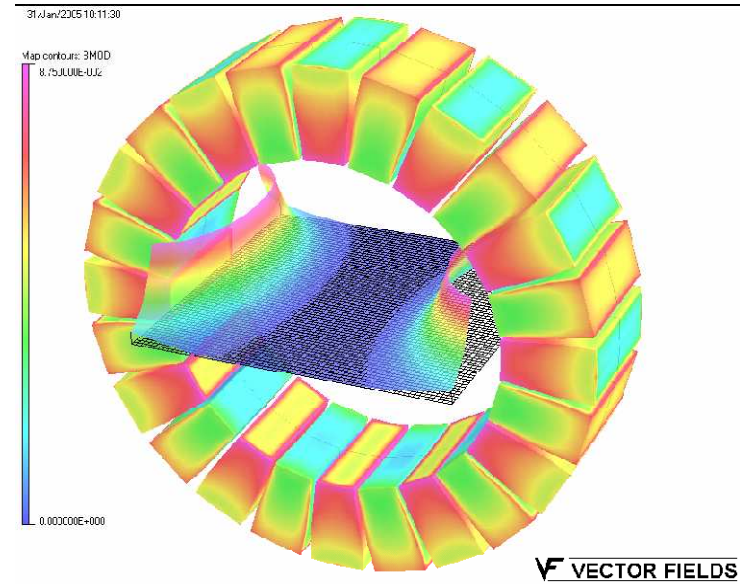
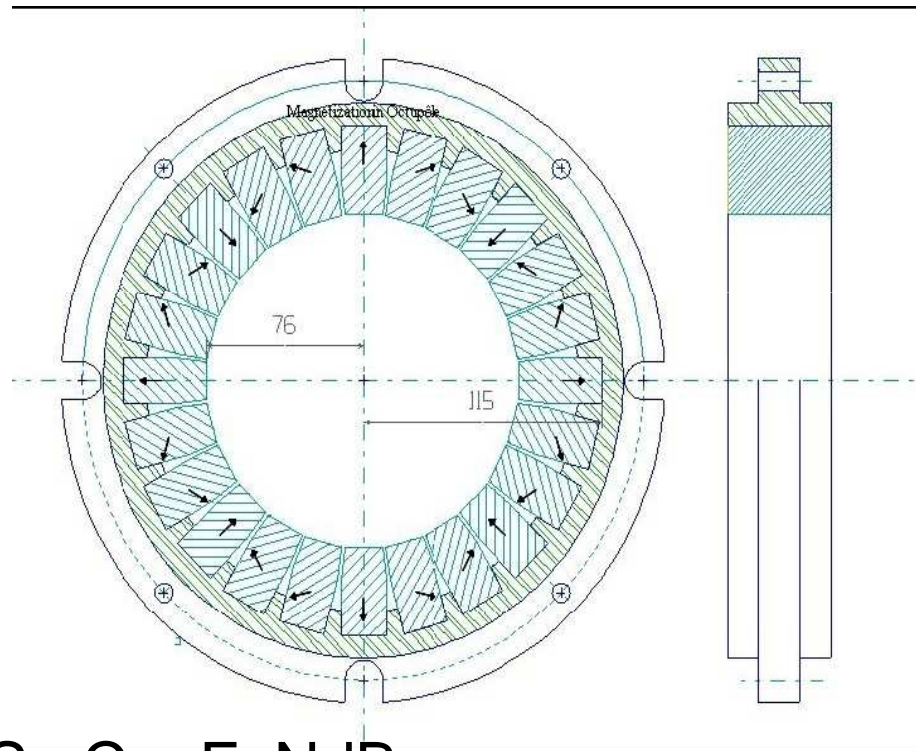


Conception Mécanique
Ex: CATIA

Exemples



Aimants permanents : anneau for Xpoles



SmCo, FeNdB

IRFU : D+ source SPIRAL2
IN2P3 : ECR

Aimant permanent : ligne 8 GeV FNAL

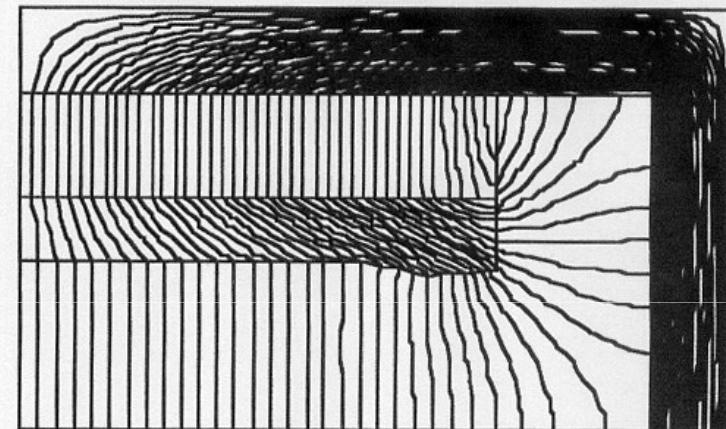
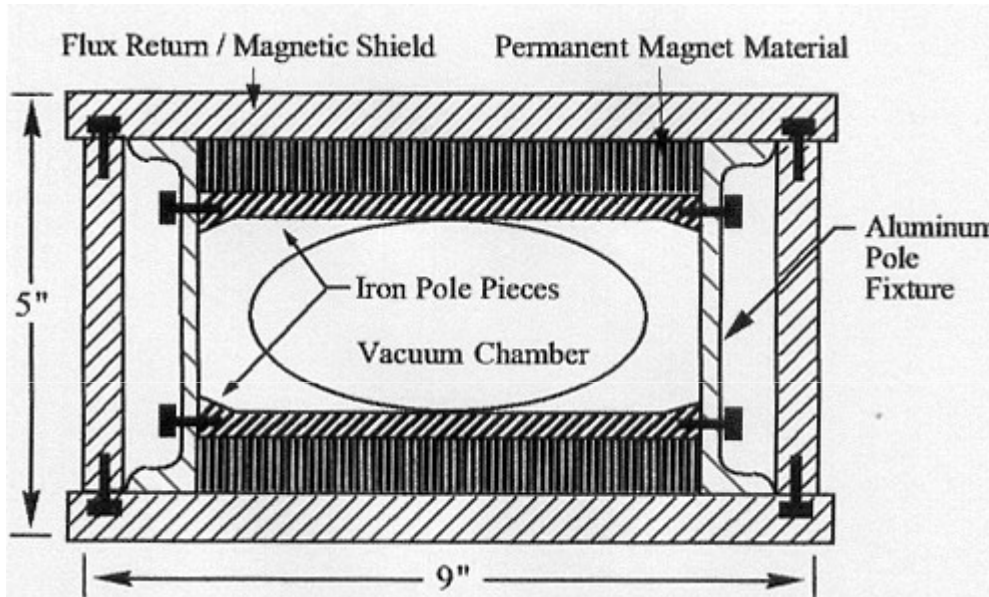
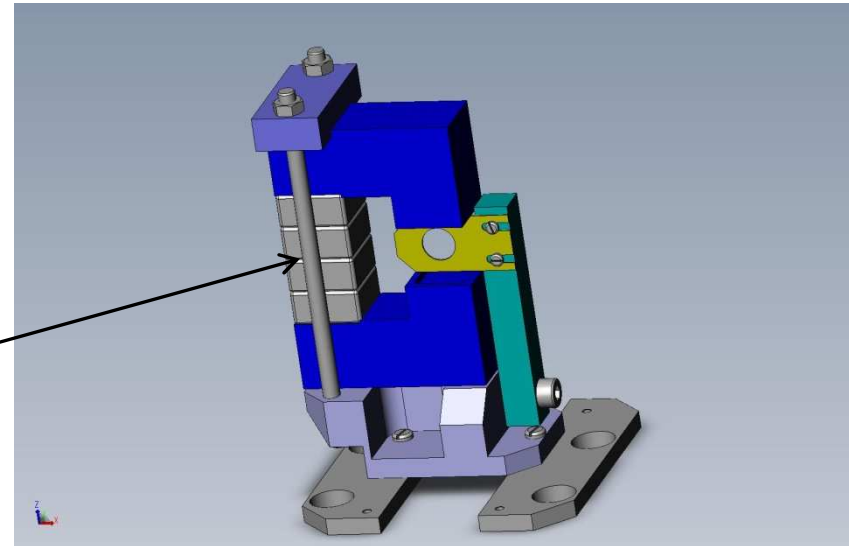
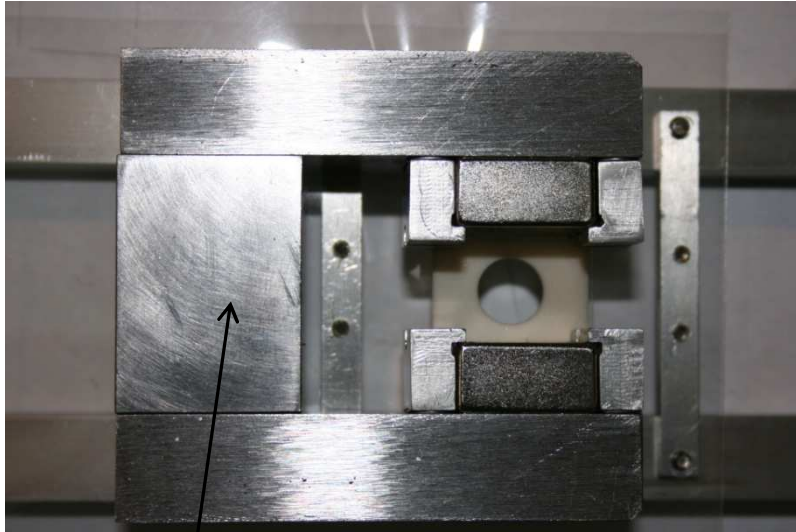


Figure 2: POISSON field map of the upper-right quadrant of the permanent magnet dipole shown in fig.1.

Egalement : QP dans les tubes de glissement des accélérateurs linéaires

Pour les machines à rayonnement synchrotron!

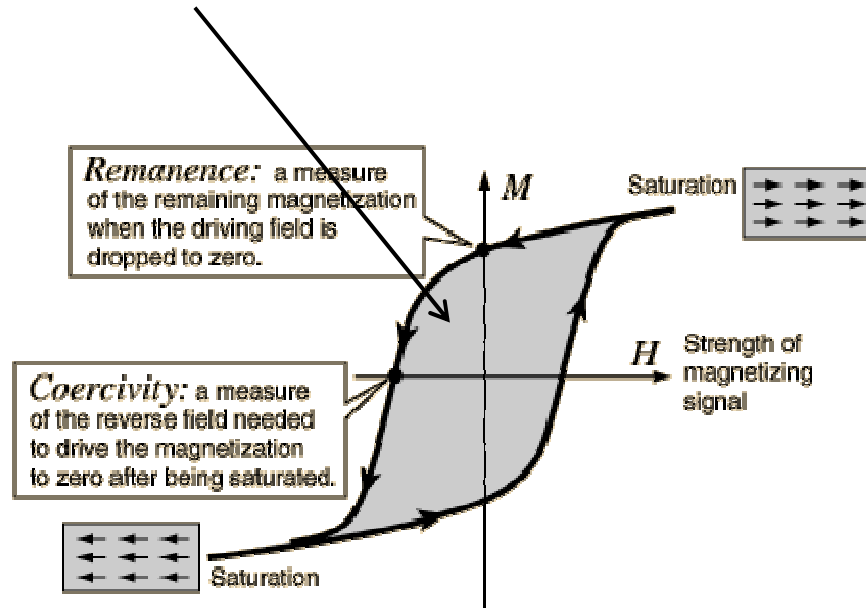
Expérience IPNO



Aimant Permanent
Neodyme

Aimant permanent

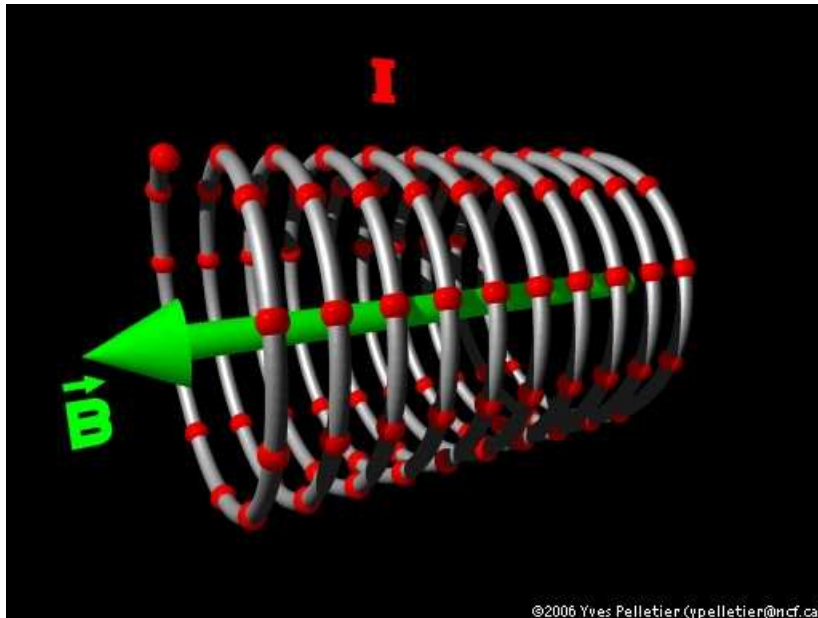
Zone de travail



$$\int_{air} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{iron} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

$NI=0$ donc $H < 0$

Champ axial : solénoïde

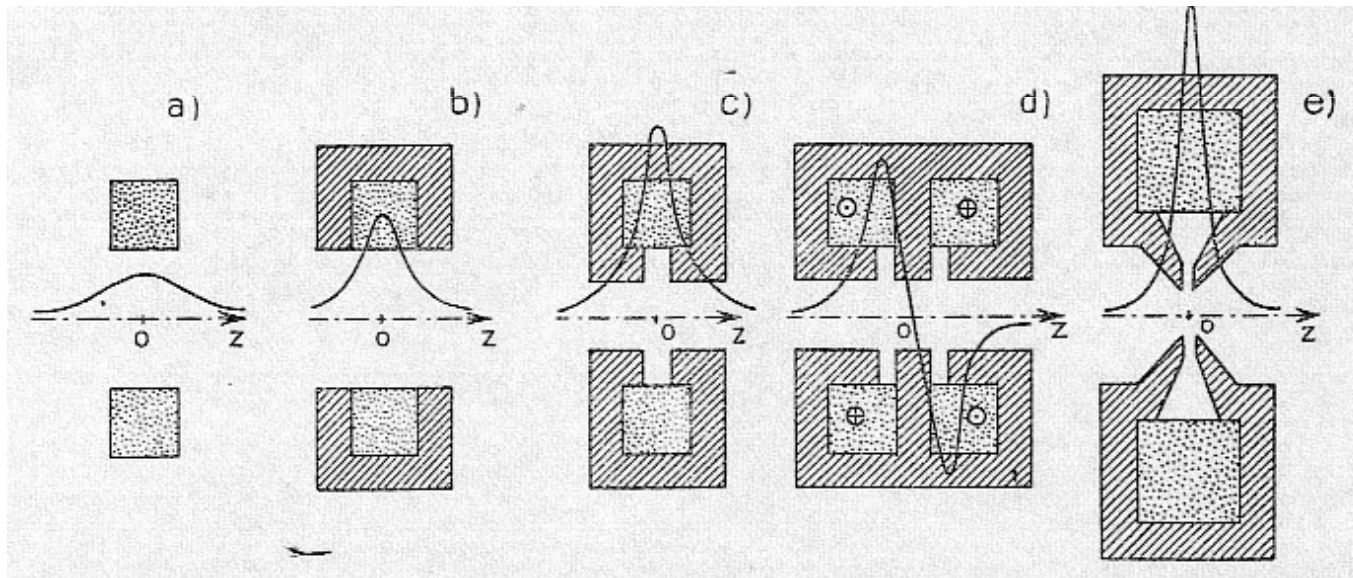


Longueur Infinie :

$$B_0 = \mu_0 n I$$

Champ axial : lentille de Glaser

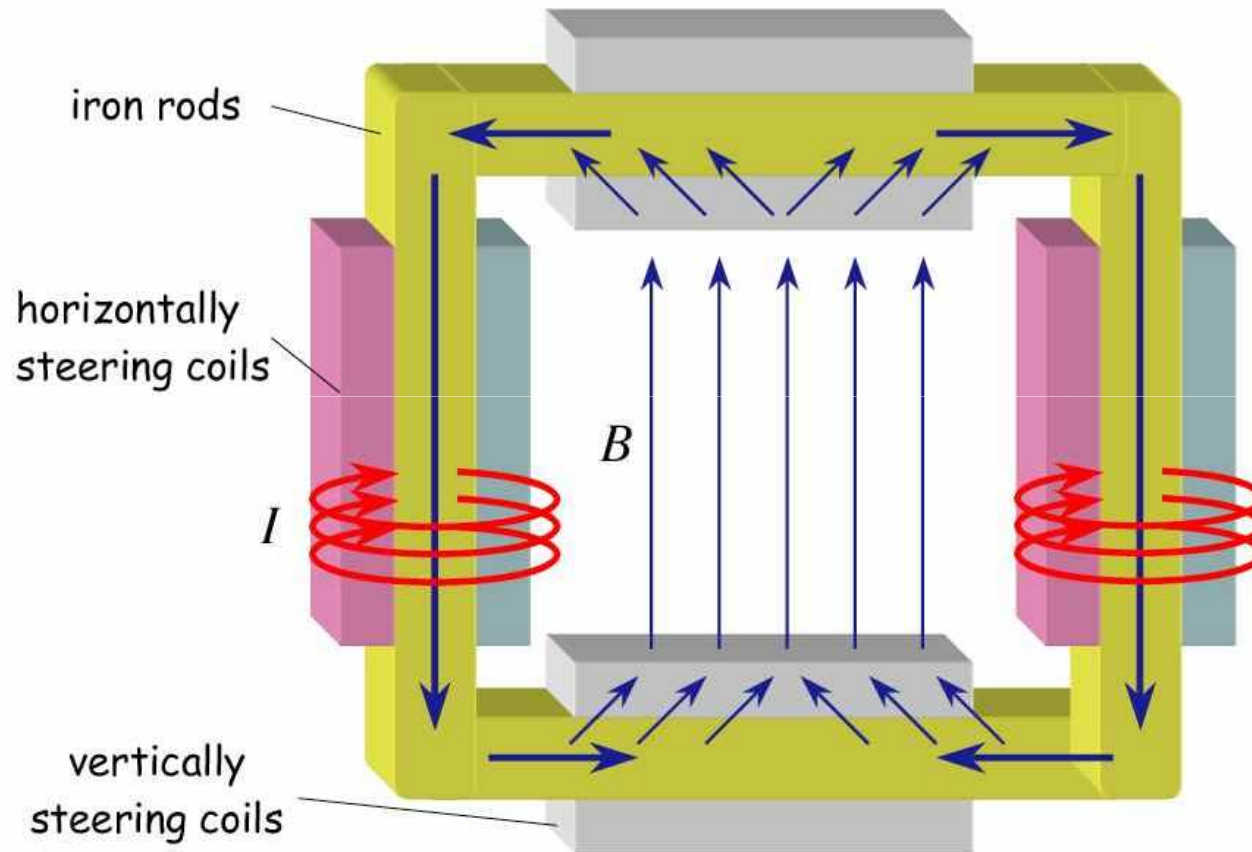
- Compact
- Expression du champ analytique et intégrable



$$B_s \approx B_0 \left(1 + \frac{s^2}{a^2} \right)^{-1}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{\pi a B_0^2}{8(B\rho)^2}$$

Steerer : petites corrections





Codes



- Magnet calculation :
 - POISSON, PANDIRA (freeware, LANL)
 - OPERA 2D, OPERA/TOSCA 3D
 - CASTEM (CEA)

- Trajectoires:
 - ZGOUBI (LNS)
 - TraceWin (IRFU)
 - OPERA

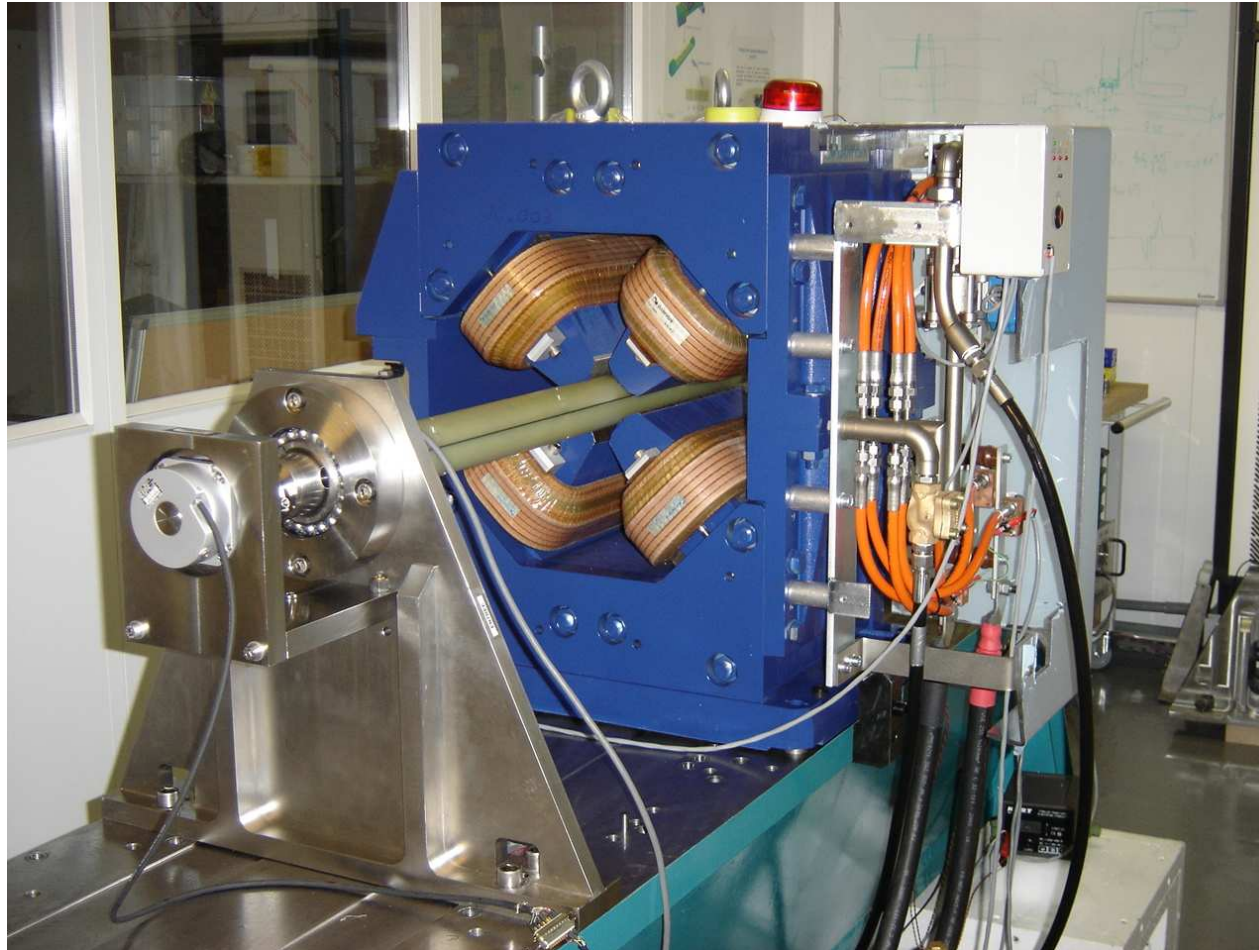
Mesures Magnétiques

- RMN (NMR) : mesure absolue très précise, mais zone de champ homogène nécessaire
- Sonde de Hall probe : pas linéaire, étalonnage nécessaire, aimant extérieur, régulation de température
- Bobines tournantes
- Search coils
- Choisir la meilleure méthode

SOLEIL



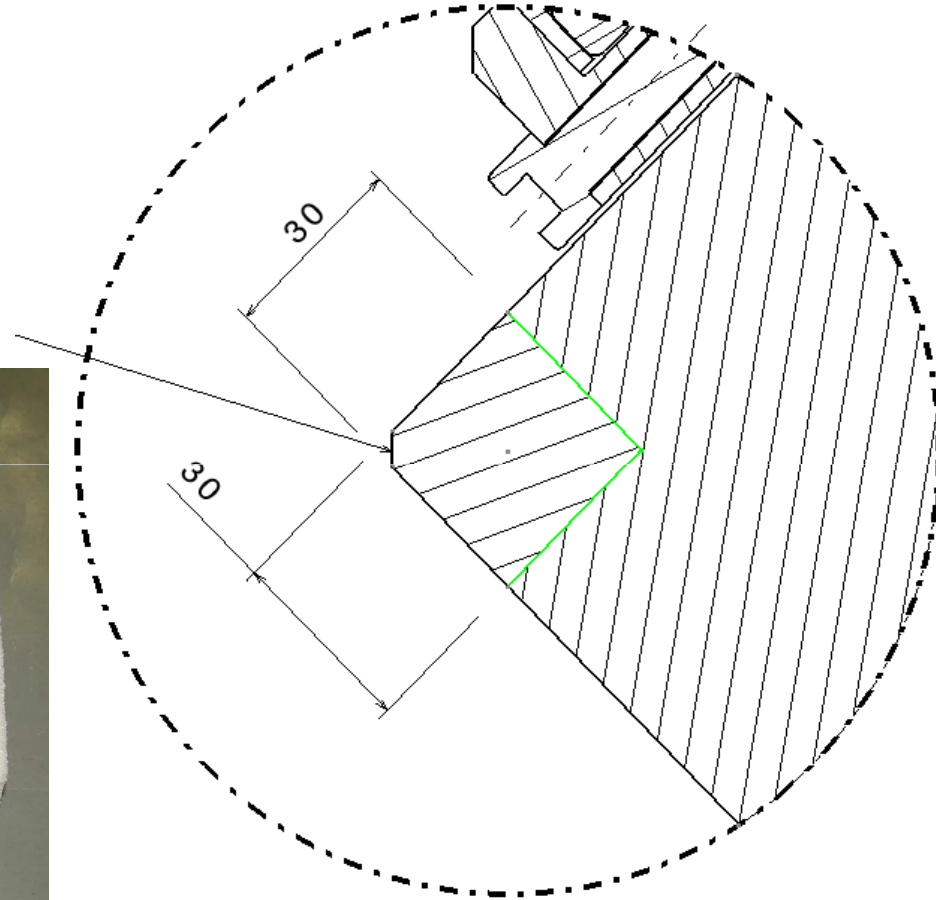
SOLEIL



Optimisation of end tapering

3

Test Chamfer





Bibliographie



- CERN Accelerator School
- Magnétostatique : Durand
- Septier...



Remerciements



- Jean-Marie De Conto (LPSC, Grenoble)
- André Tkatchenko (IPN Orsay)
- Antoine Daël (CEA/IRFU/SACM)
- Beaucoup d'autres auteurs...