



Magnétisme

Aimants Chauds

B. Launé

CNRS/IN2P3/IPNO

B. Launé

Ecole Accélérateurs Bénodet Décembre 2011

Aimants

- Notions de base pour le design d'un aimant
- Aimants à bobines résistives

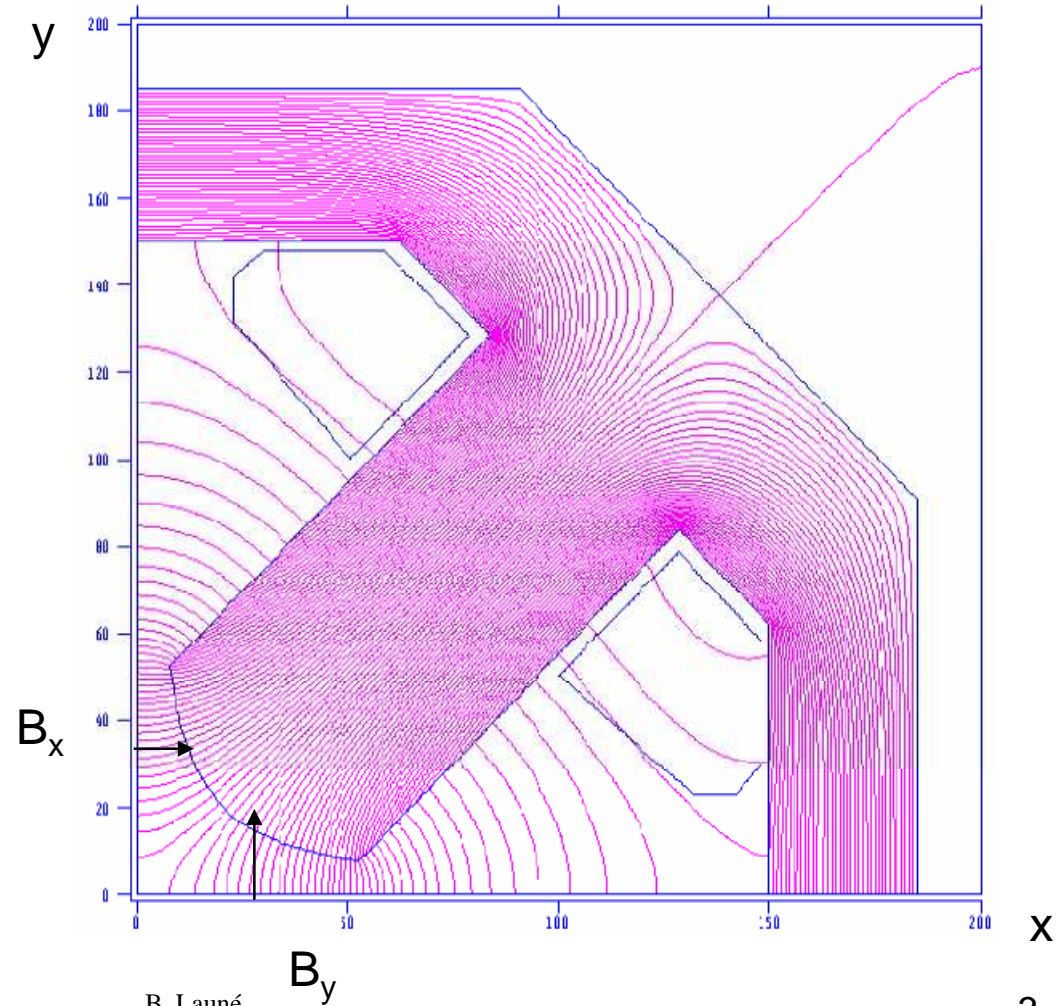
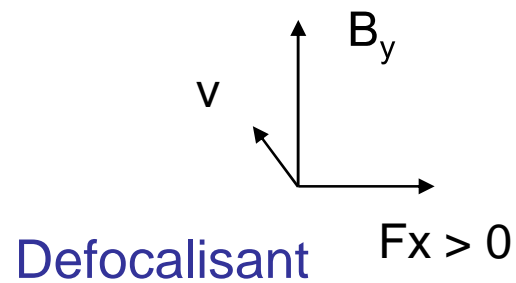
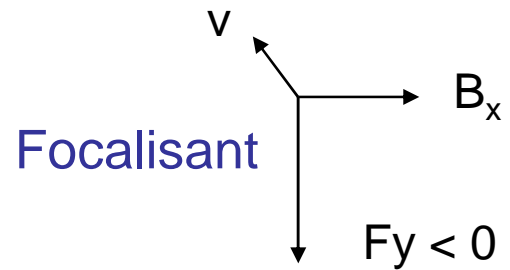
Comment focaliser? Le quadrupole magnétique

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

$$B_x = G_y$$

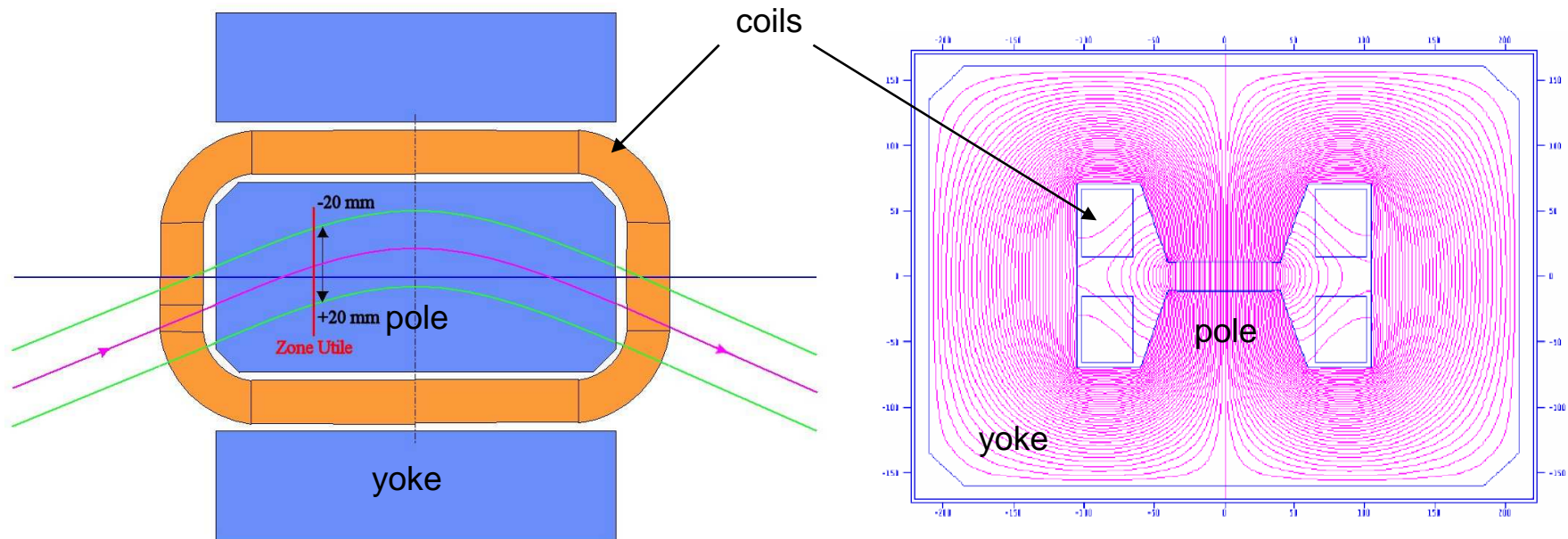
$$B_y = G_x$$

G : gradient (T/m)



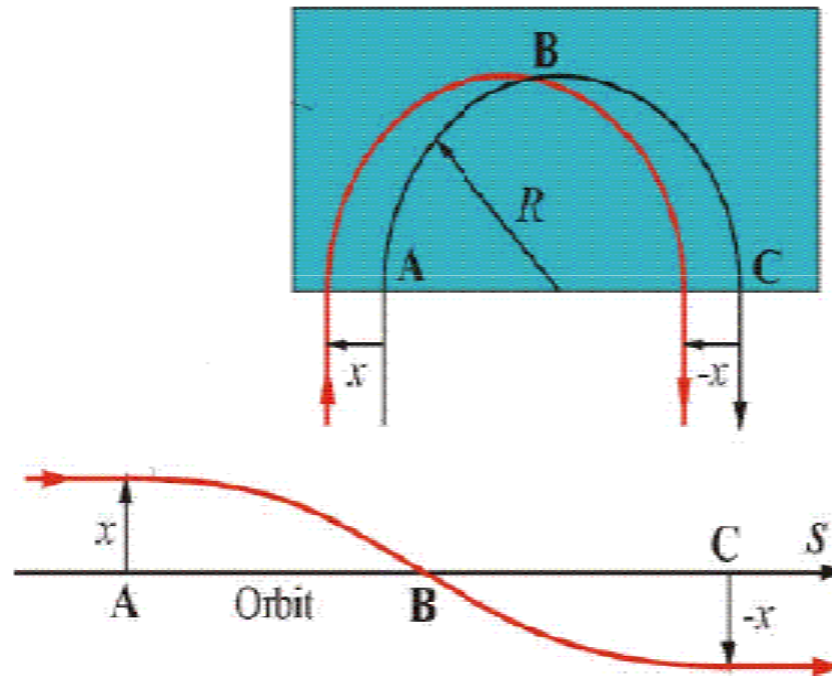
B. Launé

Déviation (Bending): dipole

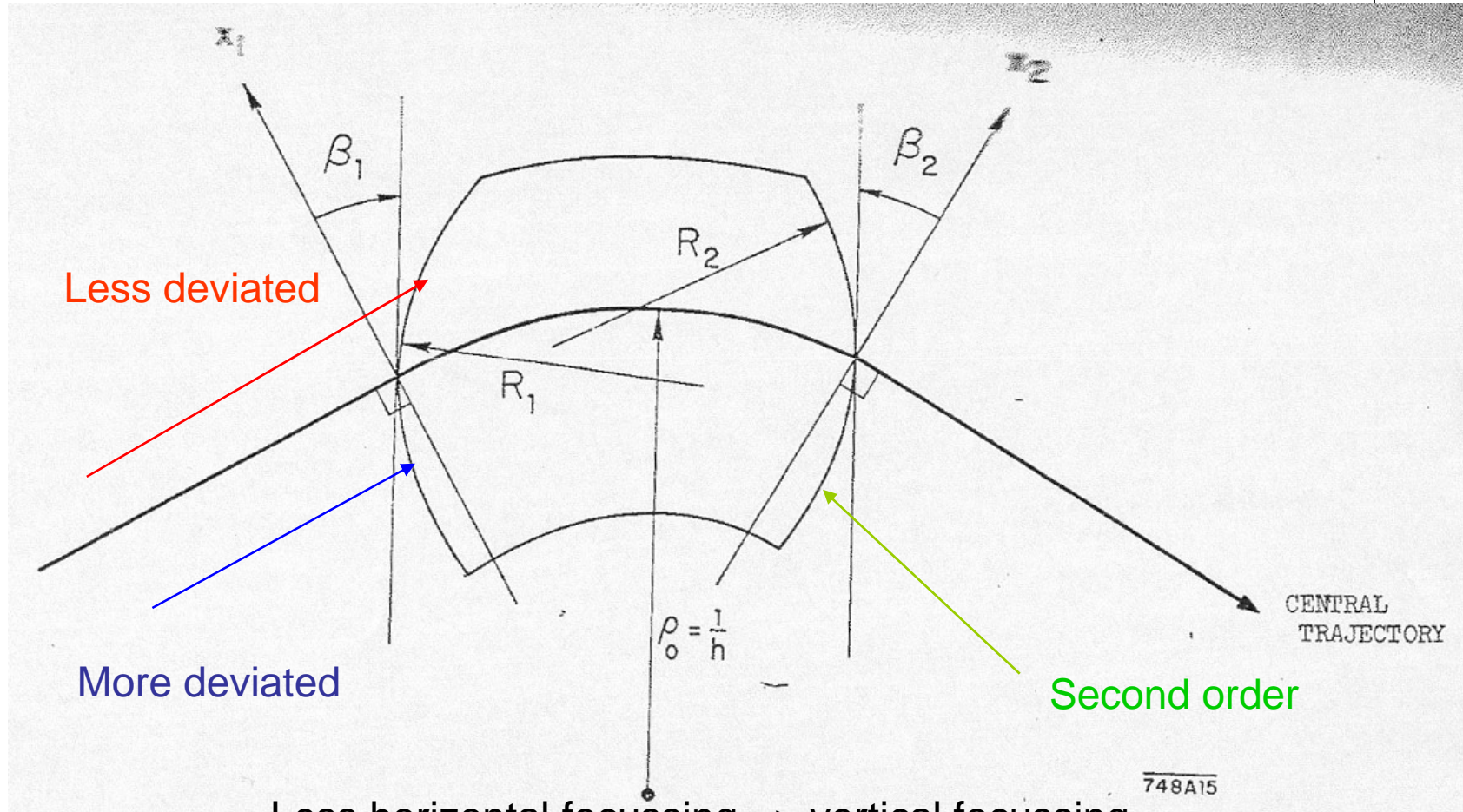


Yoke : culasse
Coil : bobine

Dipole : focalisation



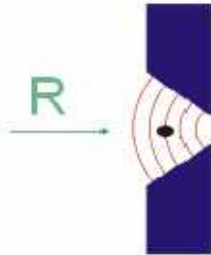
Edge focussing



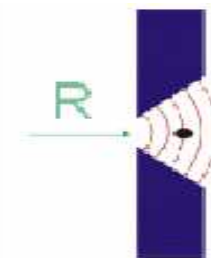
Less horizontal focussing => vertical focussing

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

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D} &= \rho & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{E} &= -\operatorname{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} & \vec{B} &= \operatorname{rot} \vec{A} \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

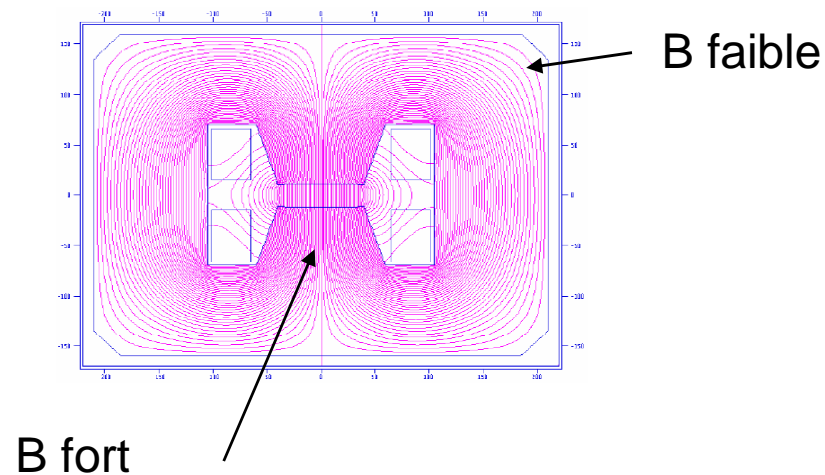
B_{\perp} and H_{\perp} : composantes continues

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



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 : permeabilité 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 :

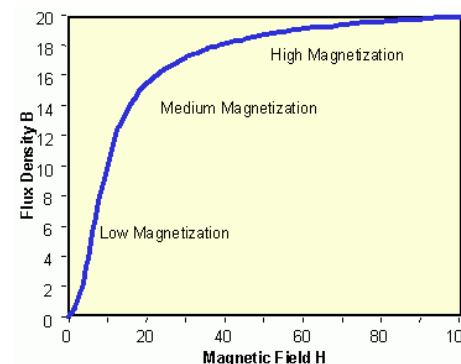
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$$

M : magnétisation

Saturation du fer! Max M=2.14 T

NON LINEAIRE!

Prédictions difficiles!



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

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

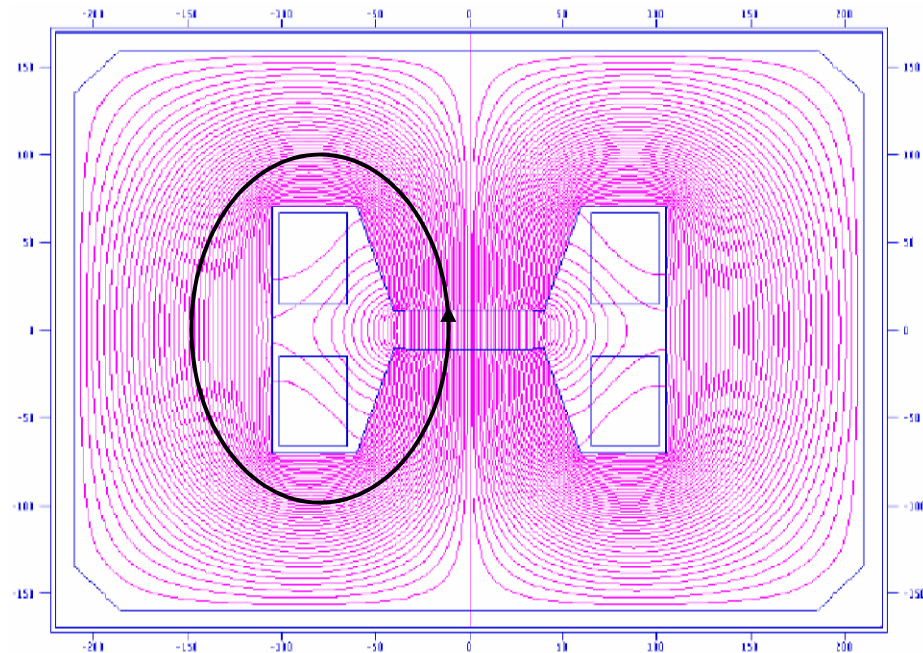
$$\int_{\text{air}} \frac{\vec{B}}{\mu_{\text{air}}} \cdot d\vec{l} + \int_{\text{iron}} \frac{\vec{B}}{\mu_{\text{iron}}} \cdot d\vec{l} = NI$$

↑
faible

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

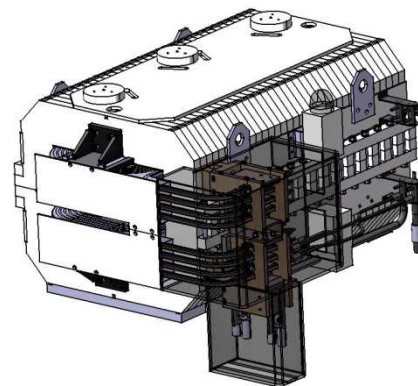
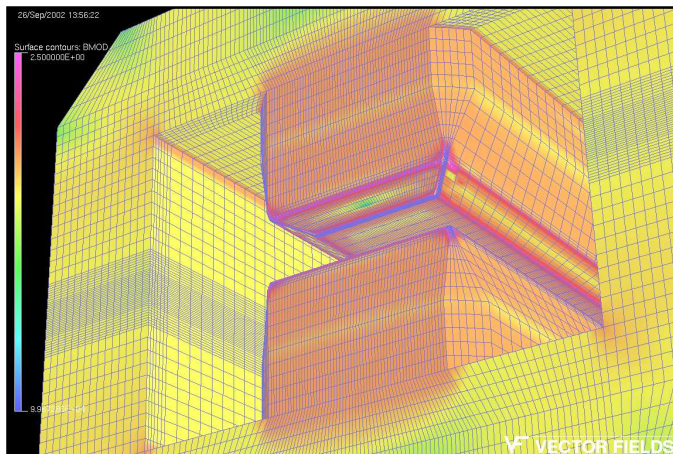
d : gap ou entrefer

NI : Ampère-tours



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

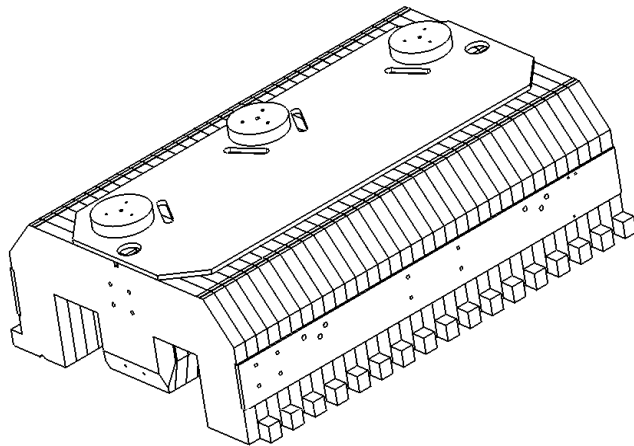
Dipôle magnétique



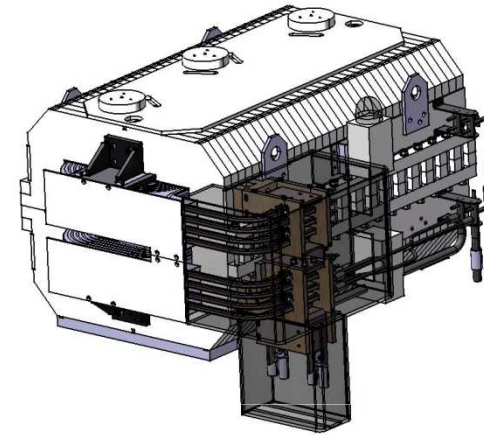
Historique d'un aimant

- calcul 2D (POISSON, OPERA2D)
- calcul 3D (OPERA3D, TOSCA)
- Optimisation (avec les bobines)
- Conception mécanique (CATIA..)
- Construction
- Mesures
- Alignement

Construction aimant (SOLEIL)



Vue isométrique
Echelle : 1:5



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

1

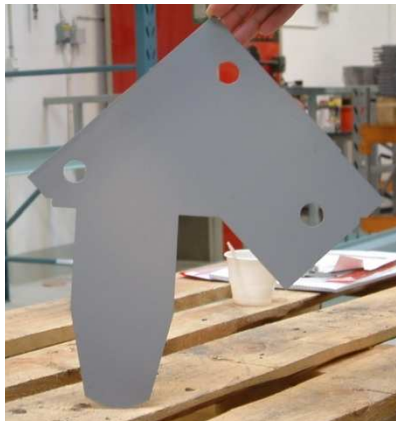


2



2p3

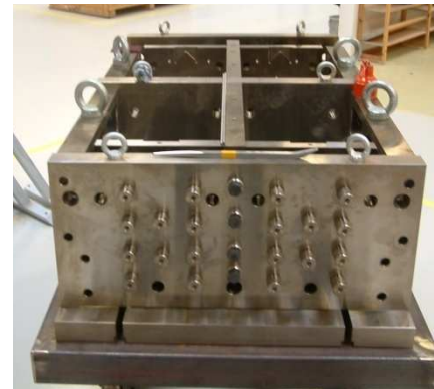
3



4



5



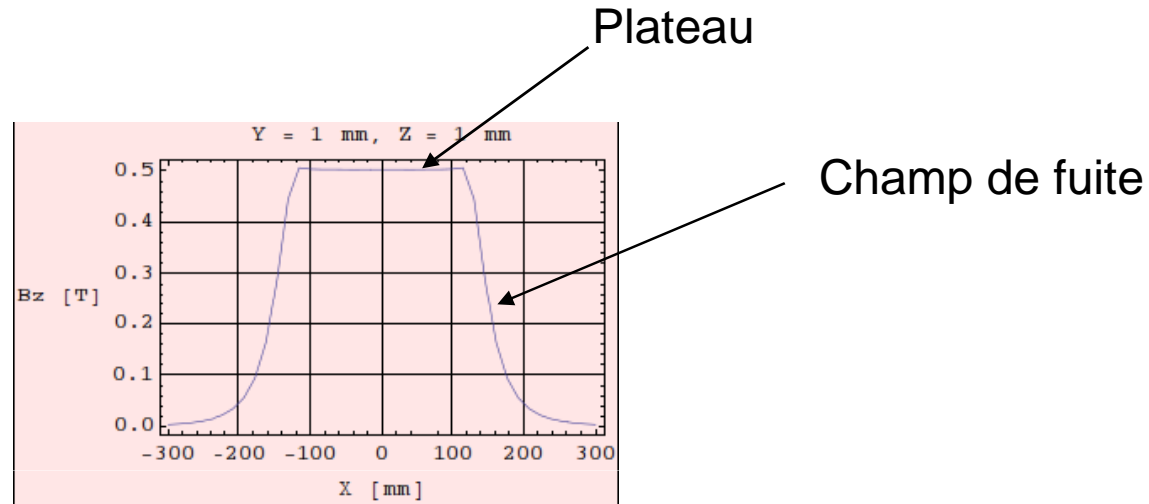
6



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

QP fabrication (Danfysik)

Intégrale de champ

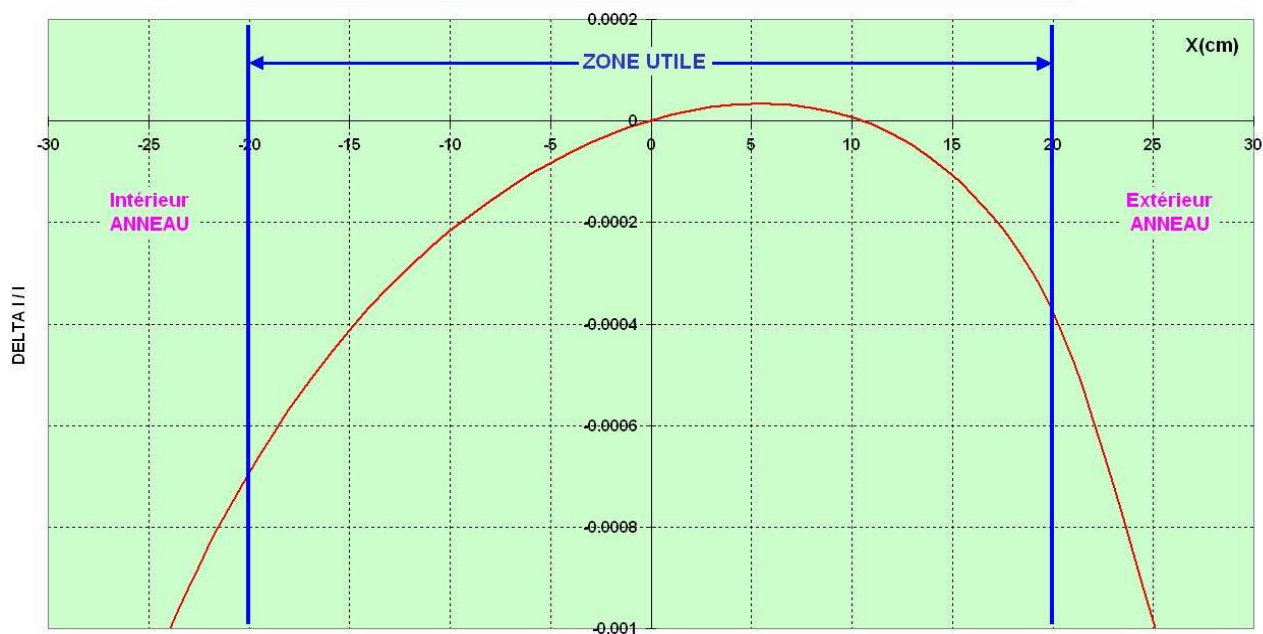


Longueur magnétique :
$$l_m = \frac{1}{B_0} \int B \cdot dl$$

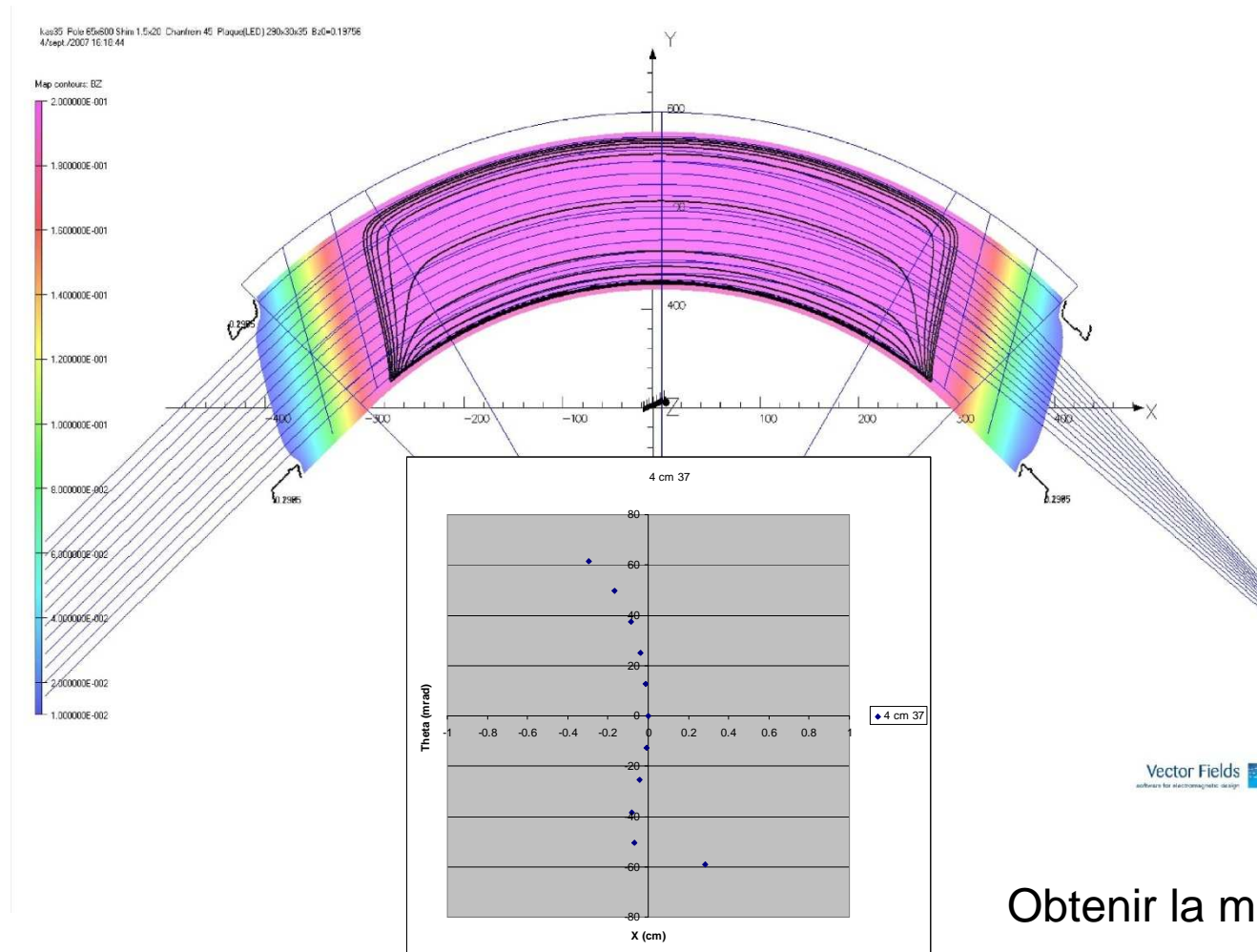
Angle de déviation :
$$\theta = \frac{\int B \cdot dl}{B\rho}$$

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



Obtenir la matrice exacte

B. Launé

Ecole Accélérateurs Bénodet Décembre 2011

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

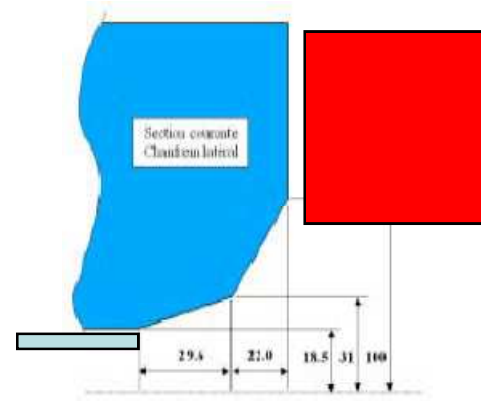
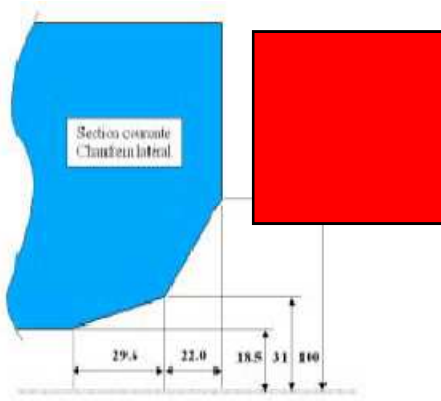
$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta}{\rho} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\tan(\beta-\psi)}{\rho} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

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

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



Chanfrein

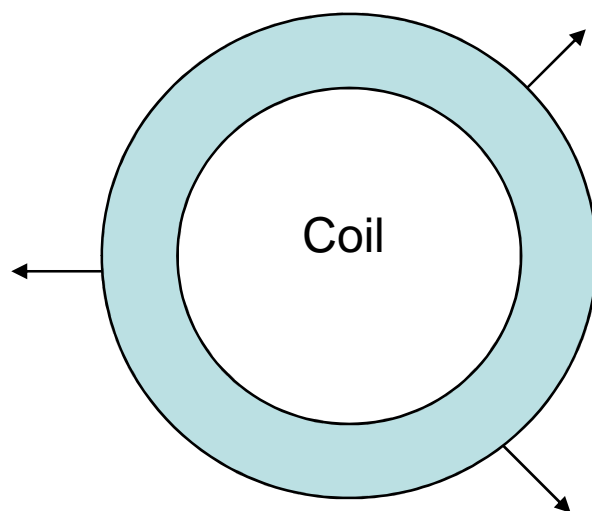
Latéral : améliorer la zone utile (saturation)
Extrémités: ajuster la longueur magnétique
Longueur magnétique = longueur de fer

shimming

Améliorer la zone utile
Précision sur le champ importante!

Force sur les conducteurs : Hoop stress

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

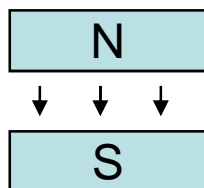


Loi du flux maximum
(Loi de Lenz)

Forces (II)

Forces sur l'acier : intégrale

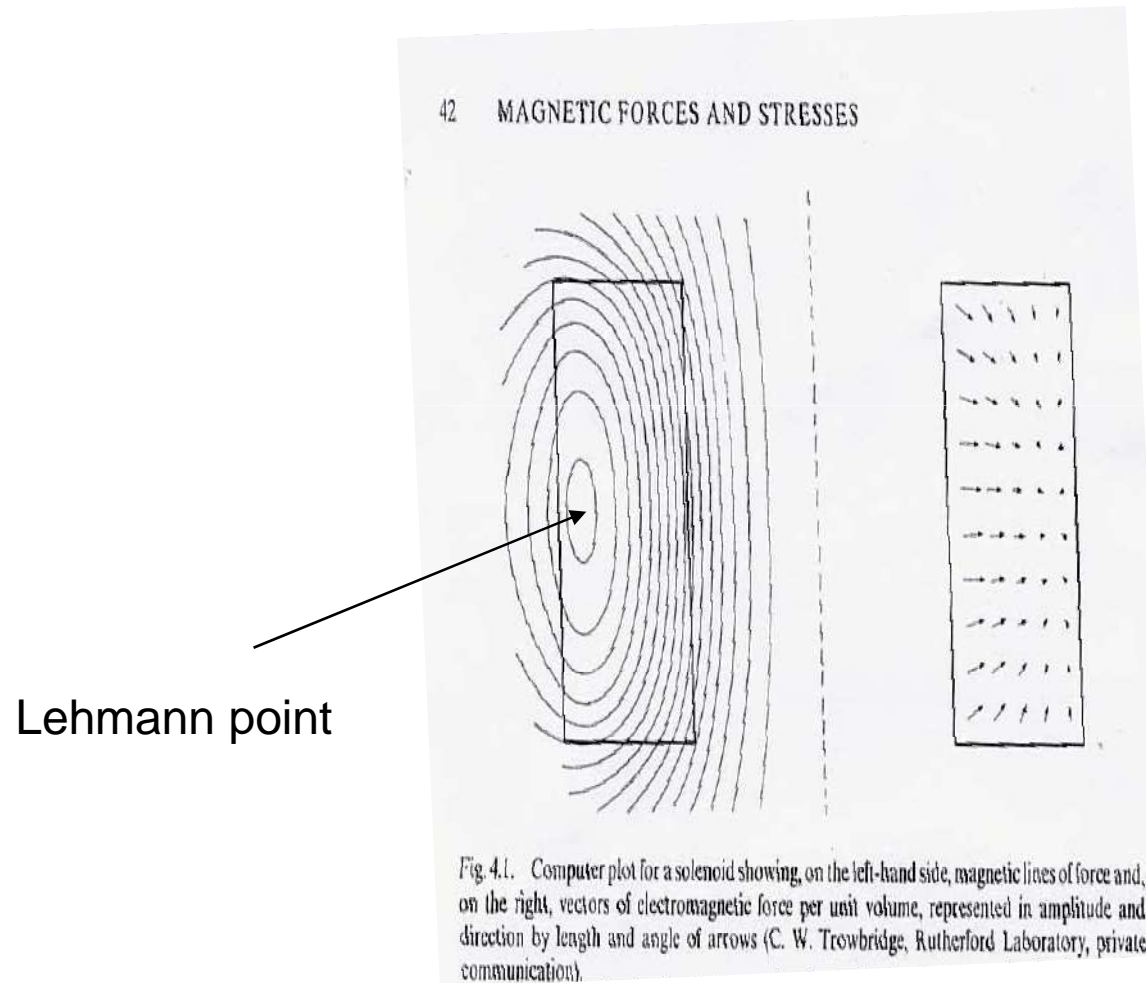
$$\vec{F} = \mu_0 \int_S [(\vec{n} \cdot \vec{H}) \cdot \vec{H} - \frac{1}{2} \vec{n} (\vec{H})^2] ds$$



force portante :

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

Forces (III)



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)

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

Différents types d'aimants

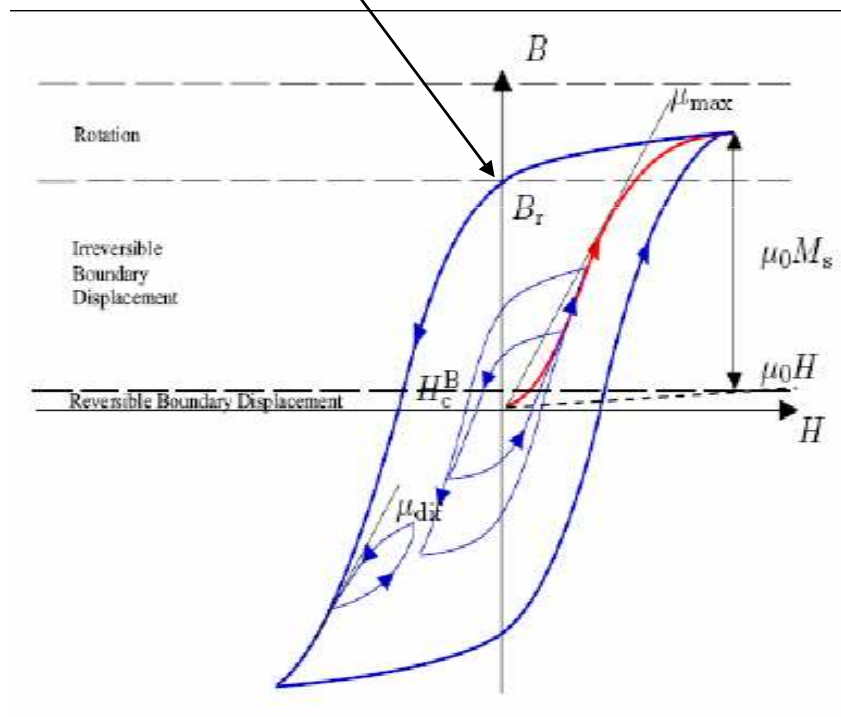
Standard Dipole Geometries

	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

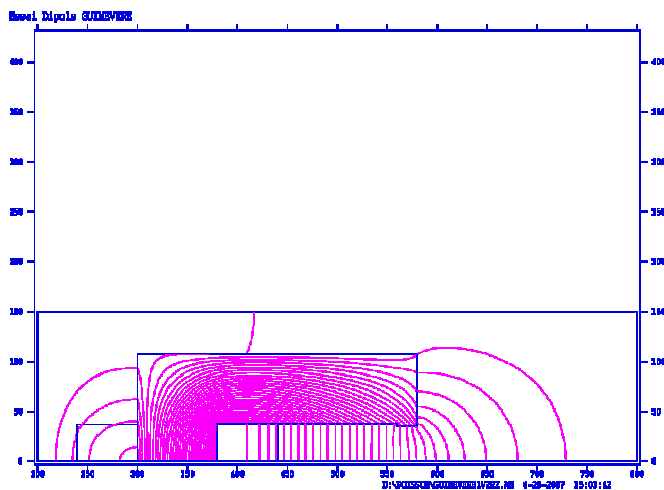
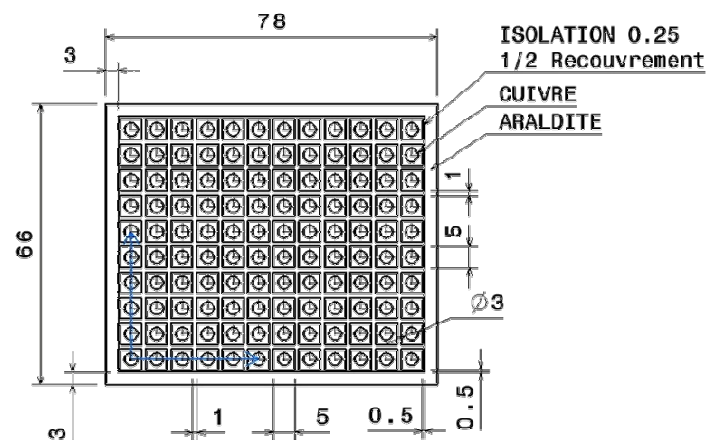
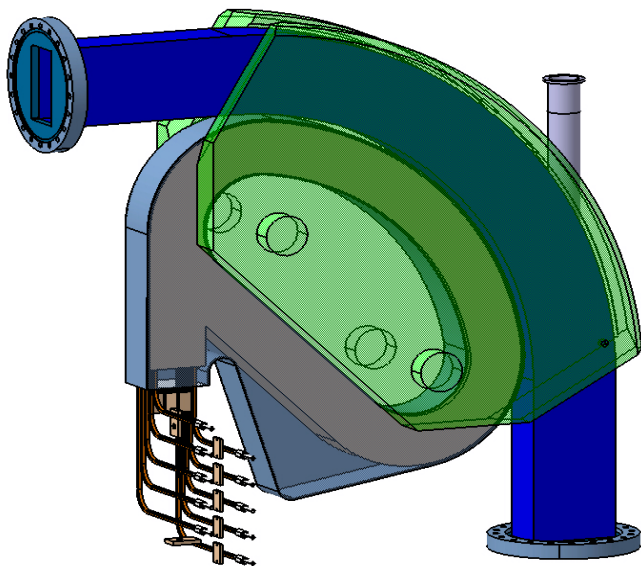
Hystérésis

Champ rémanent

Alimenter les bobines en négatif pour annuler si nécessaire



Dipôle GUINEVERE

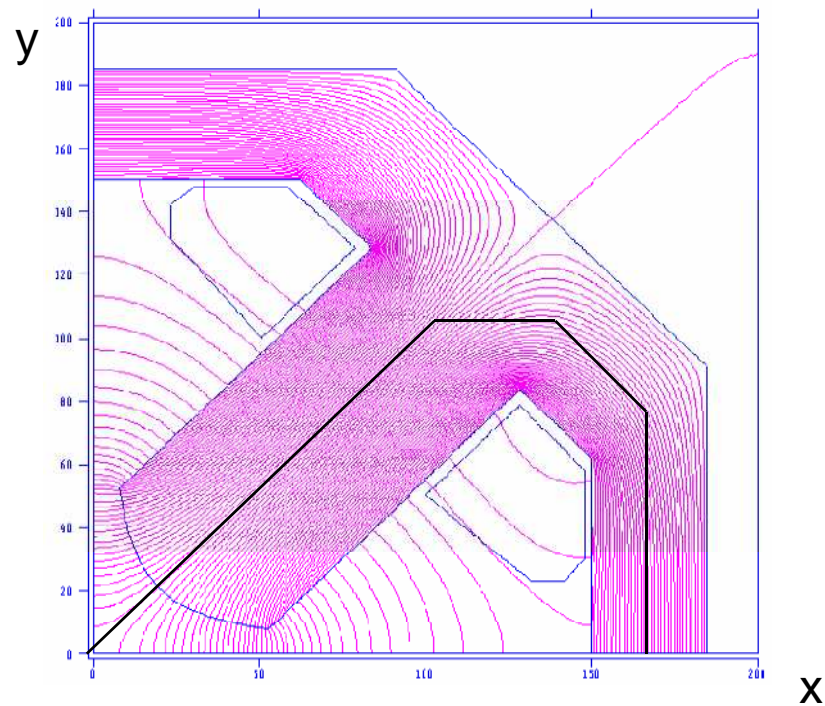


Bobines et
Alimentations à
étudier ensemble

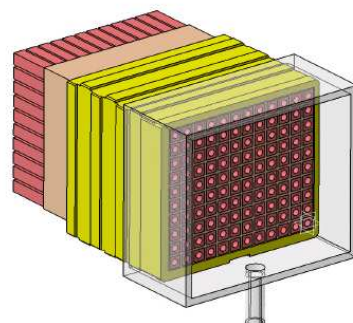
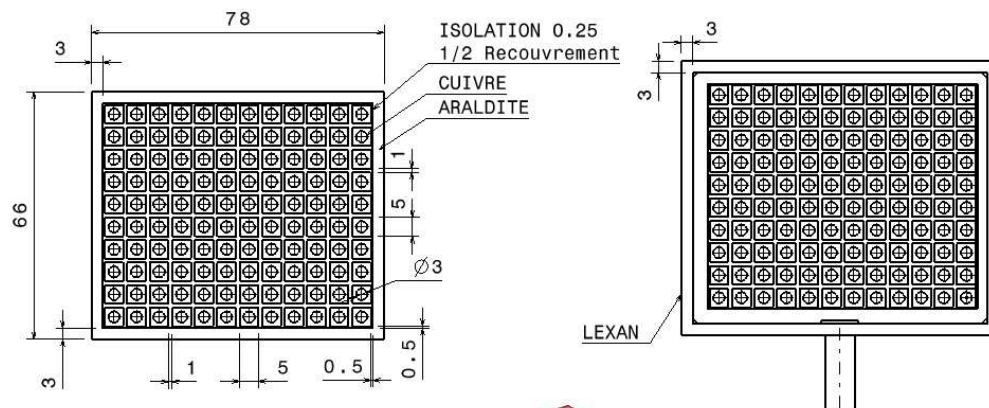
Calcul d'un quadrupole

théoreme d'Ampère
Avec μ_∞

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

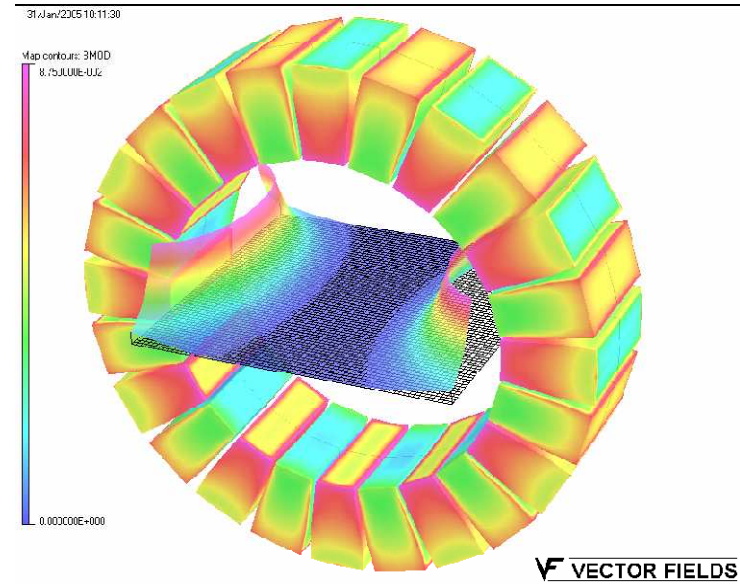
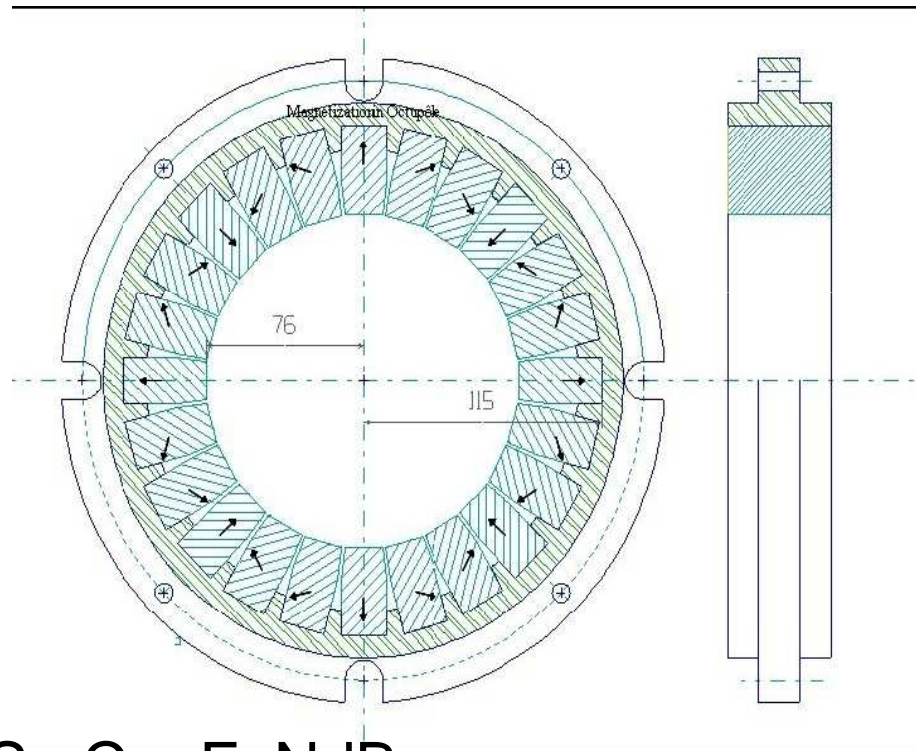


Calcul des bobines



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

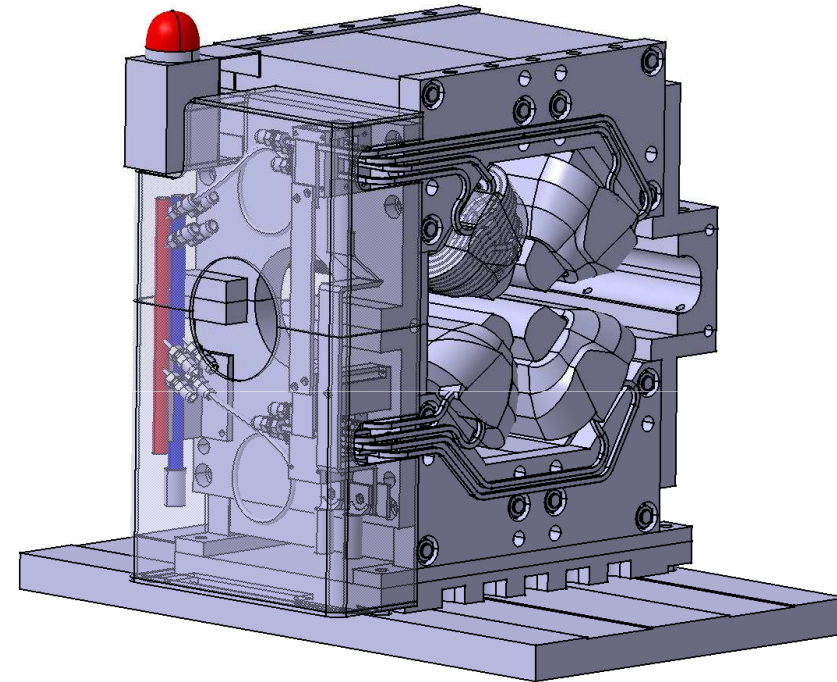
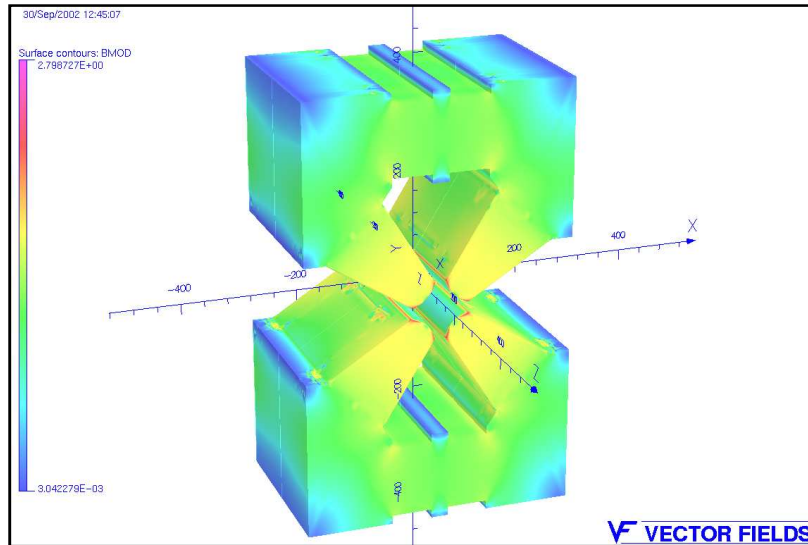
Aimants permanents : anneau for Xpoles



SmCo, FeNdB

IRFU : D+ source SPIRAL2
IN2P3 : ECR

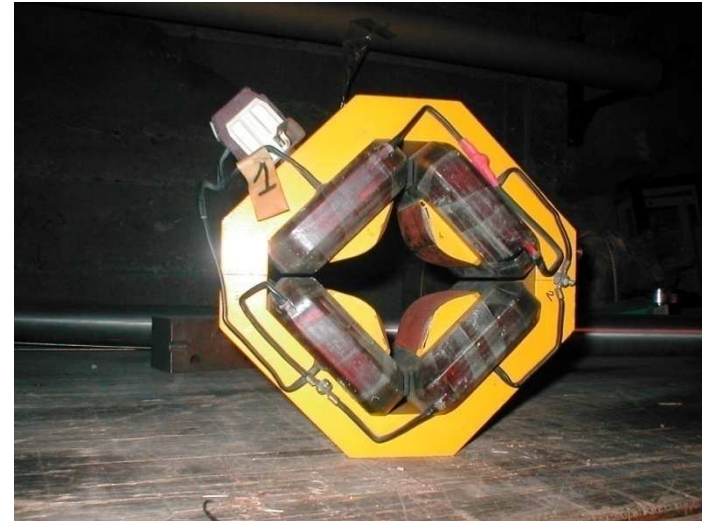
Quadrupole SOLEIL



3d Calculation
(Ex: TOSCA)

Conception Mécanique
Ex: CATIA

Exemples



Aimant permanent : ligne 8 GeV FNAL

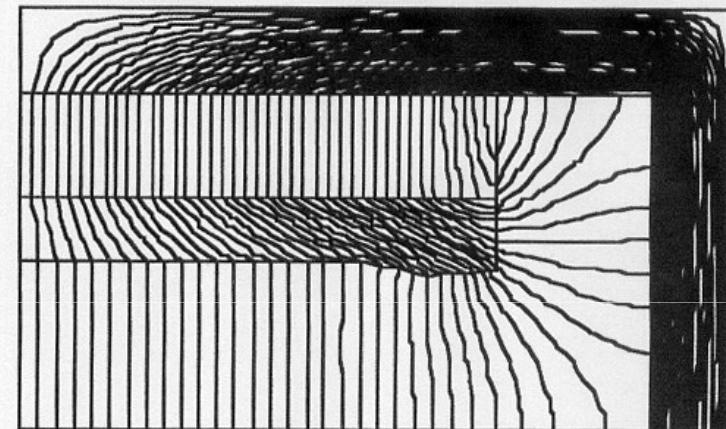
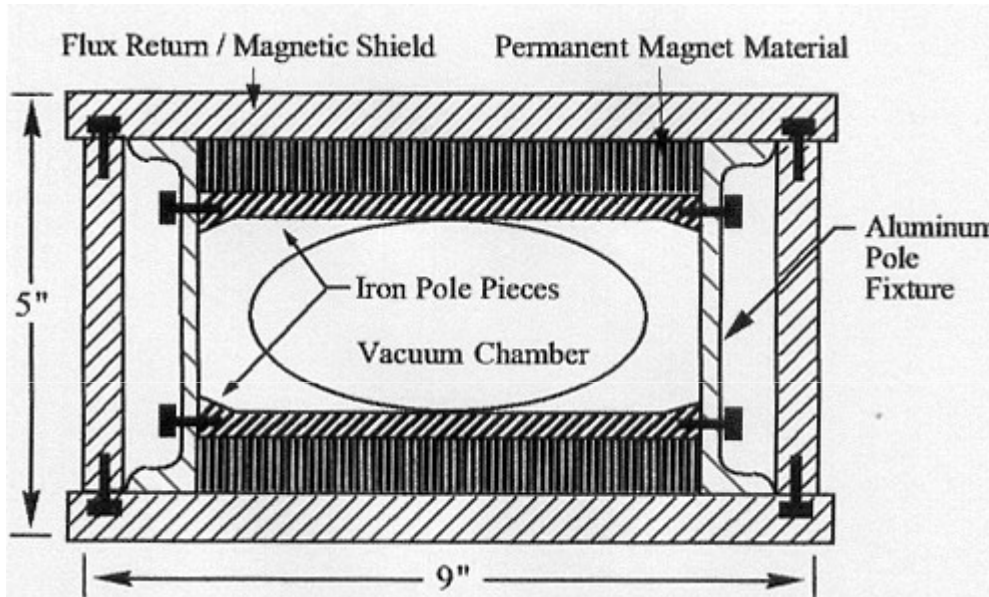
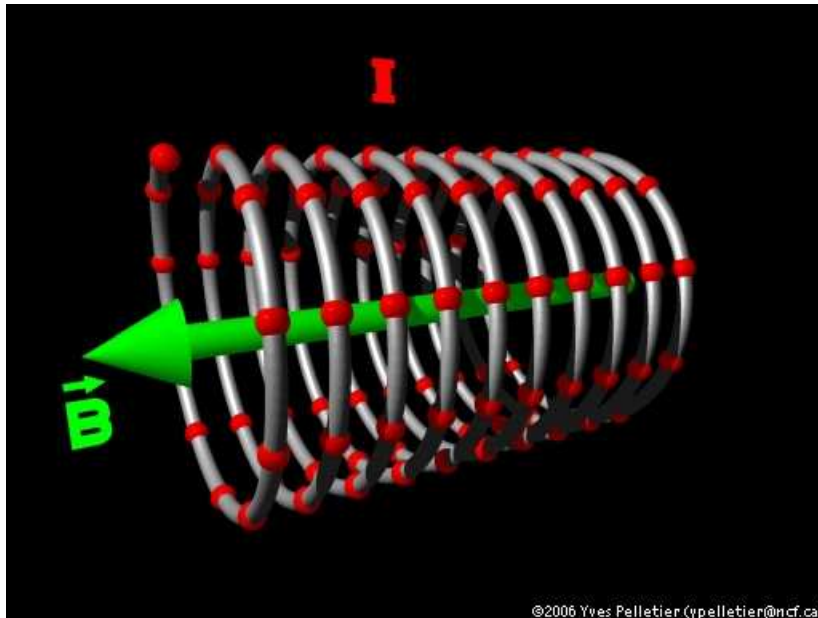


Figure 2: POISSON field map of the upper-right quadrant of the permanent magnet dipole shown in fig.1.

Egalement : QP dans les tubes de glissement des accélérateurs linéaires

Champ axial : solénoïde

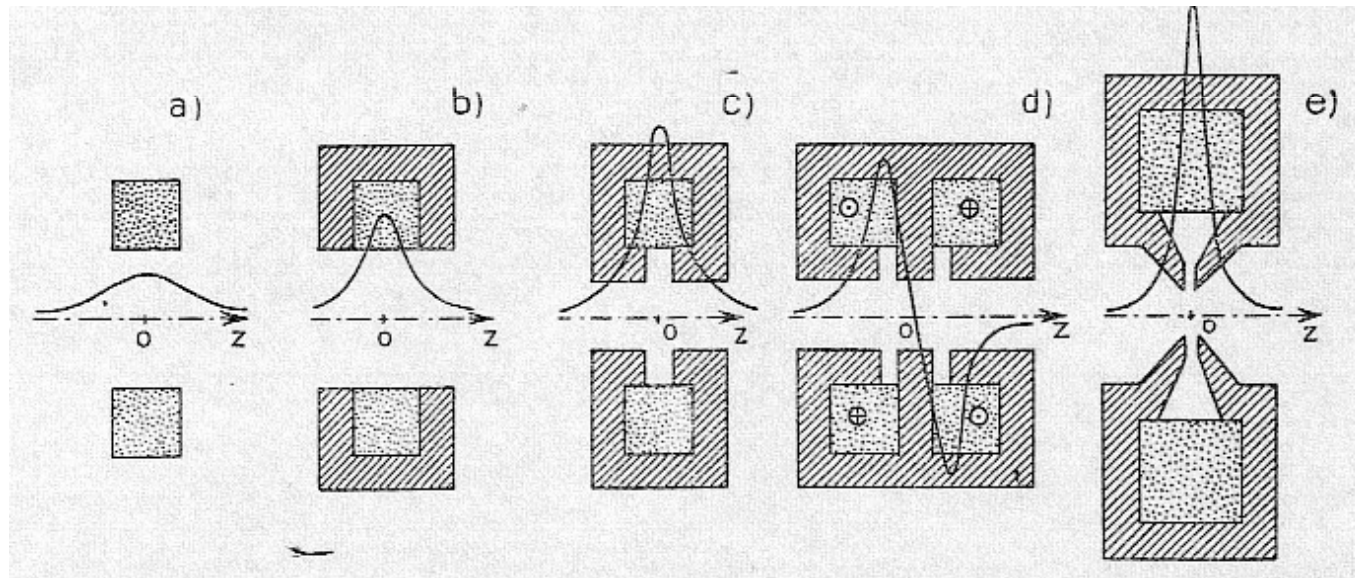


Longueur Infinie :

$$B_0 = \mu_0 n I$$

Champ axial : lentille de Glaser

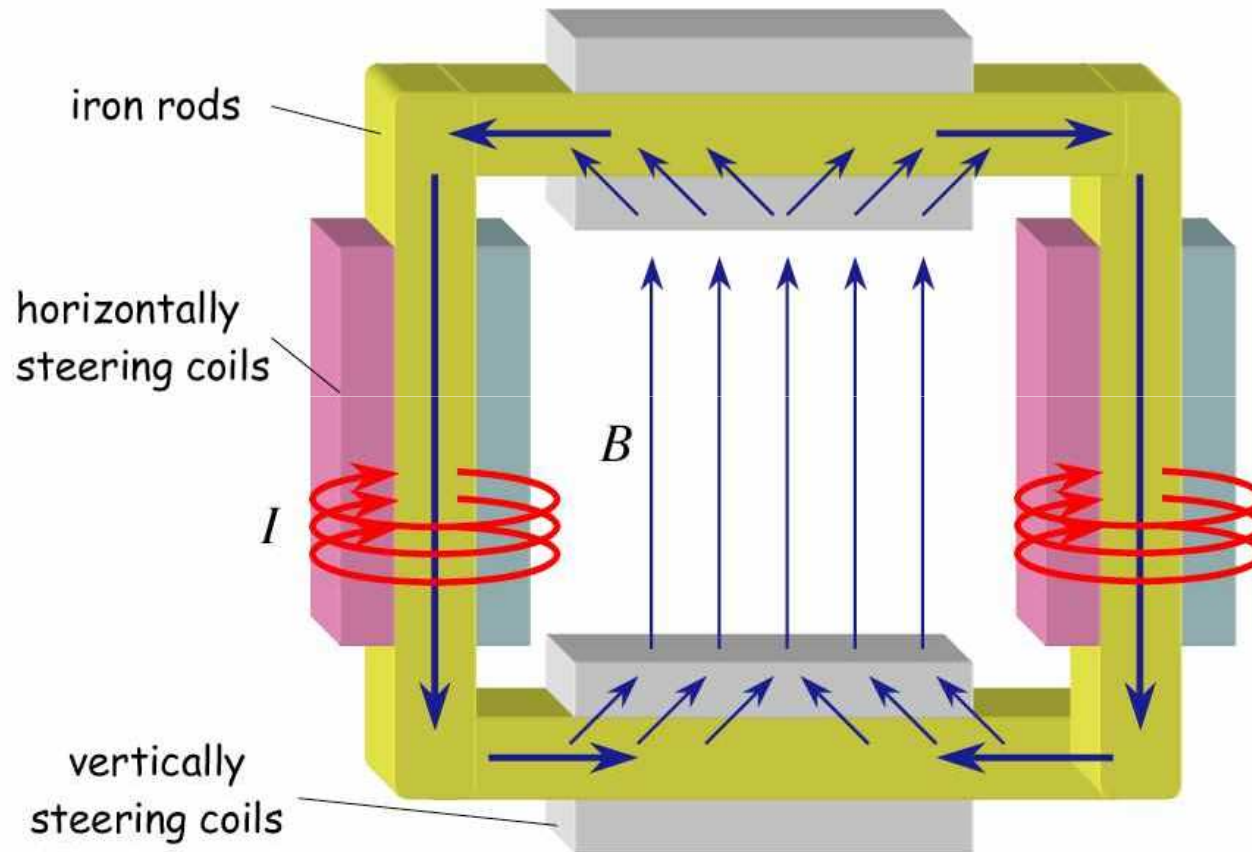
- Compact
- Expression du champ analytique et intégrable



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

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

Steerer : petites corrections



- Magnet calculation :
 - POISSON, PANDIRA, OPERA 2D
 - OPERA/TOSCA 3D
- Transport :
 - TRANSPORT/TURTLE
 - MAD
 - TraceWin
 - BETA
 - TRACE3D
 - COSY
 -



Remerciements



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



Bibliographie



- CERN Accelerator School
- Notices TRANSPORT (PSI)
- Magnétostatique : Durand

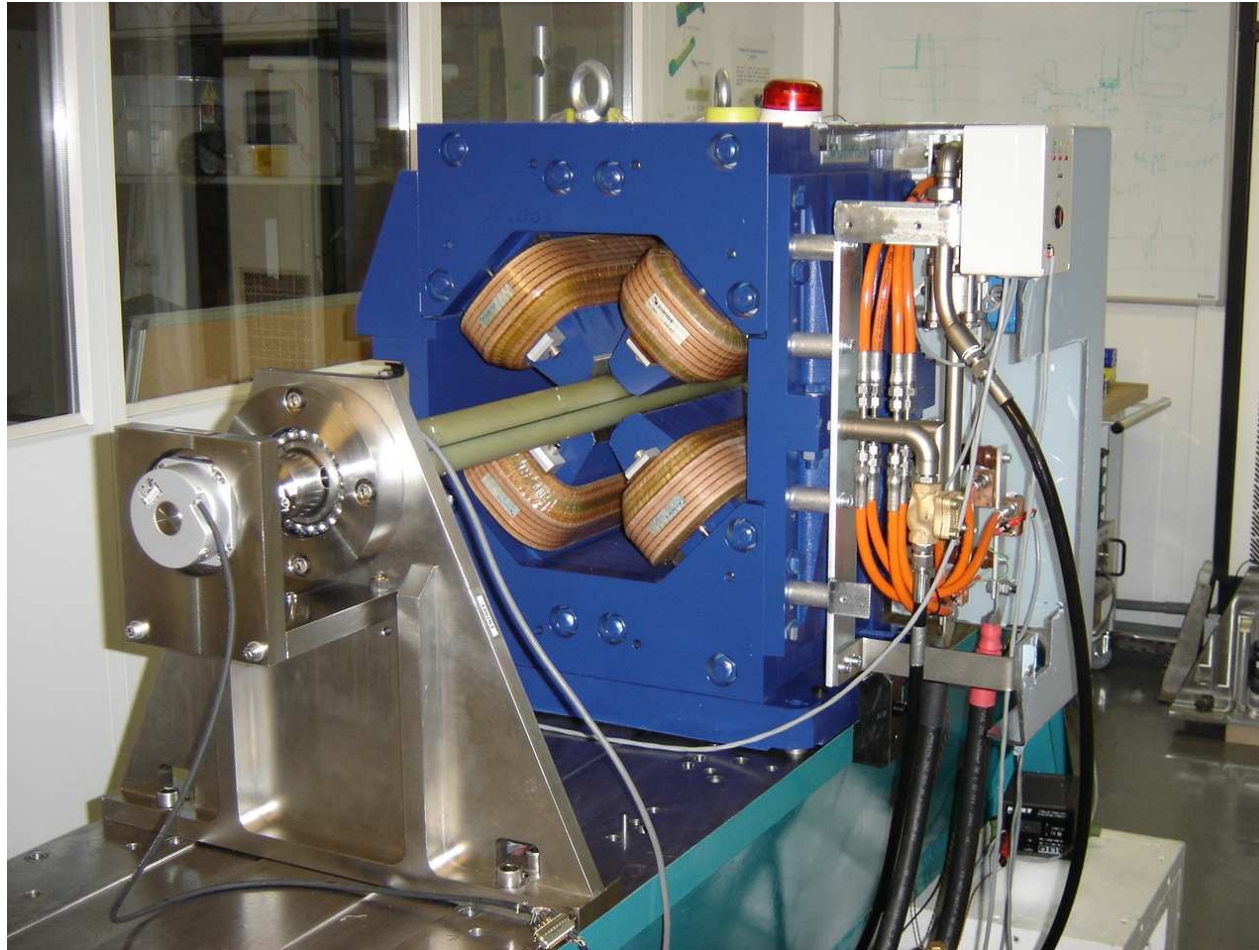
Mesures Magnétiques

- 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

