

Plan

1. Introduction : définitions, principes physiques
 1. Terminologie
 2. Éléments d'optique
 3. Éléments de magnétostatique / électricité
 4. Éléments de mécanique et thermique
2. Conception des électro-aimants pour accélérateur
 1. Les outils : CAO et éléments finis
 2. Dipôles / steerers
 3. Quadripôles / hexapôles
 4. Solénoïdes
 5. Autres aimants : Septums, onduleurs, cyclotrons
3. Fabrication
 1. Bobine
 2. Culasse
 3. Refroidissement / sécurité
4. Mesures
 1. Mécaniques
 2. Magnétique
5. Autres considérations
 1. Alimentations
 2. Hystérésis
 3. Aimants pulsés
 4. Matériaux magnétiques
 5. Aimants permanents
 6. Notions de couts, de planning
6. Références utiles
 1. Constructeurs
 2. Bibliographie
7. Annexes : calcul quad., plaques de garde,...



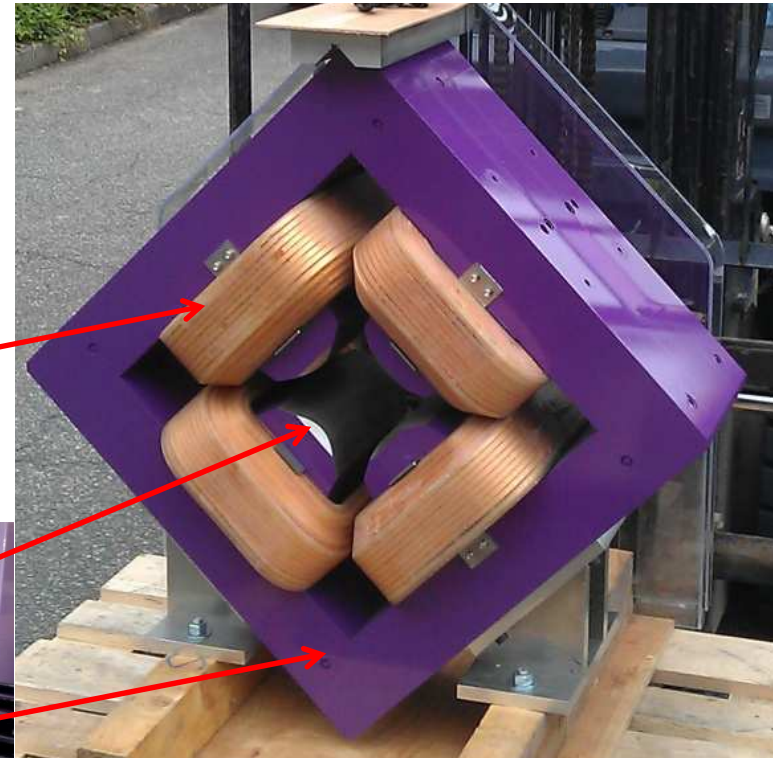
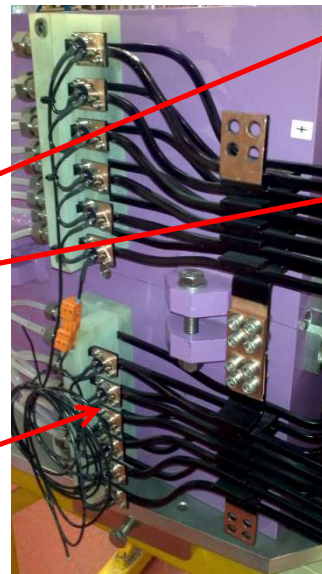
1-1 : Introduction/terminologie

Un **électro-aimant** classique pour accélérateurs, est un aimant qui produit un champ magnétique à partir d'un courant électrique et qui est éventuellement refroidi par eau ou par air.

Le circuit électrique (appelé **bobine**) produit le champ magnétique ou induction magnétique (**B**). Il est résistif.

Le circuit magnétique est constitué du **pôle** qui met en forme le champ, et de la **culasse** qui permet le rebouclage des lignes de champ.

Il est constitué de : cuivre (ou aluminium), fer doux, isolant, **systèmes de protection**



1-1 : Introduction/terminologie

L'**entrefer** est la zone qui se trouve entre les deux pôles

On utilise parfois des **chanfreins** afin d'obtenir une meilleure qualité de champ ou ajuster la longueur magnétique



B est exprimé en Tesla (T) ou en Gauss (1 T = 10000 Gauss)

Le champ magnétique terrestre est de l'ordre de 0,3 à 0,5 Gauss

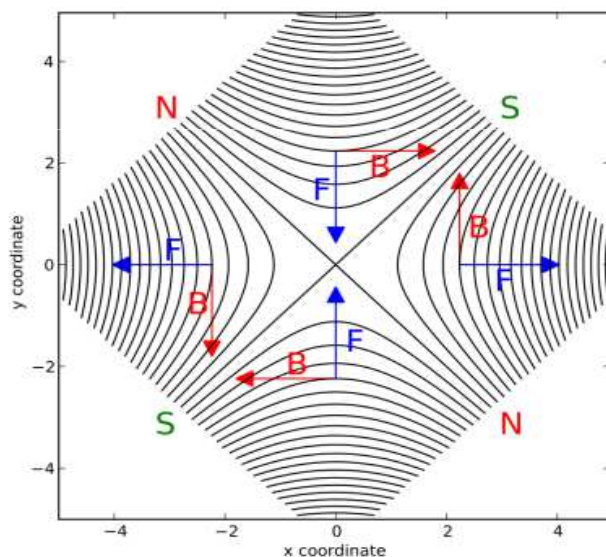
H (excitation magnétique) est exprimé en A/m

1-2 : Introduction/éléments d'optique

Force de Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{V} \wedge \vec{B})$$

force charge vitesse champ



By Andre.holzner - python/matplotlib, CC BY-SA 3.0.

A quoi sert le champ magnétique dans les accélérateurs ?

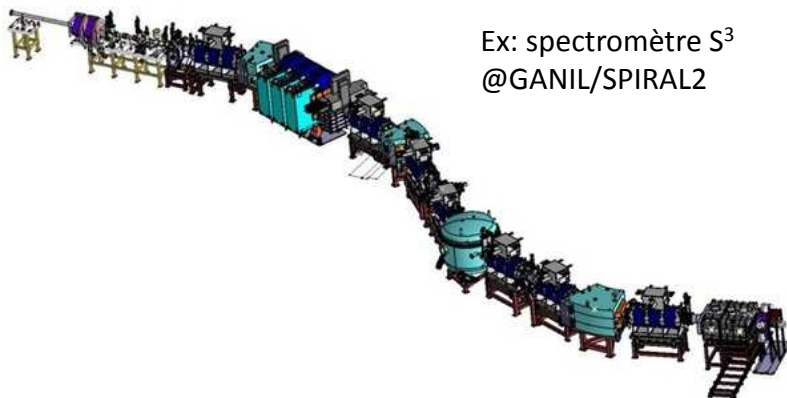
- Il n'agit que sur des particules chargées
- Ordre 0 : Déviation (steerers, dipôles, balayage)
- Ordre 1 : Focalisation (solénoïdes, quadripôles)
- Ordre supérieurs : Corrections (hexapôles, octupôles, ...)
- Action combinée (ex: déviation plus focalisation)
- Il est toujours imparfait, le rôle de concepteur est de se rapprocher du modèle utilisé par les opticiens.
- **La qualité de champ produit conditionne la capacité à réaliser la fonction recherchée** (ex: dipôle de spectromètre, quadripôle d'un synchrotron)

1-2 : Introduction/éléments d'optique

Notion de rigidité magnétique $B\rho$:

$$\rho = \frac{M.v}{q.B} = \frac{p}{q.B}$$

Sans accélération ni ralentissement, le $B\rho$ caractérise une ligne
 La solution aimant résistif convient pour des $B\rho$ intermédiaires, et/ou un besoin de fiabilité.
 On utilise la solution supraconductrice lorsque la solution classique n'est plus suffisante.
 A l'inverse, on peut utiliser une solution électrostatique si l'on avait besoin d'un champ B faible.

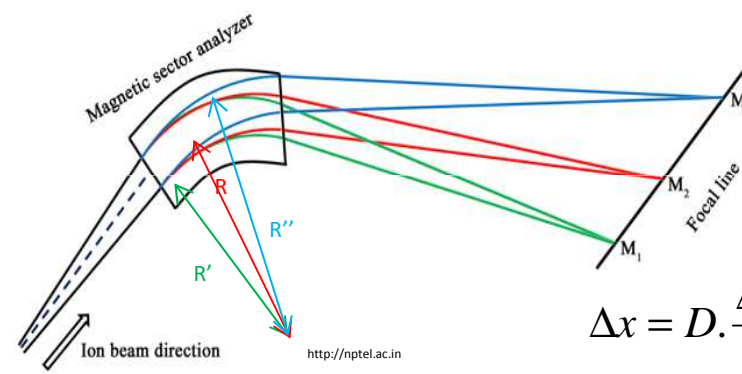


Ex: spectromètre S³
 @GANIL/SPIRAL2

Voir [WOLLNIK] ou [SEPTIER]

Dispersion en position d'un dipôle secteur **homogène** d'angle φ

$$D = -R(1 - \cos \varphi)$$



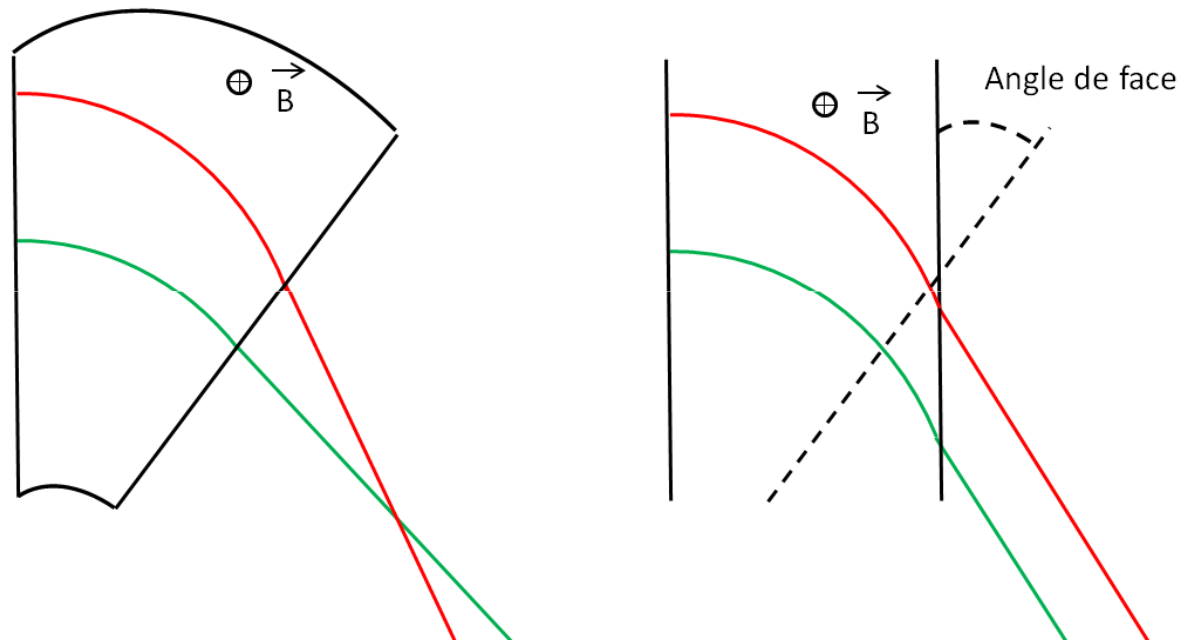
$$\Delta x = D \cdot \frac{\Delta p}{p}$$

$$p, p + \Delta p, p - \Delta p$$

$$m, m + \Delta m, m - \Delta m$$

Si v homogène, sélection en masse

1-2 : Introduction/éléments d'optique



Focalisation/défocalisation par angle de dipôle

1-3 : Introduction/éléments de magnétostatique et d'électricité

MAGNETOSTATIQUE DANS LE VIDE (Maxwell)

FLUX D'INDUCTION à travers une surface fermée quelconque (Maxwell Thomson)

Flux rentrant = flux sortant $\int_{S_f} \vec{B} d\vec{s} = 0$ $\text{div } \vec{B} = 0$
 Il n'existe pas de mono pôle magnétique

CIRCULATION le long d'un contour fermé quelconque

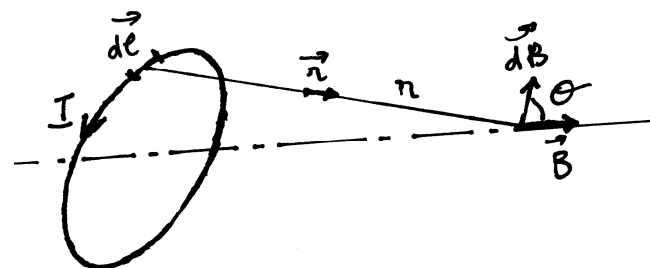
Lorsqu'une ligne de champ se referme sur elle même elle entoure toujours un courant

LOI D' AMPERE DANS LE VIDE

$$\oint_c \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I \quad \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{I}$$

LOI DE BIOT ET SAVART

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{I} d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$



1-3 : Introduction/éléments de magnétostatique et d'électricité

MAGNETOSTATIQUE EN PRESENCE DE MATIERE

On considère le vecteur H (excitation magnétique) tel que

THEOREME D'AMPERE

$$\oint_c \vec{H} dl = I$$

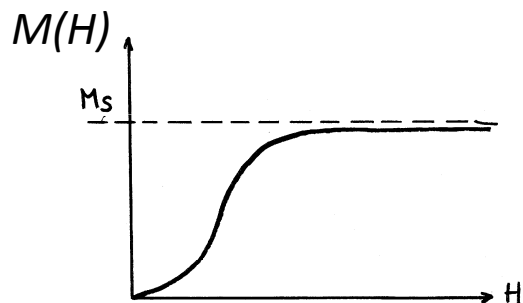
$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

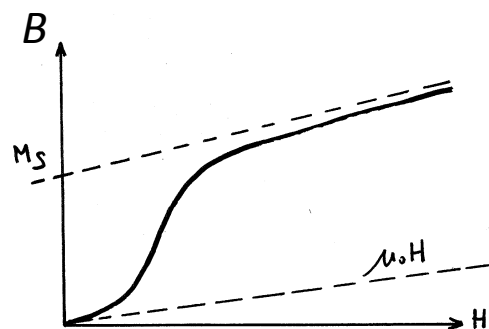
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg.m.A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\mu_r = 1 \text{ dans l'air}$$

La matière, sous l'influence d'un champ magnétique H prend une aimantation M



L'intensité d'aimantation M augmente vite, puis lentement et tend vers une asymptote correspondant à la valeur de saturation M_s



L'induction B est la somme des deux composantes

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

Elle tend vers une asymptote:

la droite $B = \mu_0 H + M_s$

1-3 : Introduction/éléments de magnétostatique et d'électricité

Fer doux :

La perméabilité relative chute après 0,5 Tesla

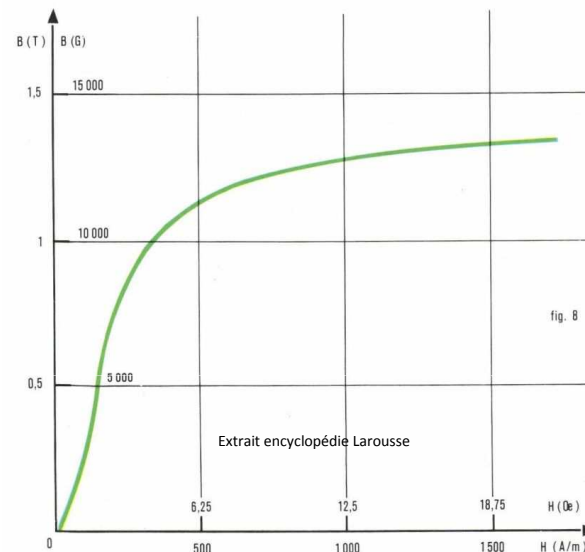
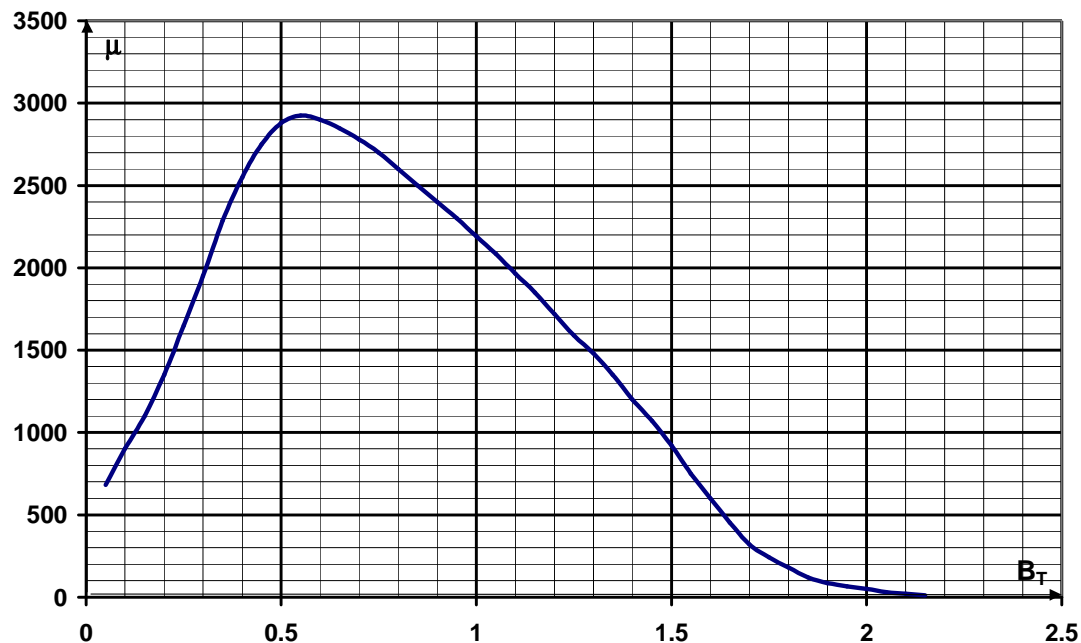


Fig. 8. Courbe d'induction à la température ambiante d'un alliage fer-silicium pour circuit magnétique de machines électriques.

Induction magnétique « maximum » au-delà de laquelle l'aimantation M n'apporte plus de contribution significative. Dans le fer, **1.8 Tesla** environ

1-3 : Introduction/notions de magnétostatique et d'électricité

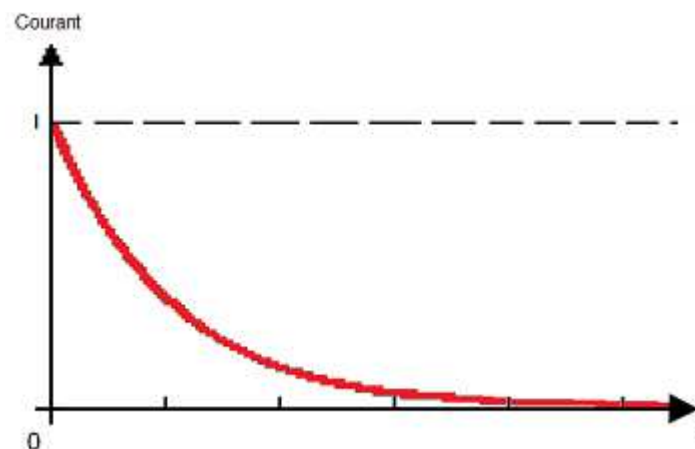
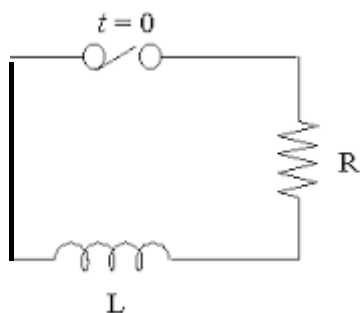
Cahier des charges

ACIER D'ÉLÉMENTS MAGNÉTIQUE																	
Mode de fabrication	Forgé ou laminé																
Teneur en carbone	< 0,06 % ± 0,006																
(3) Caractéristiques magnétiques																	
<table border="0"> <tr> <td>H (A/m)</td> <td>B_{minima} (Tesla) pour chaque échantillon</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>0,79</td> </tr> <tr> <td>800</td> <td>1,34</td> </tr> <tr> <td>1250</td> <td>1,49</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>1,64</td> </tr> <tr> <td>8000</td> <td>1,79</td> </tr> <tr> <td>13000</td> <td>1,89</td> </tr> <tr> <td>20000</td> <td>1,99</td> </tr> </table>	H (A/m)	B _{minima} (Tesla) pour chaque échantillon	300	0,79	800	1,34	1250	1,49	3000	1,64	8000	1,79	13000	1,89	20000	1,99	
H (A/m)	B _{minima} (Tesla) pour chaque échantillon																
300	0,79																
800	1,34																
1250	1,49																
3000	1,64																
8000	1,79																
13000	1,89																
20000	1,99																
Champ coercitif	H _c < 80 A/m après excitation à 30000 A/m																
(4) Caractéristiques mécaniques																	
E à 0,2 %	> 12 daN/mm ²																
R	> 25 daN/mm ²																

1-3 : Introduction/éléments de magnétostatique et d'électricité

- Circuit R,L
- énergie totale (obtenue par simulation)
- L souvent en centaines de mH
- Ordre de grandeur temps de décharge (L/R) : centaines de ms
- Utilisation dans la régulation en courant

$$E_{tot} = \frac{1}{2} LI^2$$



1-4 : Introduction/éléments de mécanique et de thermique

- Force exercée dans un dipôle

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

Ex:

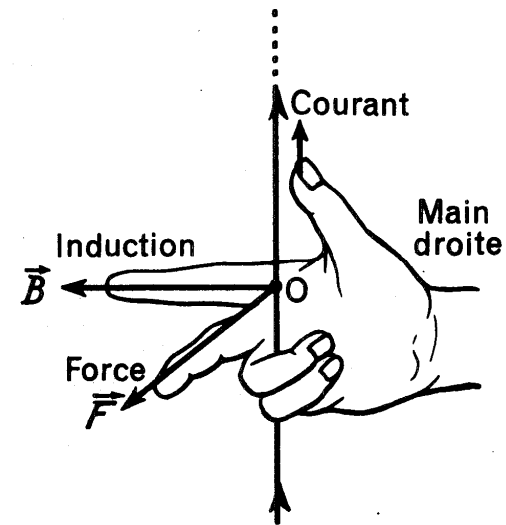
$$B = 1\text{T},$$

$$S = 1\text{m}^2$$

$$F = 40 \text{ tonnes}$$

- Force exercée sur un conducteur (force de Laplace)

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



1-4 : Introduction/éléments de mécanique et de thermique

Refroidissement des bobines:

→ Perte de charge dans un tuyau:

λ = coefficient de perte de charge

ω = masse volumique du fluide [kg / m³] ici 1000 pour l'eau

où V = vitesse d'écoulement [m/s]

L = longueur de la tuyauterie [m]

d = diamètre de la tuyauterie [m]

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot \omega \cdot V^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot d} [N / m^2]$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot d \cdot \Delta p}{\lambda \cdot \omega \cdot L}}$$

→ vitesse d'écoulement :

La détermination précise de λ est itérative et dépend de la rugosité du matériau

Un formule simplifié, valable pour un tuyau de cuivre et de l'eau proche de 60°C est

$$V [m / s] \approx \sqrt{\frac{6540 \cdot d [mm] \cdot \Delta p [bar]}{L [mm]}}$$

il faut cependant vérifier $V < 5m/s$ (éviter l'usure) mais aussi $Re > 2000$ (régime turbulent)

$$Re = \frac{d}{\nu} V, \text{ avec } \nu = 1.1 \cdot 10^{-6} m^2 / s (\text{viscosité cinématique})$$

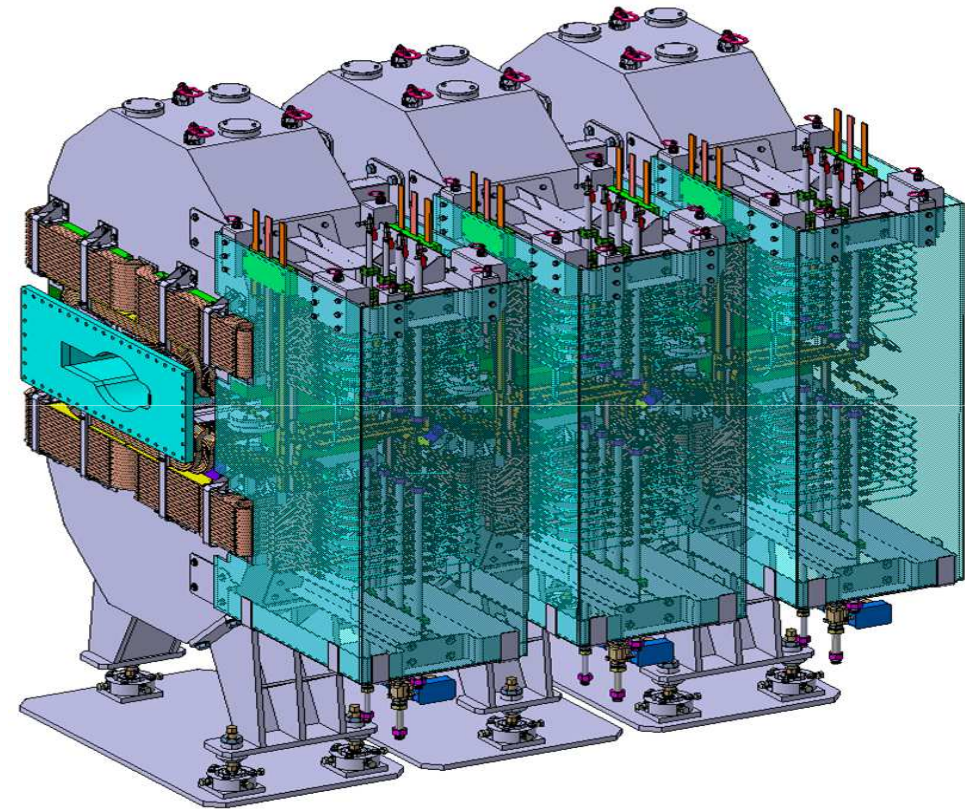
→ Débit $Q = V S$

→ On peut alors avoir l'élévation de température $\Delta\theta$:

$$Q [l / s] = \frac{P [W]}{C_p [W \cdot s / kg \cdot ^\circ C] \cdot \delta [kg / l] \cdot \Delta\theta [^\circ C]}, \text{ pour de l'eau : } \Delta\theta [^\circ C] = \frac{P [W]}{4,18 \cdot Q [cm^3 / s]}$$

1-4 : Introduction/éléments de mécanique et de thermique

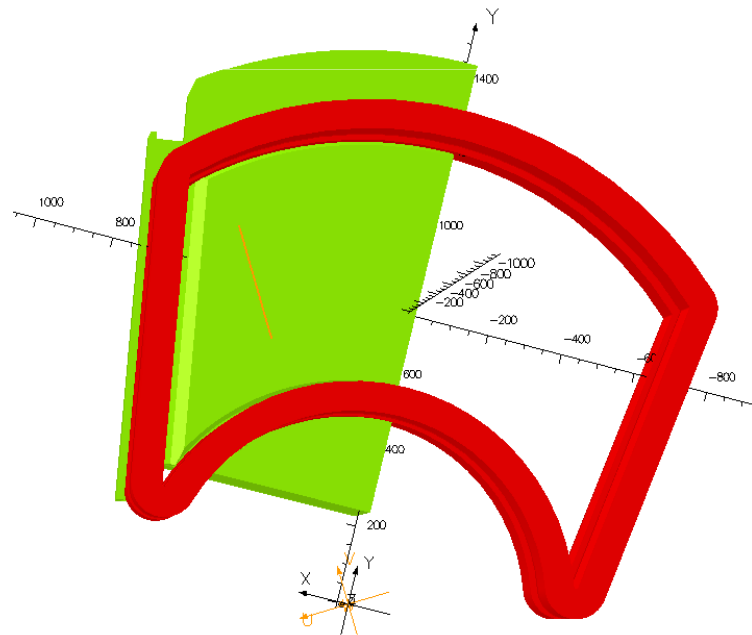
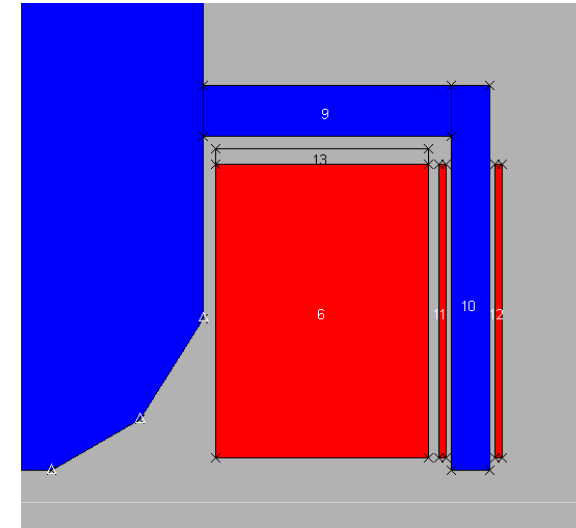
- Circuit refroidissement : choix du conducteur/taille de la bobine
- Eau de-ionisée, résistivité élevée 10 M Ω /cm (GANIL).
- Pression élevée (ex: 8 bars, 15 bars)
- Température sous l'ébullition (plutôt 40-60°).
- Parfois de très nombreux circuits hydrauliques.



Design SPIRAL2/O.Delferriere CEA-IRFU/SIGMAPHI

2 – 1 : Conception des aimants / outils

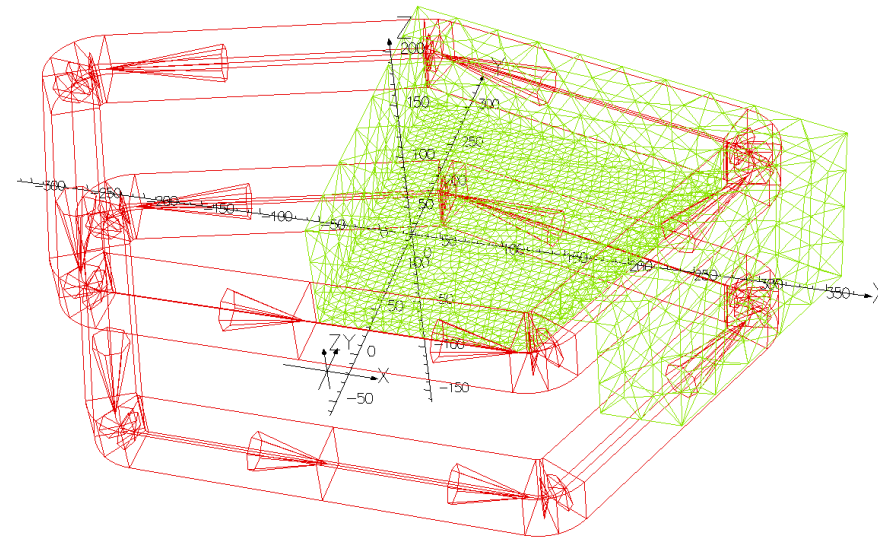
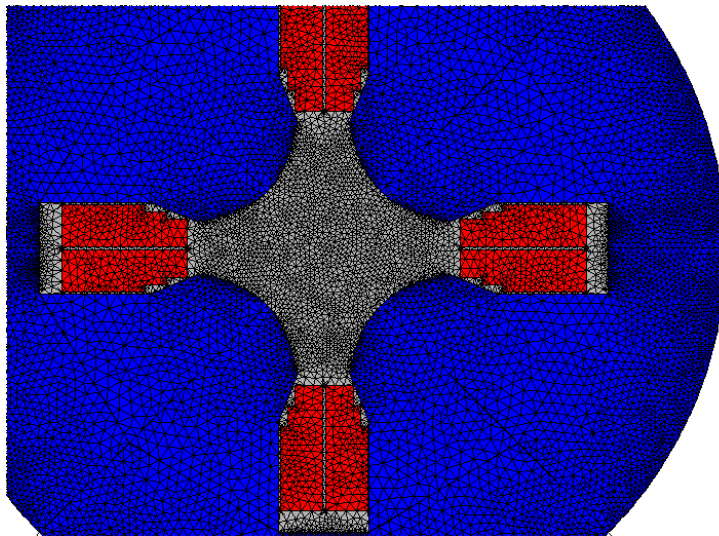
- calcul analytique préliminaire
- Validation par un calcul par éléments finis 2D
- symétries



- Parfois 3D
- Le logiciel le plus utilisé dans le domaine des accélérateurs est Opera (2D, 3D). Il existe aussi Poisson, Ansys-Maxwell, Cedrat Flux2D-3D et d'autres.

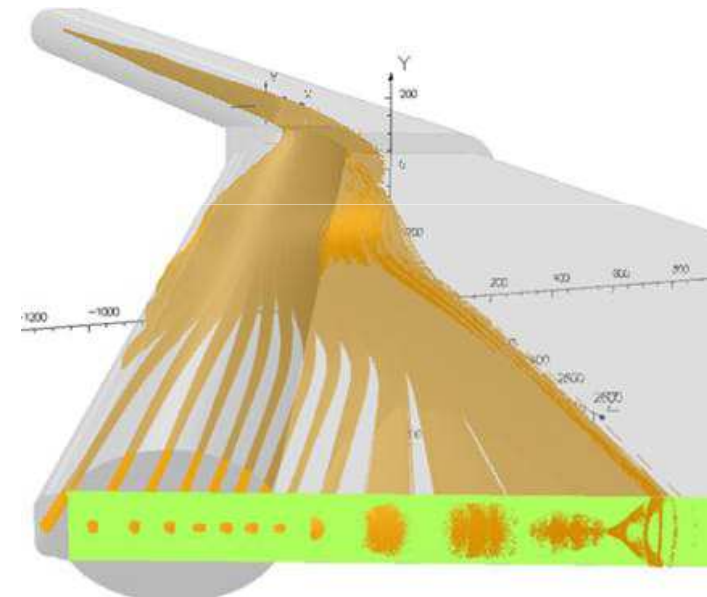
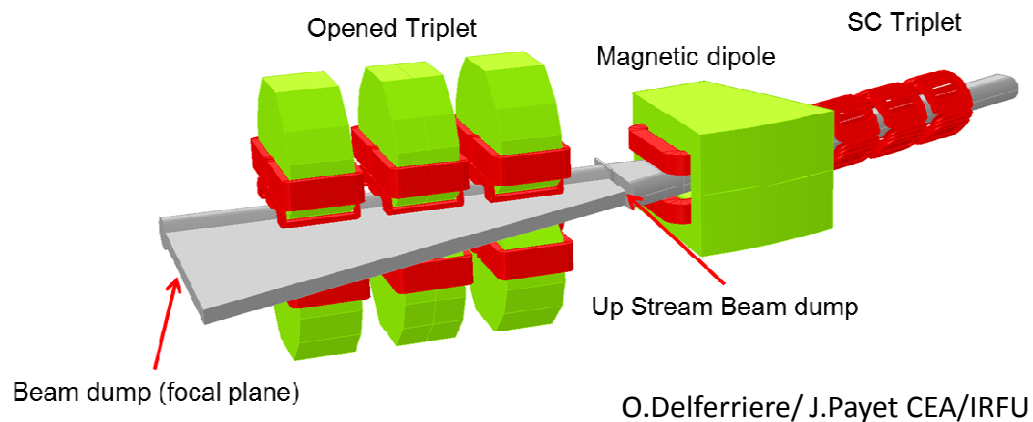
2 – 1 : Conception des aimants / outils

- Calcul par éléments finis = résolution des équations en des points particuliers + extrapolation.
- Maillage
- équations de Maxwell appliquées au champ magnétique statique.
- Conditions aux limites, les propriétés des matériaux, utiliser les symétries.
- Bobines = les sources de champ.



2 – 1 : Conception des aimants / outils

- CAO éléments finis requiert l'interprétation des résultats.
- Saturation = phénomène non linéaire. Itérations. Convergence.
- Les résultats peuvent être utilisés directement dans des simulations optiques dans Opera ou séparément (ex: logiciel TraceWin, CEA)



2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

Les correcteurs (Steerers) = petits dipôles.

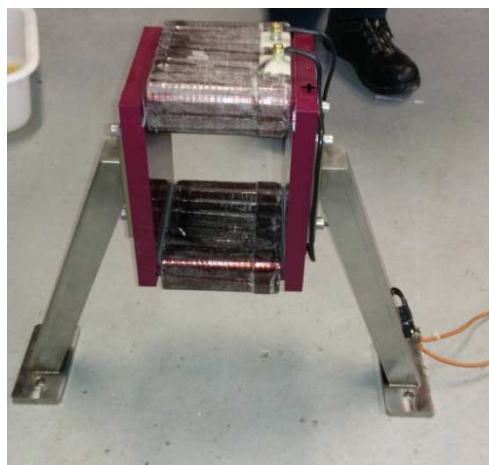
Éléments d'ordre 0 en optique : ils dévient les particules

Correction défauts

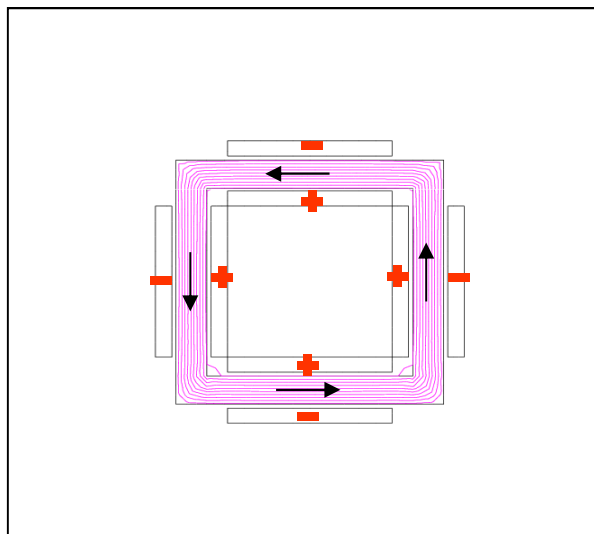
Nombreux

Correction un ou deux plans

Faible puissance, ex : 10A/10V

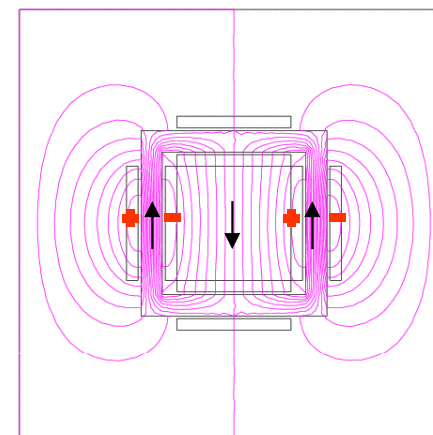


Les lignes de champs permettent de visualiser son intensité

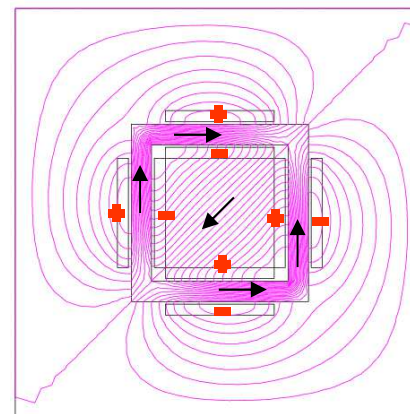


Neutralisation mutuelle

steerer simple



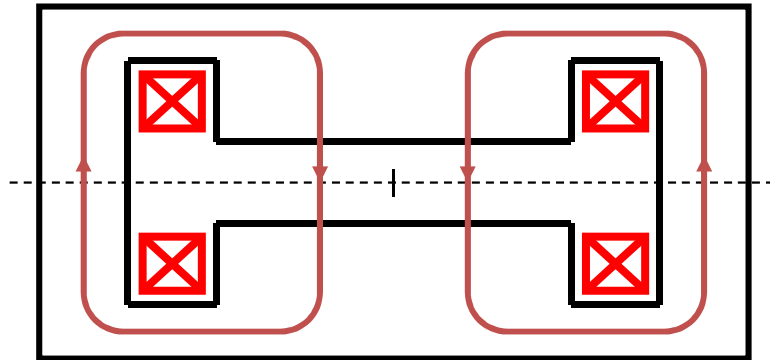
steerer double



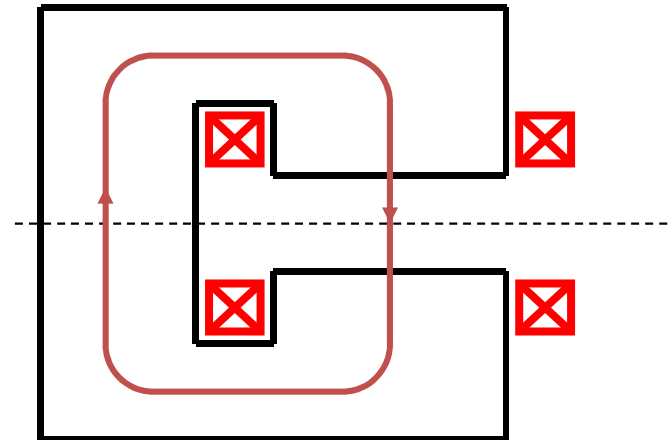
2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

TYPES DE DIPOLE

en **H** : le plus simple
symétrique et bobines simples

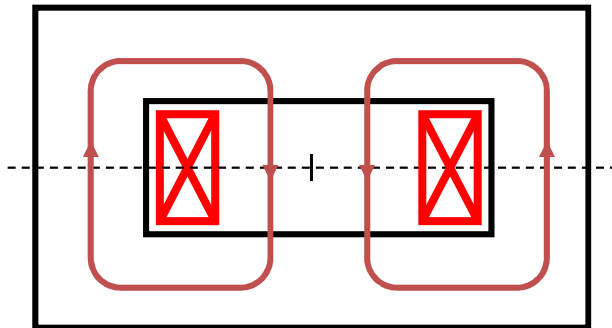


en **C** : retour de flux unique
donne un indice



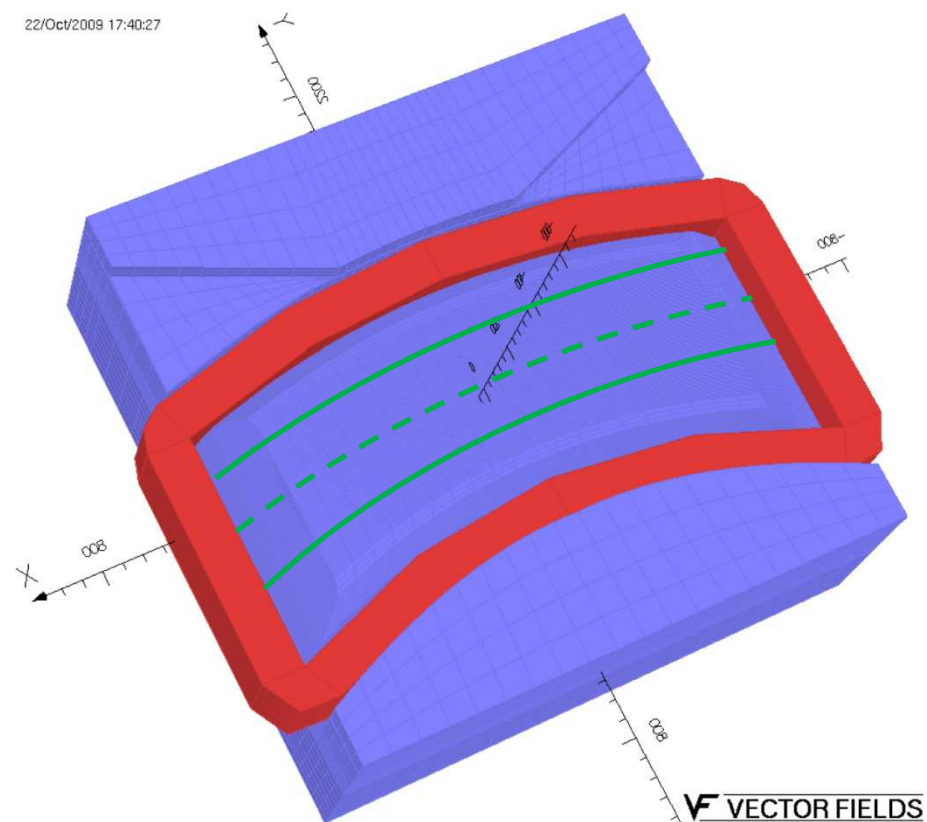
Window Frame

largeur polaire minimisée
bobines complexes à tolérances sévères



2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

Notion de zone utile



2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

Les phases de conception d'un dipôle

1. Calcul du courant nécessaire en fonction de l'entrefer
2. Dimension du pôle
3. Dimension des bobines- Choix du conducteur
4. Calcul du refroidissement
 - Si densité de courant $< 2 \text{ A/mm}^2 \Rightarrow$ aimant non refroidi
 - Si $2 < \text{densité} < 5 \text{ A/mm}^2 \Rightarrow$ aimant à refroidissement indirect
 - Si $10 \text{ A/mm}^2 > \text{Densité de courant} > 5 \text{ A/mm}^2 \Rightarrow$ aimant refroidi conducteur creux
5. Simulation 2D pour valider le modèle (obtention du champ homogène).
Revenir au point 2 ou 3 éventuellement
6. Equilibrage des retours de flux (2D puis 3D)
7. Finalisation 3D pour satisfaire les spécifications : champ de fuite, homogénéité, éventuellement masse, courant max, encombrement mécanique
8. Prise en compte des cartes de champ dans les simulations optiques

Voir [TANABE] [CAS]

2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

Calcul analytique d'un dipôle : les Ampère-tours

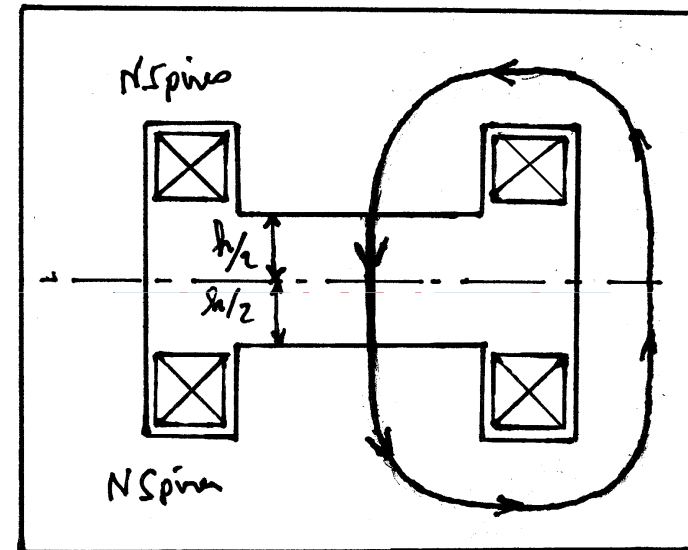
On applique le théorème d'Ampère : $\oint H dl = 2NI$

$$2NI = \int_{\text{air}} \frac{B_a}{\mu_0} dl + \int_{\text{fer}} \frac{B_f}{\mu_0 \mu_r} dl$$

Dans l'air : $2NI = \int_0^{\frac{h}{2}} \frac{B_{\text{air}}}{\mu_0} dl = \left[\frac{B_{\text{air}}}{\mu_0} \right]_0^{\frac{h}{2}}$

$$NI = \frac{Bh}{2\mu_0}$$

+ la consommation dans le fer
(environ 10 pour cent)



pour une bobine

Exemple:

B=1.6 Teslas dans un entrefer h=60mm

NI=42000 Ampère tours par bobine

2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

DIMENSIONNEMENT RAPIDE D'UN DIPOLE

Rayon de courbure : 0,75 T
 Angle de déviation : 90 deg
 Induction max. : 1,1 T
 Hauteur entrefer : 65 mm
 Largeur zone utile : ± 60 mm

Nombre d' Ampère Tours (NI) :

Pour une bobine : $NI = \frac{BH}{2\mu_0} = 1,1 \times 0,065 / 2 \times 4\pi \cdot 10^{-7} = 28449 \text{ A.Tours}$

On ajoute 10 % pour prendre en compte la consommation fer $\rightarrow NI = 32000 \text{ A.Tours}$

Largeur de pôle ($L_{p\hat{o}le}$) : dipôle classique : $L_{p\hat{o}le} = L_{utile} + \approx 3 \text{ entrefers}$

$\rightarrow L_{p\hat{o}le} = 320 \text{ mm}$

Section de la bobine (S) : $\delta = \frac{NI}{S} \Rightarrow S = \frac{NI}{\delta}$

On choisit une densité de courant $\delta = 10 \text{ A/mm}^2$ $\rightarrow S_{cu} = 32000 / 10 = 3200 \text{ mm}^2$

Compte tenu du foisonnement, de l'isolation et du canal de refroidissement, on corrige la section de la bobine :

$\rightarrow S_{bob} = 3200 / 0,5 = 6400 \text{ mm}^2$ soit une bobine carrée de $80 \times 80 \text{ mm}^2$

2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

Longueur moyenne de spire :

Compte tenu de la largeur du pôle, de l'angle de déviation et de la section de la bobine, on obtient la longueur moyenne de spire (l_{spm}):

$$\rightarrow l_{spm} = 3,3 \text{ m}$$

Puissance :

Pour une bobine :
$$P = RI^2 = \rho \frac{l}{S} I^2 = \rho l_{spm} \delta NI$$

($\rho=1,9 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ résistivité du cuivre @température moyenne eau)

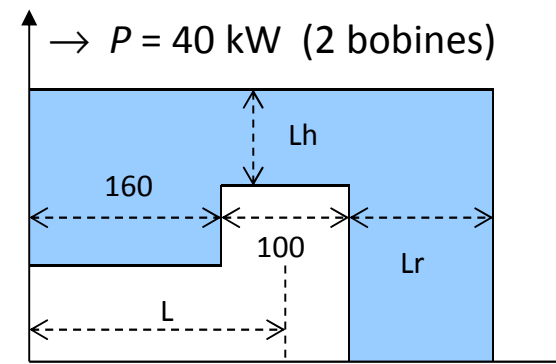
$$P = 1,9 \cdot 10^8 \times 3,3 \times 10 \cdot 10^6 \times 32000 = 20 \text{ kW}$$

Section de fer :

Equilibrage flux

$$\Phi = B S \quad (= B L \text{ en 2D})$$

$$\rightarrow B \cdot L = 1,1 \times (160 + 50) = 231 \text{ T} \cdot \text{mm}$$



On veut un champ max. fer de 1,7 T :

$$B_{fer} L_{fer} = B_{air} L_{air} \quad \rightarrow L_{fer} = 135 \text{ mm } (=L_h=L_r)$$

On a raisonné en 2D.

En raison de la forme sectorielle du pôle, les largeurs de retour de culasse seront différentes.

Conclusion : obtention des dimensions approximatives, masses, puissance etc...

Exemple de dimensionnement complet incluant les calculs thermo-hydraulique en annexe

2 – 2 : Conception des aimants / Dipôles et Steerers

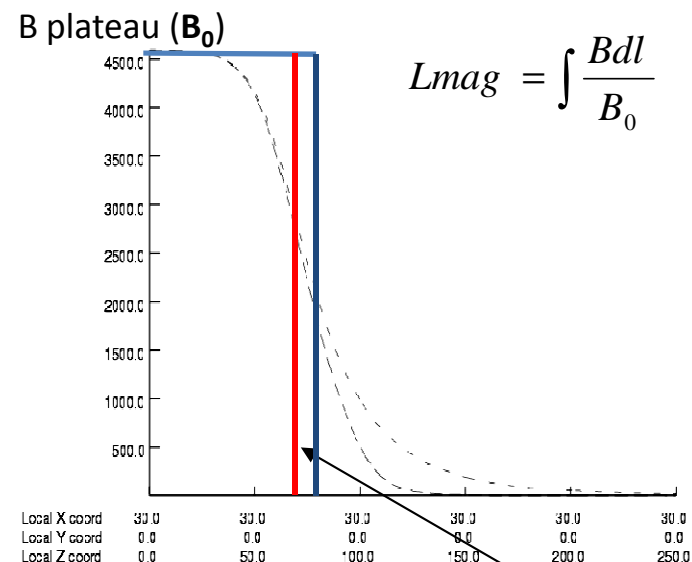
LONGUEUR MAGNETIQUE et CHAMP DE FUITE

Il n'existe pas de champ en pur créneau (hard-edge). Il y a nécessairement un champ de fuite en entrée et en sortie.

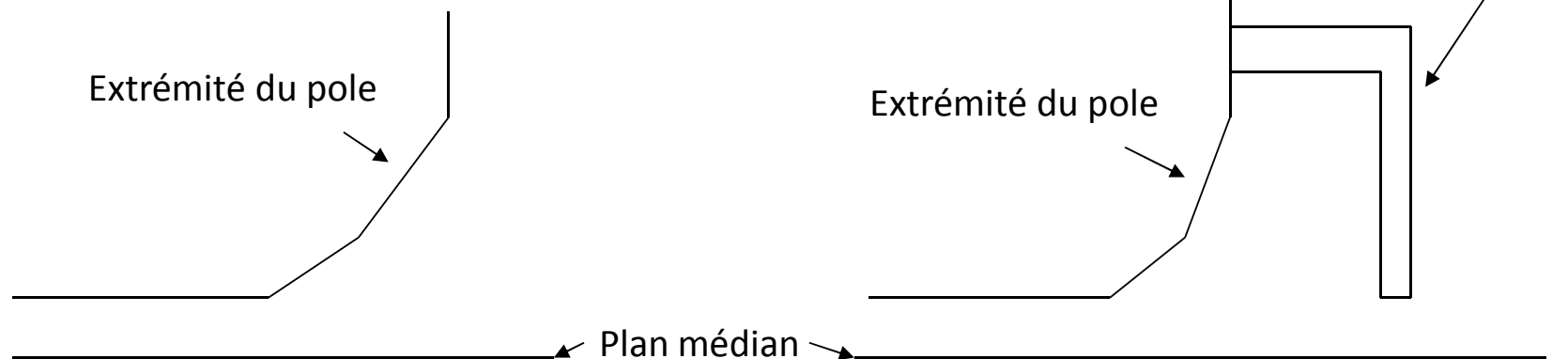
Il est important dans un dipôle de parfaitement maîtriser l'angle de déviation, et donc la longueur effective du champ.

On s'arrange pour que la longueur magnétique soit égale à la longueur mécanique. Les problèmes d'alignement sont ainsi simplifiés.

On définit des chanfreins d'extrémité et éventuellement des plaques de garde.



$$L_{mag} = \int \frac{Bdl}{B_0}$$



SATURATION

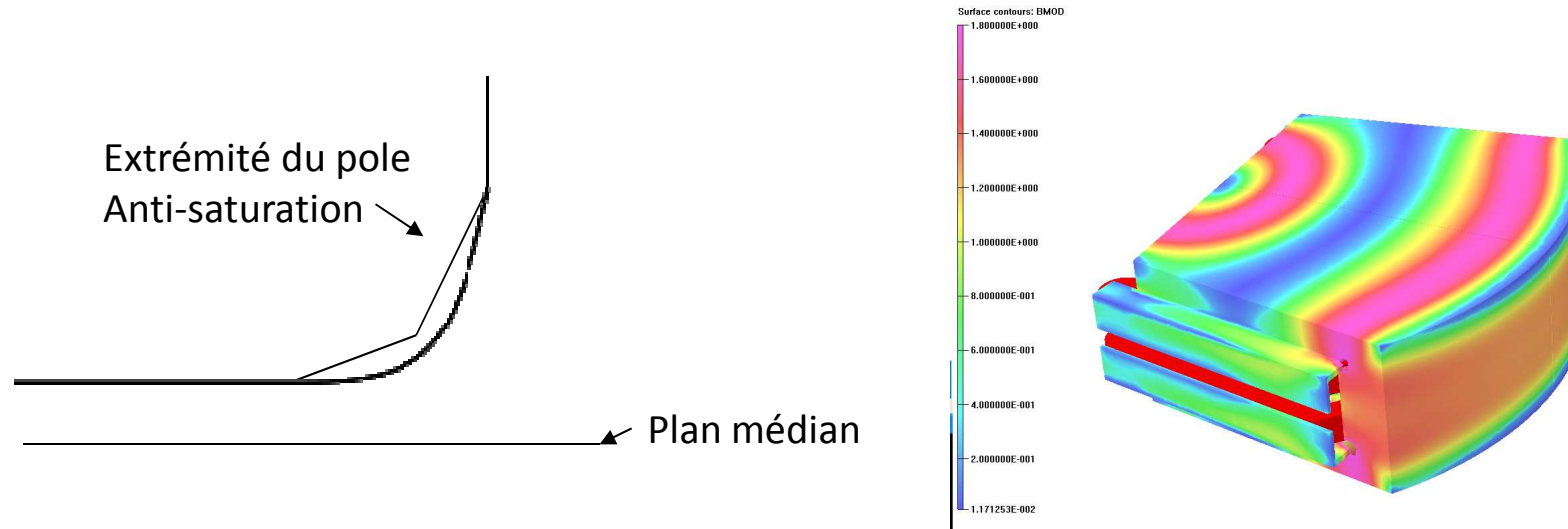
Recherche d'un comportement linéaire

→ Eviter de créer des zones de concentration du flux (équivalent de l'effet de pointe en électrostatique)

→ Limiter partout le champ à une valeur inférieure à 1.7-1.8T

→ **Compromis performance/encombrement/linéarité(/puissance absorbée)**

→ Utilisation de profils dit « anti-saturants » aux extrémités des pôles. Sa forme a été proposée par W.Rogowski (1923) pour des électrodes et confirmée dans le cas des aimants [ROG]. C'est un profil en cosinus hyperbolique, qui peut être simplifié par l'utilisation de un ou deux chanfreins.



2 – 3 : Conception des aimants / quadripôles et hexapôles

Le quadripôle est un élément focalisant dans un plan, et défocalisant de le plan perpendiculaire. L'association de 3 ou 4 quadripôles à focalisation alternée permet globalement de focaliser le faisceau

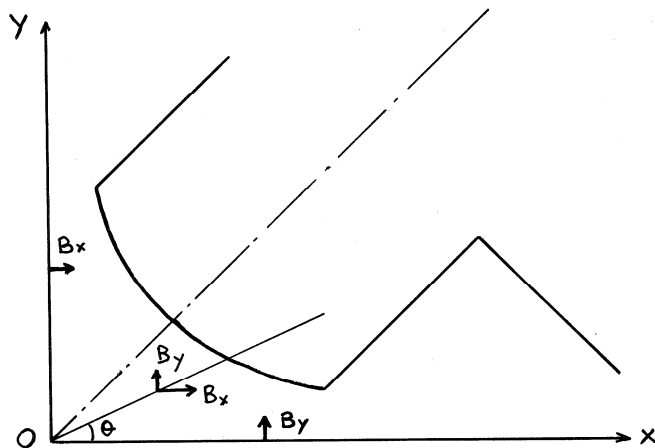
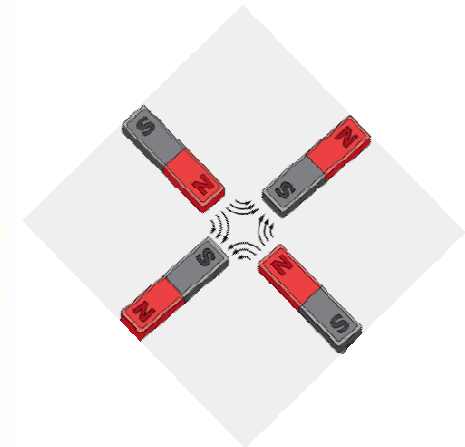
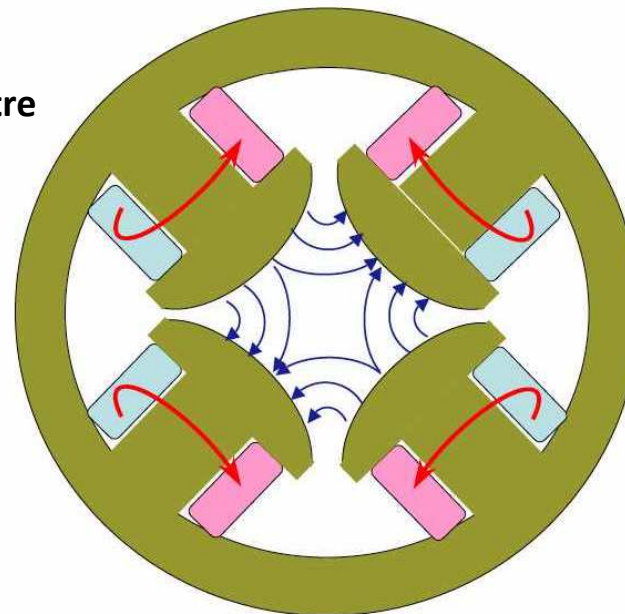
Le champ B est tel que

$$B_x = G \cdot R \cdot \sin \theta$$

$$B_y = G \cdot R \cdot \cos \theta$$

G est appelé le Gradient.

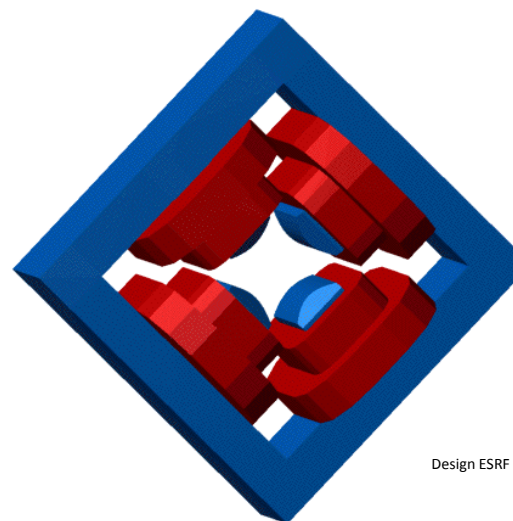
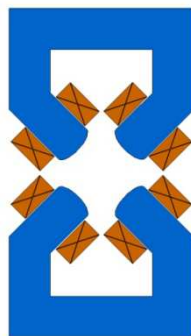
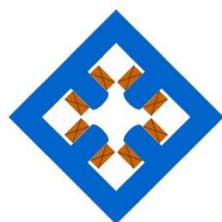
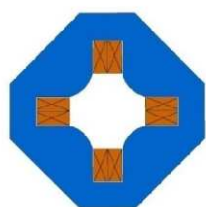
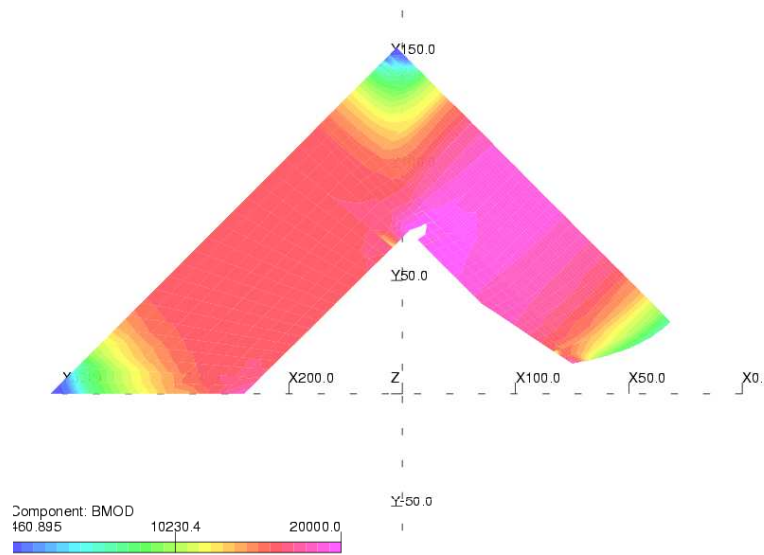
Le diamètre de la zone utile s'appelle **diamètre de gorge**



2 – 3 : Conception des aimants / quadripôles et hexapôles

Le design d'un quadripôle est soumis à des **contraintes fortes** : l'encombrement longitudinal doit être optimisé (cout des bâtiment), ce qui limite la quantité de flux que peut contenir chaque pôle. Il existe donc des **limites** au gradient (G) qu'il est possible d'obtenir.

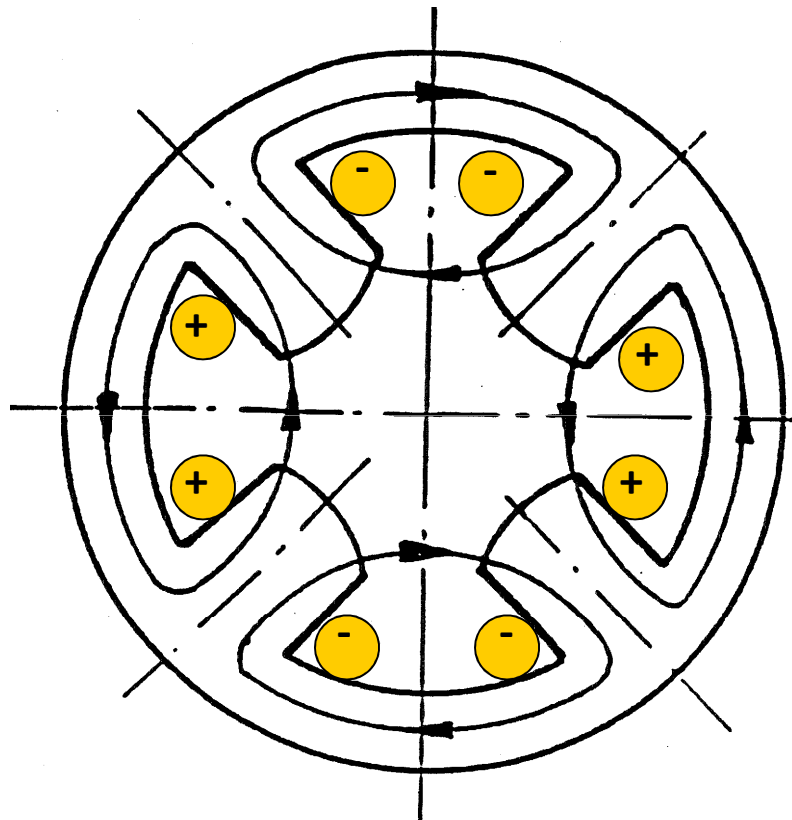
G maximum 25 T/m, limite souvent acceptée.



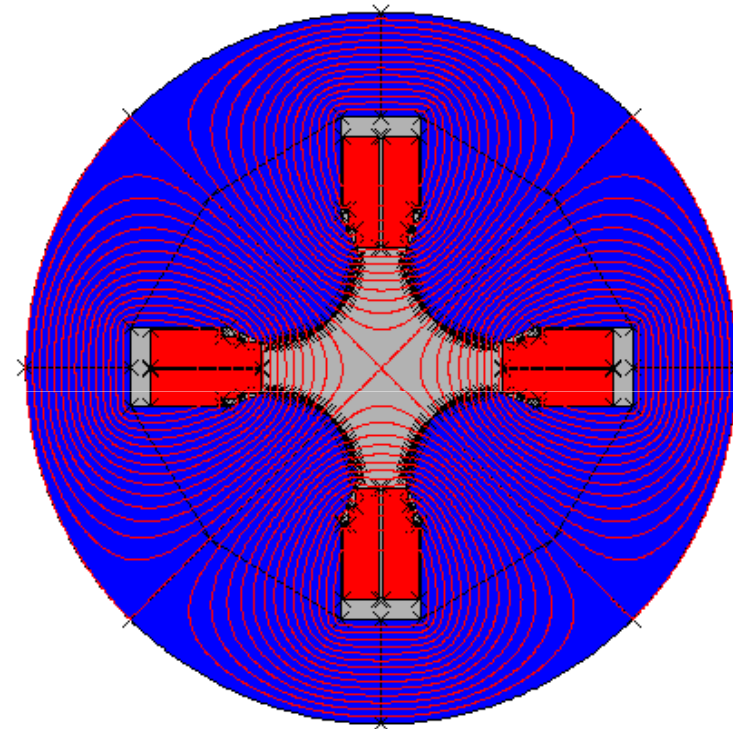
© Th. Zickler, CERN

Design ESRF

2 – 3 : Conception des aimants / quadripôles et hexapôles



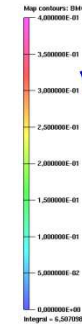
Courants



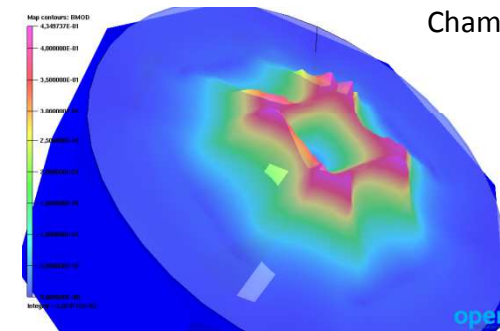
Circulation du flux

2 – 3 : Conception des aimants / quadripôles et hexapôles

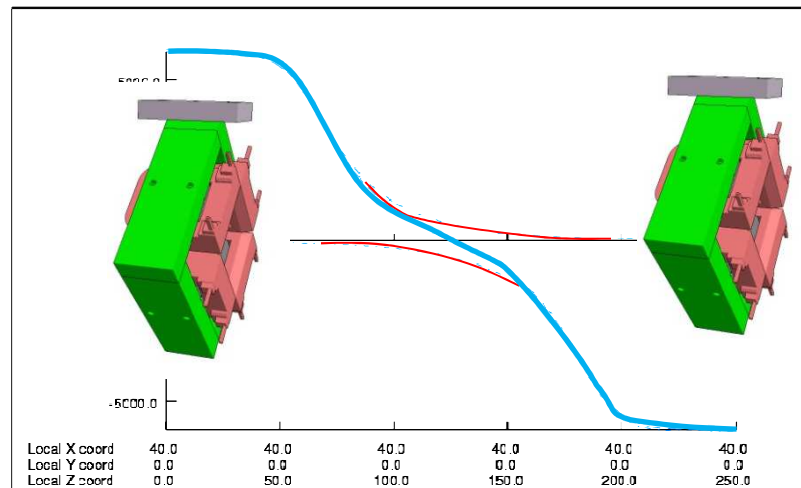
L'homogénéité du champ est limitée par construction : proche des pôles, le champ n'est pas parfaitement quadripolaire. Les champs de fuite participent également à dégrader le quadripôle réel par rapport au modèle « hard edge ».



Champ au centre QP



Champ sur la face externe QP



L'association de plusieurs quadripôles proches (à gradient alternés) conduit à réduire le gradient utile

2 – 3 : Conception des aimants / quadripôles et hexapôles

DEFINITION DU PROFIL POLAIRE

En principe la distribution de champ à gradient constant ne peut être obtenue qu'avec des pièces polaires hyperboliques.

Le contour du pôle est donné par l'hyperbole :

$$XY = \frac{R^2}{2}$$

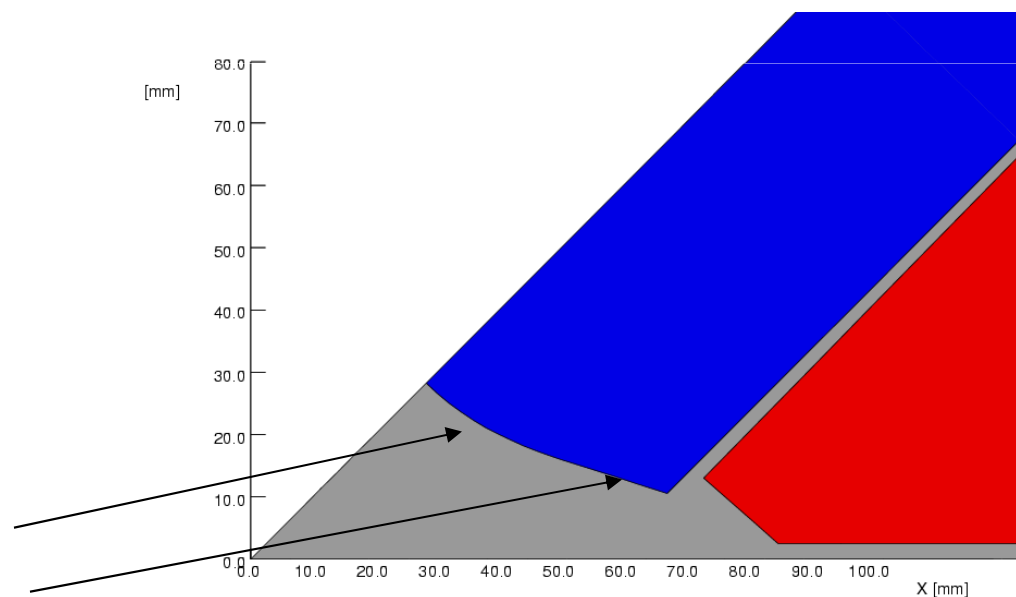
Dans la pratique, on doit limiter l'hyperbole pour pouvoir loger les bobines.

On choisit une largeur polaire suffisante pour obtenir l'homogénéité requise – en général R –

Afin de compenser cette troncature, il convient de rajouter de la matière.

Le profil est ainsi constitué:

- d'une partie centrale hyperbolique
- de shims, le plus souvent d'une prolongation par les tangentes à l'hyperbole.



2 – 3 : Conception des aimants / quadripôles et hexapôles

CALCUL DU COURANT NECESSAIRE DANS UN QUADRUPOLE

On applique le théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I$$

$$NI = \int_{L1} \frac{B_a}{\mu_0} dl + \int_{L2} \frac{B_f}{\mu_0 \mu_r} dl + \int_{L3} 0$$

B est
perpendiculaire
au trajet

μ_r grand

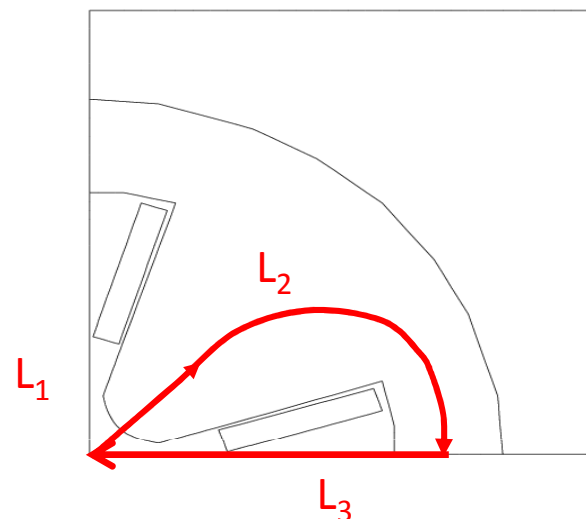
Dans l'air :

$$NI = \int_0^R \frac{GR}{\mu_0} dr = \left[\frac{GR^2}{2\mu_0} \right]_0^R$$

$$NI = \frac{GR^2}{2\mu_0}$$

+ la consommation dans le fer
(environ 10 pour cent)

pour une bobine



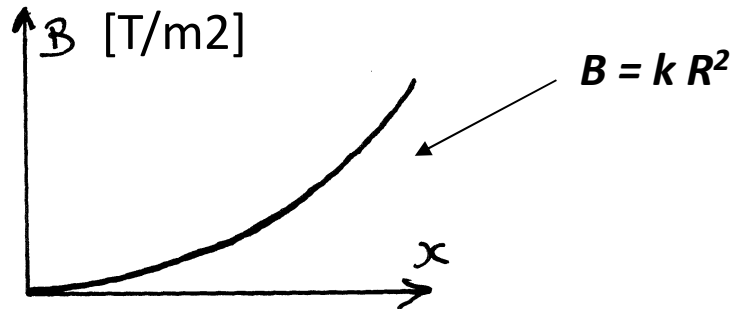
Exemple : Qpole diamètre 70mm
G = 20 T/m
→ NI = 10500 A.t par bobine

Le détail du calcul analytique complet d'un quadripôle est donné en annexe

2 – 3 : Conception des aimants / quadrupoles et sextupoles

SEXTUPOLE

Correction des défauts du deuxième ordre



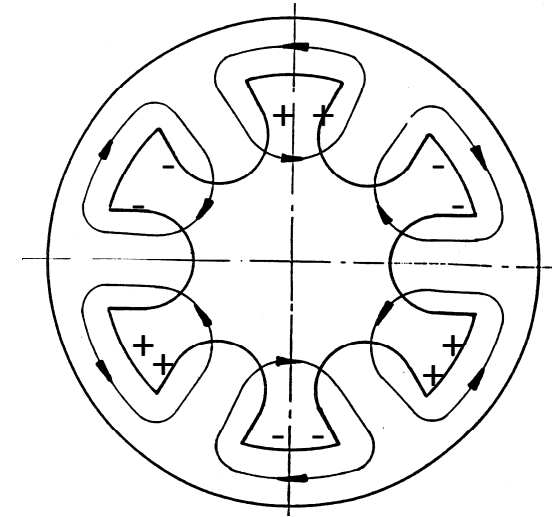
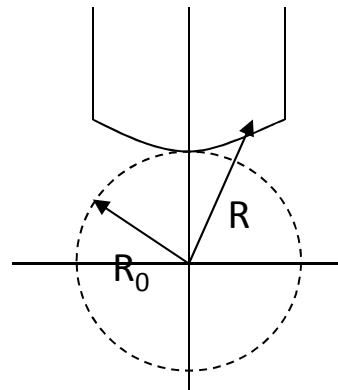
Dans l'air :

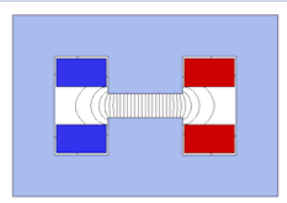
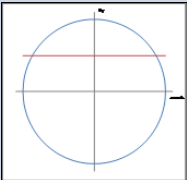
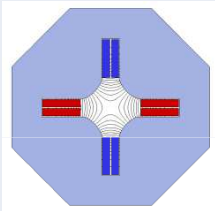
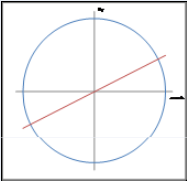
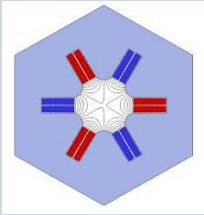
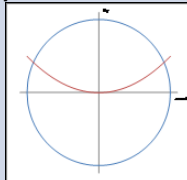
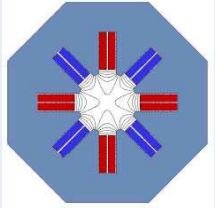
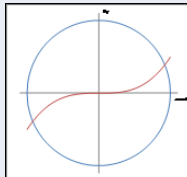
$$NI = \int_0^R \frac{kR^2}{\mu_0} dr = \left[\frac{k}{\mu_0} \frac{R^3}{3} \right]_0^R$$

$$NI = \frac{kR^3}{3\mu_0}$$

pour une bobine

Profil polaire: $R^3 \cos 3\theta = R_0^3$



Type aimant	Vue schématique	By sur axe X	Ampères-tour (théorique)	Equation du pôle
Dipôle Ordre 0		B_0 	$NI = \frac{Bh}{2\mu_0}$	$y = \pm r$
Quadripôle Ordre 1		$G \cdot x$ 	$NI = \frac{GR^2}{2\mu_0}$	$2xy = \pm r^2$
Hexapôle Ordre 2		$k \cdot (X^2 - Y^2)$ 	$NI = \frac{kR^3}{3\mu_0}$	$3x^2y - y^3 = \pm r^3$
Octupôle Ordre 3		$F_0 \cdot (X^3Y - XY^3)$ 		$4(x^3y - xy^3) = \pm r^4$

D'après Th. Zickler, CERN

2 – 4 : Conception des aimants / Solénoïdes

Focalisation des particules chargées de basse énergie

Les quadripôles sont souvent plus efficaces, car la force décroît avec le carré du moment cinétique (p) de la particule.

Efficace que pour des faisceaux peu accélérés (ex: en sortie de source).

L'effet est maximal dans le champ de fuite, mais également dans une moindre mesure, sur toute la longueur du solénoïde. Voir[SOLENOÏDE].

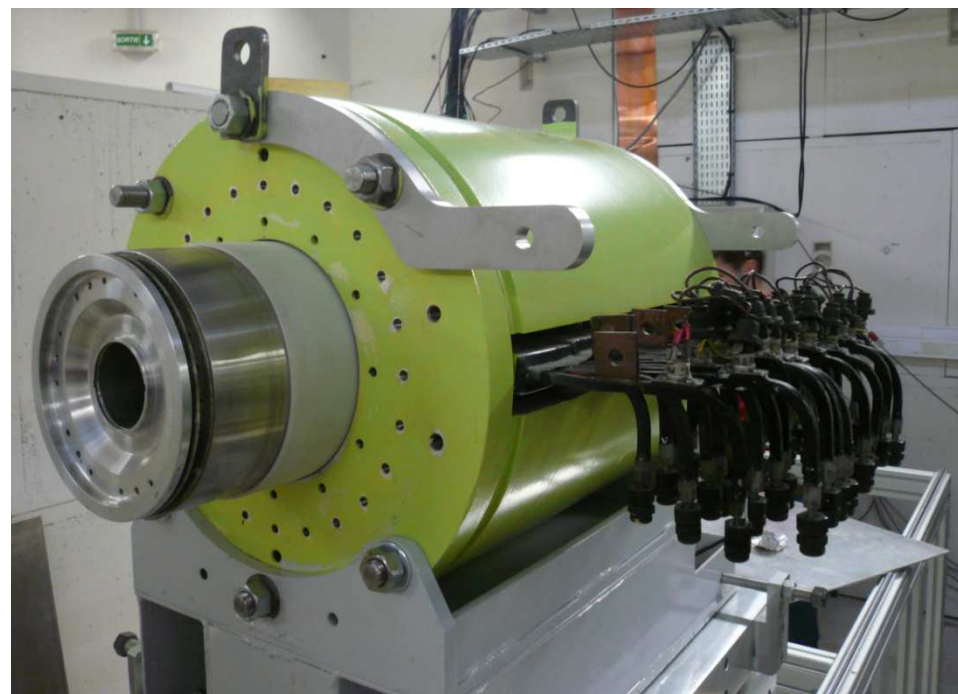
La puissance requise limite très fortement le diamètre intérieur maximal. On trouve souvent de **très forts courants**, et des débits importants.

Il existe plusieurs types de bobinages : soit des galettes juxtaposées, soit des circuits d'eau concentriques.

Fort champ = bobines de Bitter

La **qualité du champ dépend directement de la fabrication du bobinage**. Les simulations sont simples et peuvent se faire en 2D. La qualité du champ affecte l'émittance.

Un blindage métallique assure une meilleure efficacité.



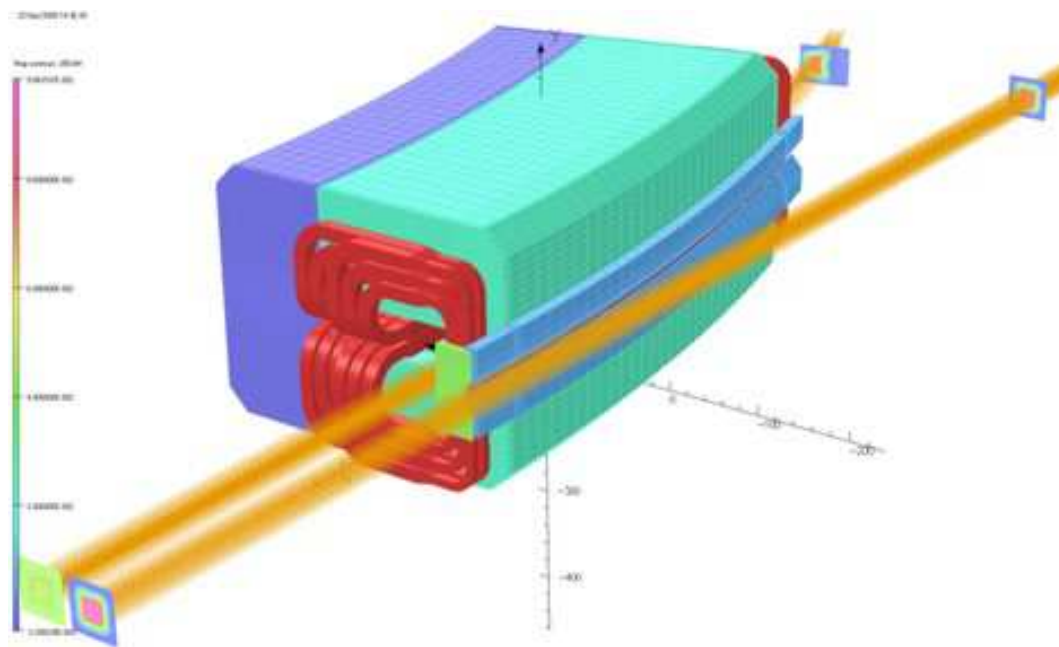
2 – 5 : Conception des aimants / autres aimants

Septums :

Rôle = séparation de deux lignes (ex: un paquet sur deux).

Peuvent être couplés à un déflecteur électrostatique qui permet de travailler à des fréquences élevées.

Bobine avec une **grande densité de courant**. Difficulté à refroidir, usure dans le temps.



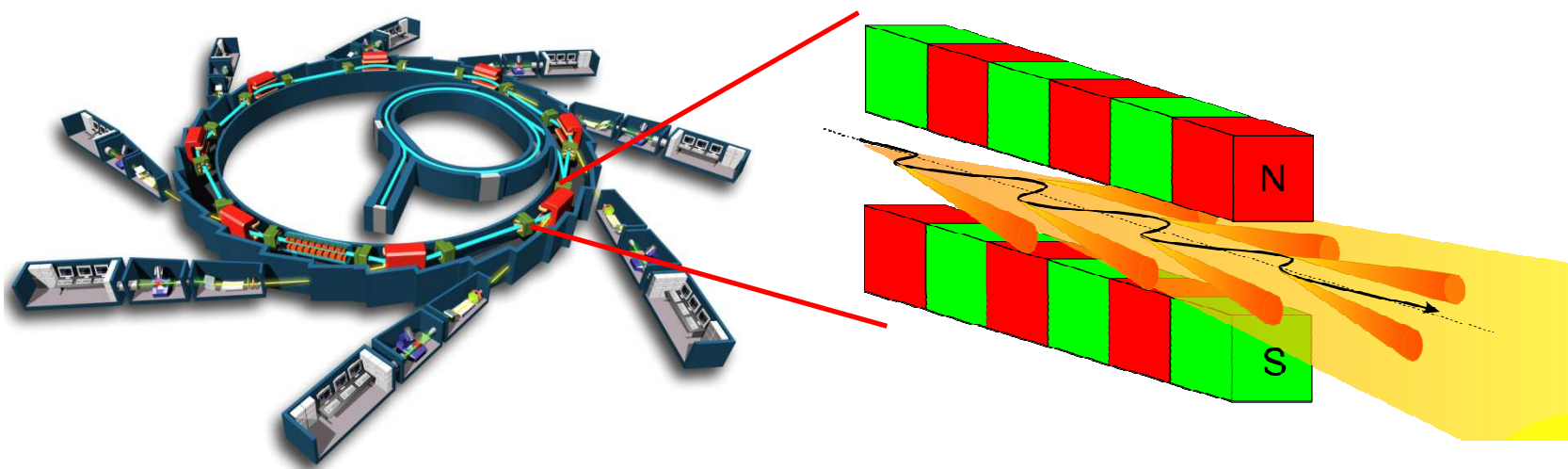
iThemba LABS

2 – 5 : Conception des aimants / autres aimants

Onduleurs :

Rôle = sources de lumière. Lors du passage des ions, le mouvement d'accélération/décélération induit par ce type d'aimants provoque une émission de rayonnement cohérent, qui est utilisé pour l'imagerie d'objets ou de tissus biologiques (synchrotron SOLEIL, ESRF Grenoble)

Aimants permanents



Synchrotron Soleil

2 – 5 : Conception des aimants / autres aimants

Cyclotrons :

- Aimants massif (CSS GANIL: 2000t), champ homogène + bobines loi de champ.
- Injection/extraction : volume contraint
- Intègrent un dispositif d'accélération par champ électrique (cavités)
- Cyclage



3 – 1: fabrication / bobines

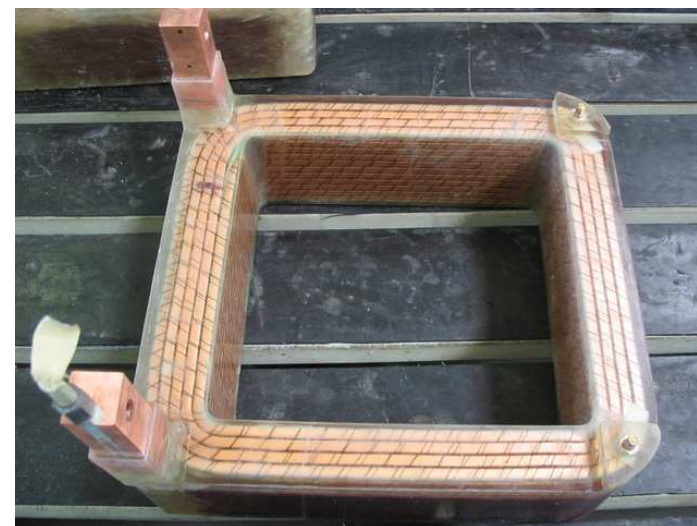
Double galettes

→ choix du nombre de tours

→ espace de changement de couche pour conducteur supplémentaire

Positionnement « assez peu » précis

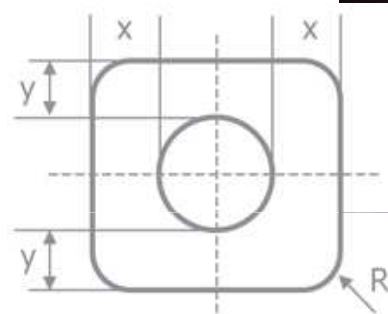
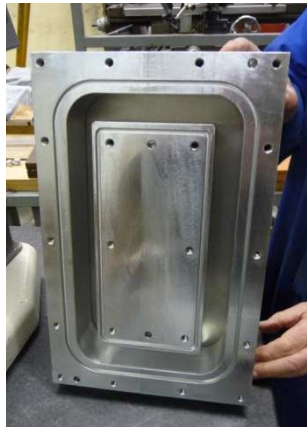
Isolant fibre de verre+ résine époxy



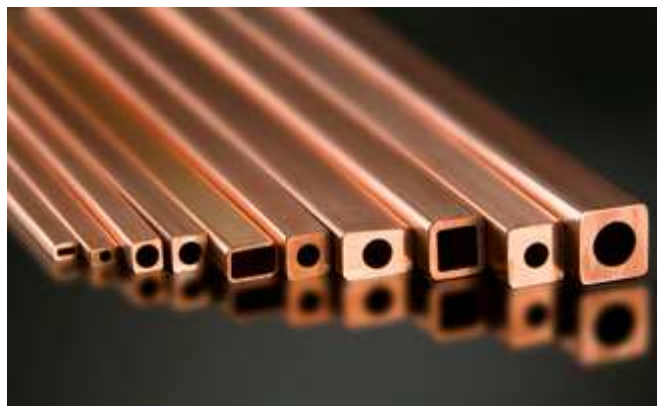
3 – 1: fabrication / bobines

Différents moules pour l'imprégnation des bobines :

- Usiné
- Chaudronné
- Moule souple TEDLAR



conducteur « classique »
 5x5φ3 mm,
 6x6φ4 mm,
 7x7φ4 mm,
 8x8φ4 mm,
 8x8φ5 mm,
 etc...



Cuivre OHFC

La puissance dissipée dans l'air est de 2 à 3%, mais cela dépend de la température moyenne et de la géométrie.

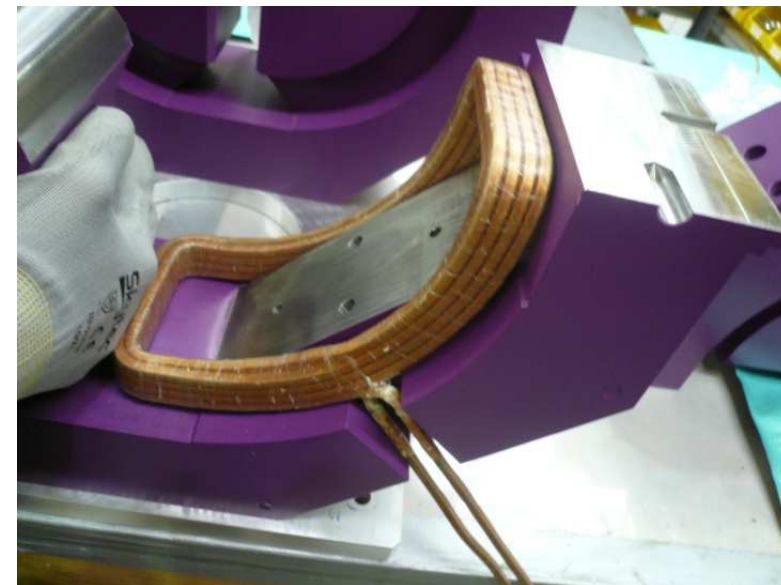
3 – 1: fabrication / bobines

Radio-résistance

- Les matériaux organiques se dégradent lorsqu'ils sont soumis à de fortes doses de rayonnements irradiants (dose exprimée en Grays)
- L'isolant typique fibre de verre + époxy se dégrade à partir d'une dose de 10^8 grays [CERN RAD]
- Les solutions connues pour concevoir des bobines plus résistantes sont :
 - utiliser un composé organique plus résistant (**Cyanate Ester**) à la place de la résine Epoxy. Mise en œuvre délicate et dangereuse.
 - Utiliser des conducteurs spéciaux faits de couches de cuivre isolé par MgO (Mineral Insulated Cable, ex: PYROTENAX). C'est très coûteux, et réservé à des forts courants. Pas de conducteur de petite dimension.
 - Utiliser des conducteurs pleins, refroidis par air ou plongés dans l'eau (type bobine de Bitter). Applications très limitées.

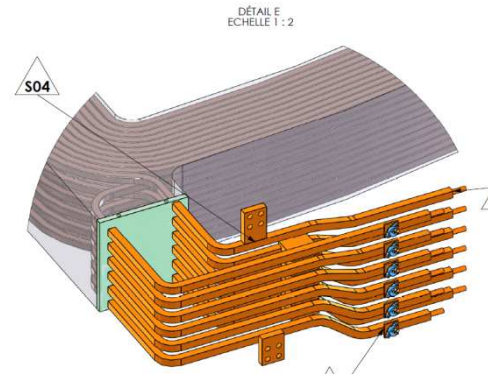
3 – 2: fabrication /culasse et pôle

- Réalisation d'une série, points particuliers:
 - la masse totale d'acier mise en œuvre, pour éventuellement rester dans la masse d'une coulée
 - l'épaisseur maximale du lingot d'acier laminé.
 - la longueur maximale (masse) d'un toron de conducteur.
- Montage des bobines et de la chambre. L'aimant doit pouvoir s'ouvrir. Utilisation de pions.



3 – 3: fabrication / refroidissement et sécurité

Un aimant de forte puissance doit TOUJOURS être refroidi. Risque incendie.



- Débitmètre = présence d'eau en sortie
- Capteur température en sortie
- Capteurs complémentaires.
- Fiabilité.
- Le contrôle peut se faire par un automate directement connecté à l'alimentation.
- Des systèmes de détection de fuite sont également utiles : @12 bars, on peut projeter l'eau à plus d'un dizaine de mètres.

4 – 1 : Mesures / mécaniques

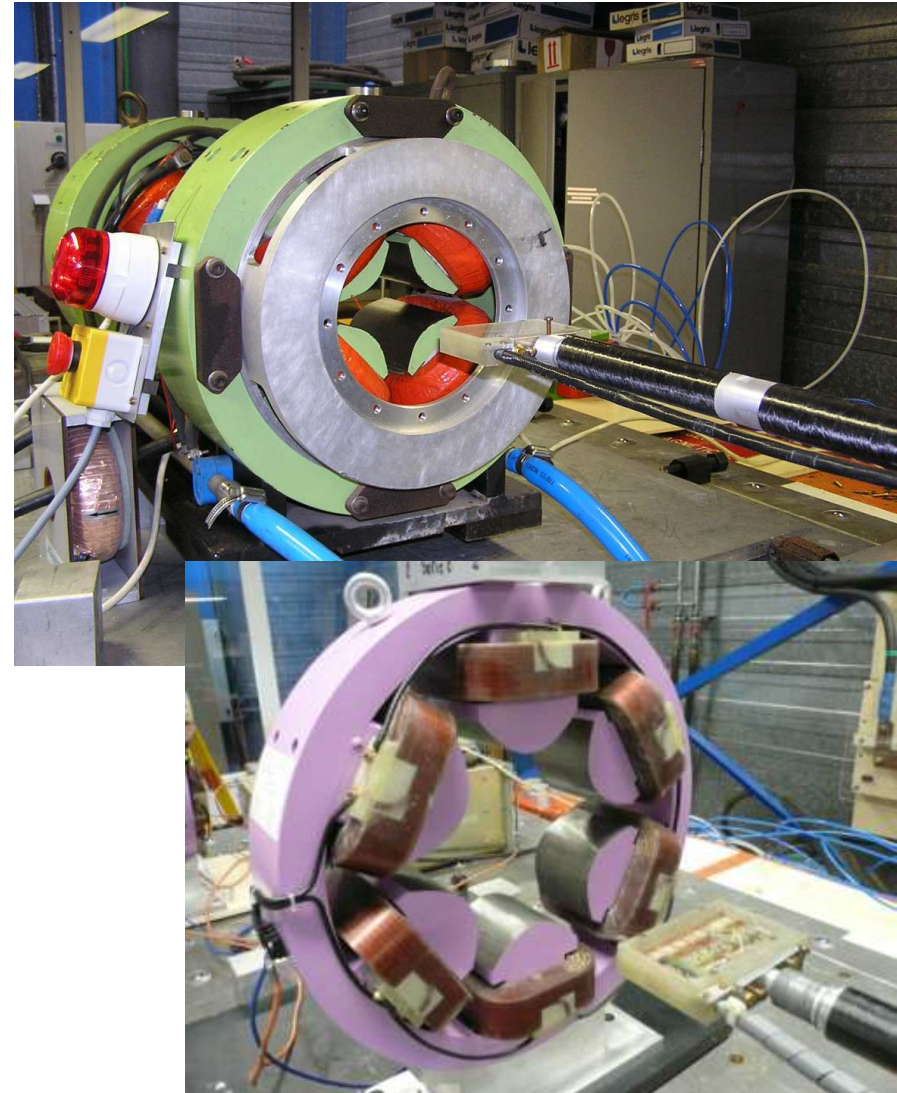
- Précision alignement $\approx 1/10$ ème de mm pour un accélérateur du type GANIL, mieux dans les sources de lumière.
- Alignement périodique à prévoir (bâtiment récent , masses importantes).
- L'usinage pôle \approx quelques $1/100^e$ de mm.
- Difficulté usinage et mesure = taille et masse .



La mesure mécanique est le premier contrôle de l'aimant

4 – 2 : Mesures / magnétiques

- Objectif des mesures : quantifier l'écart entre les simulations et le réalité
- Mesures simples : carte de champ dans le plan médian à l'aide de sondes de Hall
- Dans une série, on peut se contenter de comparer des points remarquables (champ au centre pour un dipôle, champ de fuite)
- Défauts intrinsèques des mesures Hall:
 - Température
 - précision du positionnement
 - stabilité de l'alimentation
 - bruit de conversion analogique/numérique.
 - long
- On peut utiliser des mesures « intégrales » qui sont beaucoup plus rapides. Méthode de la bobine tournante. Ne permet pas de localiser un éventuel défaut. Principalement QP.



4 – 2 : Mesures / magnétiques

- Sonde RMN : plus précises (résolution théorique 0.001 Gauss), mais ne fonctionnent pas en zone de gradient.
- Principe physique différent : fréquence de résonance proportionnelle au champ B.
- Exemple de sondes : sonde RMN Metrolab, sonde RMN CAYLAR



5 – 1 : Autres considérations / alimentations de puissance

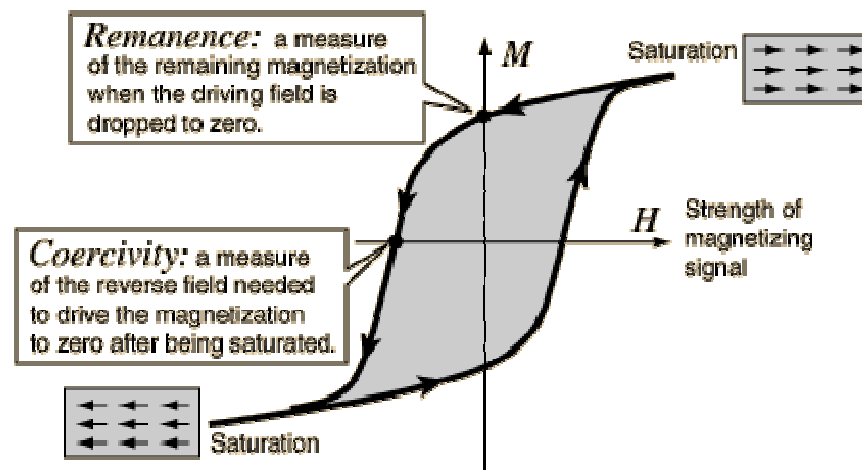
- Les alimentations de puissance sont régulées en courant
- Une régulation à l'aide d'un capteur de courant dédié indépendant de la température est nécessaire (DCCT) pour une bonne précision. Une résistance régulée peut convenir, mais tenue dans le temps problématique (usure par abrasion de l'eau).
- Il faut prévoir parfois des inverseurs de courant (quadrupôles)
- Courants importants => cout des câbles et des alimentations.



Illustration
LPSC Grenoble

5 – 2: Autres considérations / Hystérésis

- L'acier doux est un matériau non linéaire du point de vue magnétique, et qui en outre garde une aimantation résiduelle.



- ⇒ Cyclage sur les plus gros aimants afin qu'il atteignent leur champ nominal rapidement de façon reproductible. Réserve de puissance nécessaire.
- Tenir compte de l'aimantation résiduelle lorsqu'on combine deux fonctions (quad et steerer par exemple), surtout pour les mesures magnétiques
- Le champ coercitif est une caractéristique de l'acier choisi.
Ex: $H_c \text{ max} = 80 \text{ A/m}$

Voir [MAG]

5 – 3 : Autres considérations / aimants pulsés

- Utilisations des **aimants pulsés**
 - il est parfois utile d'avoir des aimants pulsés pour alimenter plusieurs lignes (septums)
 - Pour répartir le faisceau sur une cible
- Un champ magnétique pulsé provoque des **courants de Foucault** dans les objets métalliques qui y sont soumis.
- Utiliser des aciers feuilletés pour l'aimant (épaisseur de peau), des chambres à vide en verre ou en alumine
- Pour limiter les pertes, il faut rester à des fréquences inférieures à plusieurs centaines Hz. Au-delà, il faut un design d'alimentation spécifique avec un rendement faible.
- Il existe des solutions de Steerer « sur étagère »
- Voir également de cours [CAS]

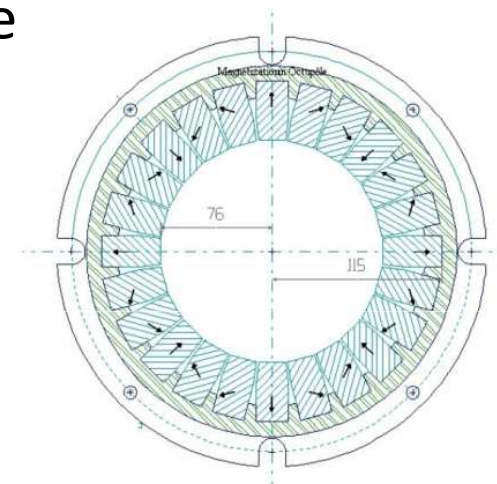
5 – 4: Autres considérations / matériaux magnétiques

- Matériaux utilisés pour leur bonnes propriétés ferromagnétiques:
 - Aciers doux à faible teneur en carbone (<0.06%), ARMCO.
 - Alliages fer-nickel type Mu-metal, Permalloy (remarque : il est très difficile de blinder contre un champ magnétique intense, on atténue simplement)
- Matériaux amagnétiques
 - Composés organiques
 - Nombreux céramiques et verres
 - Cuivre
 - Aluminium, Titane, Plomb
- Matériaux dont il faut vérifier les propriétés avant usage (perméamétrie)
 - Certains inox
 - Cordons de soudure sur l'inox

5 – 5: Autres considérations / Aimants permanents

Aimants permanents :

- Conception de multipôles (ex: dans source d'ion) selon l'idée de K.Halbach [HALBACH]
- Usinage précis est difficile
- Utilisation sur un volume restreint.
- Sensibilité à la température /désaimantation (température de Curie)
- Risques à la manipulation : d'écrasement, projection d'aimants.
- Mais: pas d'électricité ni refroidissement



Design octupole de source H⁻ (2004)
O.Delferriere et O.Tuske CEA/IRFU

5 – 6: Autres considérations / couts et délais

- Couts indicatifs d'éléments de ligne (ions lourds, $B\rho < 3T.m$) sans alimentation.
 - Bobine steerer ou quad., à l'unité : plusieurs k€
 - Steerer 10A (masse < 100kg), entre 5 et 10k€
 - Quadrupole (masse < 500kg), entre 10 et 30k€
 - Dipôle (masse < 6t) entre 20 et 80k€
 - N.B. : Cout cuivre OHFC : 12€/kg - Cout acier (brut) : 1.5 à 2 €/kg
 - Le nombre d'heures d'usinage dépend de la taille des pôles principalement

Pour plus de détails, voir [CAS]

- Délais fabrication
 - Délai d'approvisionnement de l'acier (souvent > 3 mois)
 - Bobine seule : 6 à 9 mois voire plus...
 - Aimant « simple » : 9 à 12 mois
 - Aimant complexe : 12 à 24 mois



6 – 1: Références / constructeurs



- SEF (région Toulousaine)
- Sigmaphi (région de Vannes)
- Tesla Ltd (UK)
- Danfysik (Danemark)
- Scanditronix (Suède)
- Buckley Systems (Nouvelle Zélande)



DANFYSIK

Autres constructeurs (très grands aimants):

- BINP (Novossibirsk, Russia)
- Alstom
- Ansaldo (Italie)

6 – 2: Références / bibliographie

OUVRAGES GENERAUX

- [DURAND] **Magnétostatique**, E.Durand , Edition Masson et Cie, 1968
- [TANABE] **Iron Dominated Magnets**, Jack T. Tanabe, Edition World Scientific, ISBN 961-256-381-4
- [MAG] **Magnétisme tome I et II**, ouvrage collectif sous la direction de E.du Tremolet de Lachassière, PUG, ISBN 2-7061-0831-2
- [SEPTIER] **Focusing of charged particules**, A.Septier, Academic Press, 1967- Chapitre “deflecting magnets”
- [WOLLNICK] **Optics of charged particles**, H.Wollnik, Academic Press 1987, ISBN 0-12-43386-4
- [CAS] **Cern Accelerator School on Magnets**, 2009, en particulier **Zickler**, Bottura, Zgobba, Moritz, Barnes,...

AUTRES PUBLICATIONS UTILES (pas toujours accessibles)

- [DUVAL] : cours sur les aimants, communication privée (ce cours en contient de larges extraits)
- [QUAD] Etude de lentilles magnétiques à focalisation forte, Grivet, Septier et Hue
- [SOLENOIDE] A Discussion on solenoide focusing, présentation de Matthew Fraser, CERN
- [ROG] Longitudinal Profile and Effective Length of a Conventional Dipole Magnet J.F.OSTIGUY Fermilab, PAC 1993 (IEEE)
- [MESURE] Cartographie magnétique des quadripôles des spectromètres haute résolution [...]Jefferson Laboratory, Thèse de doctorat soutenue par Gilles Quémener, 1997, Université Blaise Pascal
- [MIC] Radiation-hardened magnets using mineral Insulated conductors (A.Harvey Los Alamos Scientific Laboratory- 1969)
- [CERN RAD] : Résistance aux rayonnements ionisants des matériaux utilisés autour des accélérateurs du CERN (CERN 79_04)
- [HALBACH] Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material, NIM 198 (1982),213-215

Merci de votre attention.

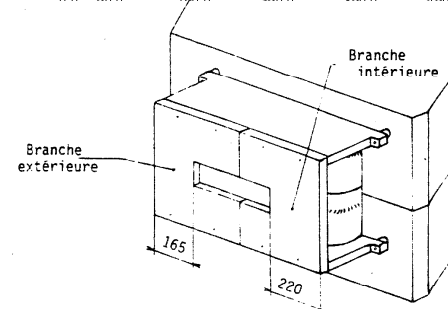
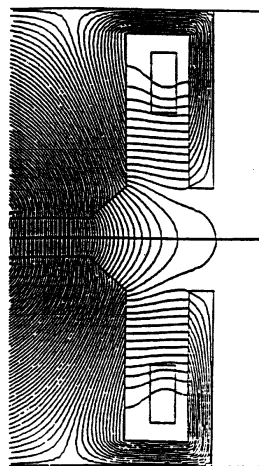
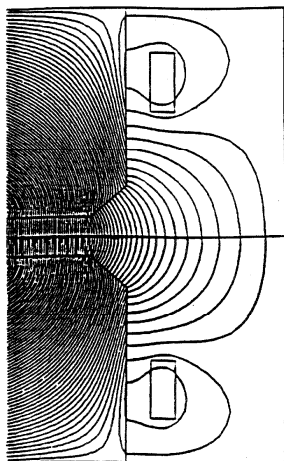
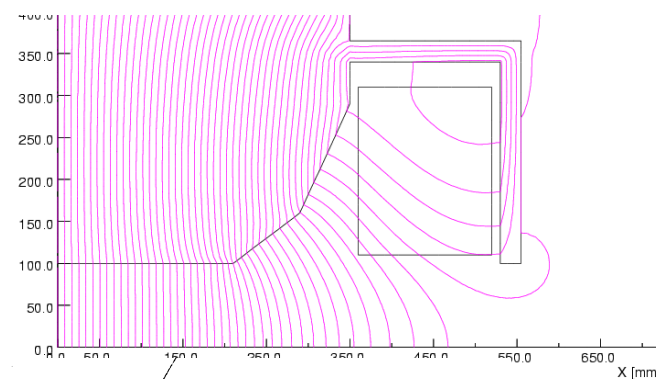
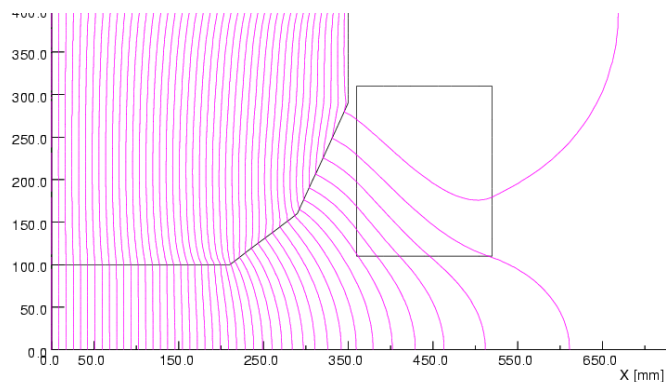
Remerciements

à Maurice Duval pour ses propres cours,

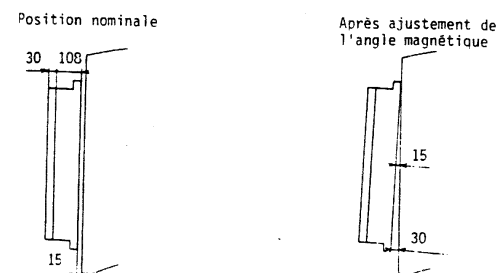
à mes collègues relecteurs du GANIL,

à Olivier Delferrière dont le travail m'a fourni plusieurs illustrations

EFFET DES PLAQUES DE GARDE /REGLAGE DE L'ANGLE REEL



Spectro alpha GANIL



EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT RAPIDE D'UN QUADRIPOLE

Diamètre de gorge : 70 mm
 Gradient max. : 20 T/m
 Longueur de gradient : 300 mm

Nombre d' Ampère Tours (NI) :

Pour une bobine : $NI = G r^2 / 2 \mu_0 = 9750 \text{ A.Tours}$

On prend en compte la consommation fer : $\rightarrow NI = 10500 \text{ A.Tours}$

Largeur de pôle ($L_{p\hat{o}le}$) : $L_{p\hat{o}le} = 70 \text{ mm}$

Longueur de fer (L_{fer}) : $\rightarrow L_{fer} = 270 \text{ mm}$

Section de la bobine : $S = NI / \delta$

On choisit une densité de courant $\delta \approx 10 \text{ A/mm}^2 \rightarrow S_{cu} = 10500 / 10 = 1050 \text{ mm}^2$

Compte tenu du foisonnement, de l'isolation et du canal de refroidissement, on corrige la section de la bobine :

$\rightarrow S_{bob} \approx 1050 / 0,6 = 1750 \text{ mm}^2$

7: Annexes

DIMENSIONNEMENT RAPIDE D'UN QUADRIPOLE / Bobine

Longueur moyenne de spire :

Compte tenu de la largeur du pôle, de la longueur de fer et de la section de la bobine, on obtient la longueur moyenne de spire :

$$\rightarrow l_{sm} = 0,85 \text{ m}$$

Puissance :

Pour une bobine : $P = R I^2 = \rho l / S I^2 = \rho l_{sm} \delta (NI)$

$$P = 1,7 \text{ kW} \quad \rightarrow \quad P = 6,8 \text{ kW (4 bobines)}$$

Choix du nombre de spires : ... compromis avec classe d'alimentation

$$NI = 10500 \text{ A.Tours} \quad \rightarrow \quad \text{on choisit } \mathbf{N = 44} \quad \Rightarrow \quad I = 240 \text{ A}, U \approx 30 \text{ V}$$

Choix du conducteur : ... compromis avec le refroidissement

conducteur carré 6 x 6 mm² percé d'un $\Phi 4$ et un unique circuit hydraulique

$$\rightarrow S_{Cu} = 22,44 \text{ mm}^2$$

$$\rightarrow S_{Cu} = 12,56 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow P_{réelle} = 1,85 \text{ kW}$$

7: Annexes

DIMENSIONNEMENT RAPIDE D'UN QUADRIPOLE / Refroidissement

Perte de charge, formule générale :

où

λ = coefficient de perte de charge

ω = masse volumique du fluide

V = vitesse d'écoulement

L = longueur de la tuyauterie

d = diamètre de la tuyauterie

$$\Delta P = \frac{\lambda \omega V^2 L}{2 g d}$$

on dispose d'un circuit de réfrigération à 15 bar (avec retour à 3 bar) \Rightarrow ΔP fixé à 12 bar

\rightarrow vitesse d'écoulement :

$$V^2 = \frac{2 g d \Delta P}{\lambda \omega L} = \frac{2 \times 9.81 \times 4 \cdot 10^{-3} \times 12 \cdot 10^4}{0,03 \times 10^3 \times 44 \times 0,84} \rightarrow V = 2,9 \text{ m/s}$$

\rightarrow Débit

$$Q = V S$$

$$Q = 2,9 \times 12,56 = 36,5 \text{ cm}^3/\text{s}$$

\rightarrow élévation de température :

$$\Delta \theta = \frac{P}{4,18 Q}$$

$$\Delta \theta = 1850 / 4,18 \times 36,5 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

7: Annexes

Mémento en anglais

Aimant	Magnet
Culasse	Yoke
Pôle	Pole
Entrefer	Gap
Rayon de gorge	Bore diameter
Bobine	Coil
Chanfrein	Chamfer
Isolant	Insulation
Perte de charge	Pressure Drop
Zone utile	Good field region
Champ de fuite	Fringe field
Courant de Foucault	Eddy current
Plaque de garde	End plate
Bobine de compensation	Trim coil