

# Le Grand Collisionneur Hadronique (LHC) du CERN

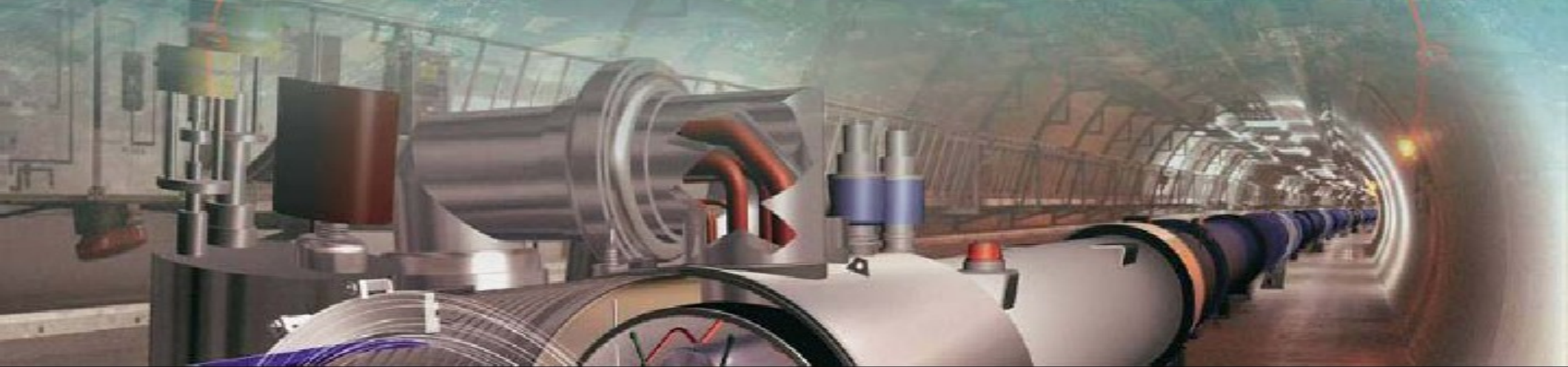
Cours de l'école doctorale  
de physique de Grenoble

Johann Collot

<http://lpsc.in2p3.fr/collot>  
[collot@in2p3.fr](mailto:collot@in2p3.fr)

LPSC de Grenoble

Université Joseph Fourier  
CNRS/IN2P3  
Grenoble INP



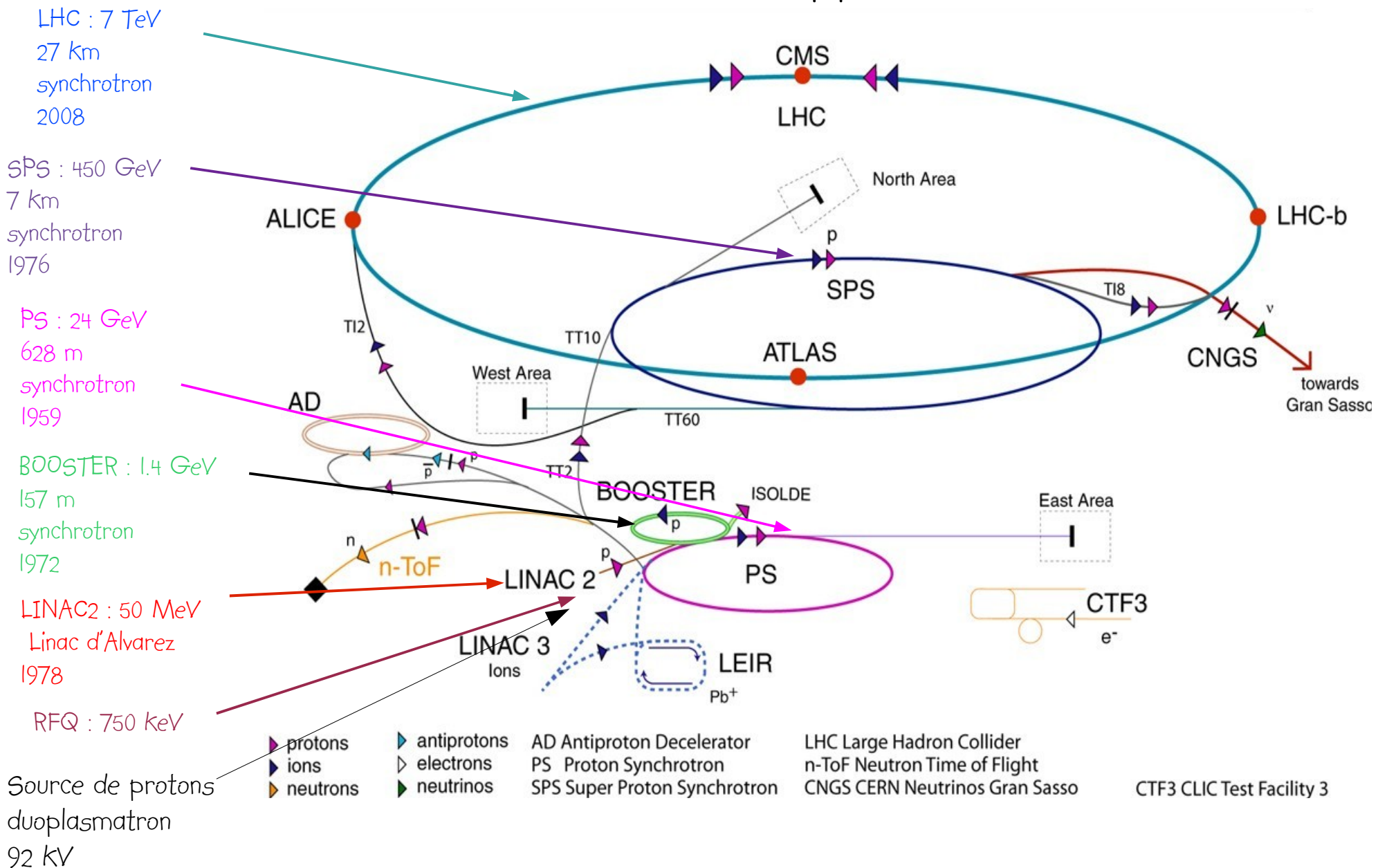
# Histoire du programme LHC

- 1977 : première mention du LHC comme une suite possible du LEP au CERN (John Adams)
- décembre 1983 : premiers groupes de réflexion sur l'intérêt de la construction d'un collisionneur de hadrons dans le tunnel du LEP organisés par Carlo Rubbia
- mars 1984 : atelier organisé à Lausanne par le CERN et l'ECFA sur le LHC dans le tunnel du LEP
- 1985 : groupe de travail présidé par Carlo Rubbia
- 1987 : journées de La Thuile organisées par le CERN et l'ECFA
- 1989 : journées de Barcelone organisées par le CERN et l'ECFA marquent la formation des premiers embryons des collaborations
- octobre 1990 : Atelier sur le LHC organisé à Aix-la-Chapelle par l'ECFA
- 1990 : mise en place au CERN du Detector R&D Committee (DRDC)
- mars 1992 : réunion générale à Évian de présentation des proto-collaborations ayant envoyé des Expressions d'Intérêt . Trois Lettres d'Intention sont ensuite expédiées au CERN : L3P, CMS et ATLAS
- 1992 : Mise en place du LHC Committee (LHCC)
- 1993 : le LHCC approuve ATLAS et CMS et rejette L3P
- 16 décembre 1994 : approbation officielle de la construction du LHC à 14 TeV en deux étapes : 9 TeV pour 2004 et 14 TeV pour 2008
- 20 décembre 1997 : décision de construire le LHC en une seule étape à 14 TeV pour 2005
- 1997 : approbation de l'expérience ALICE
- 1998 : approbation de l'expérience LHCb

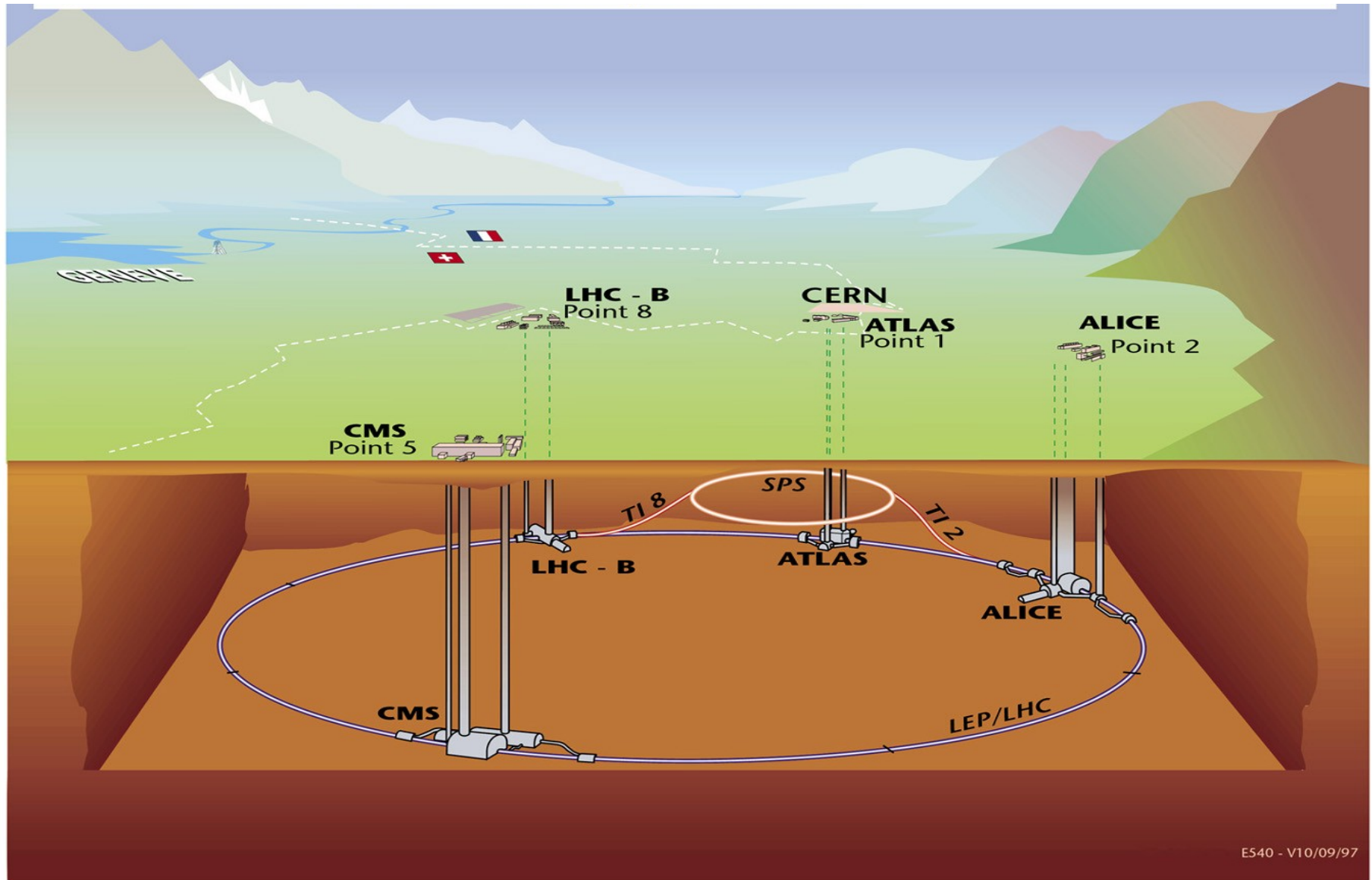
construction des expériences et de la machine

- 2008 : le LHC démarre ...

# LHC : collisionneur pp 2 x 7 TeV



# Vue générale souterraine des expériences

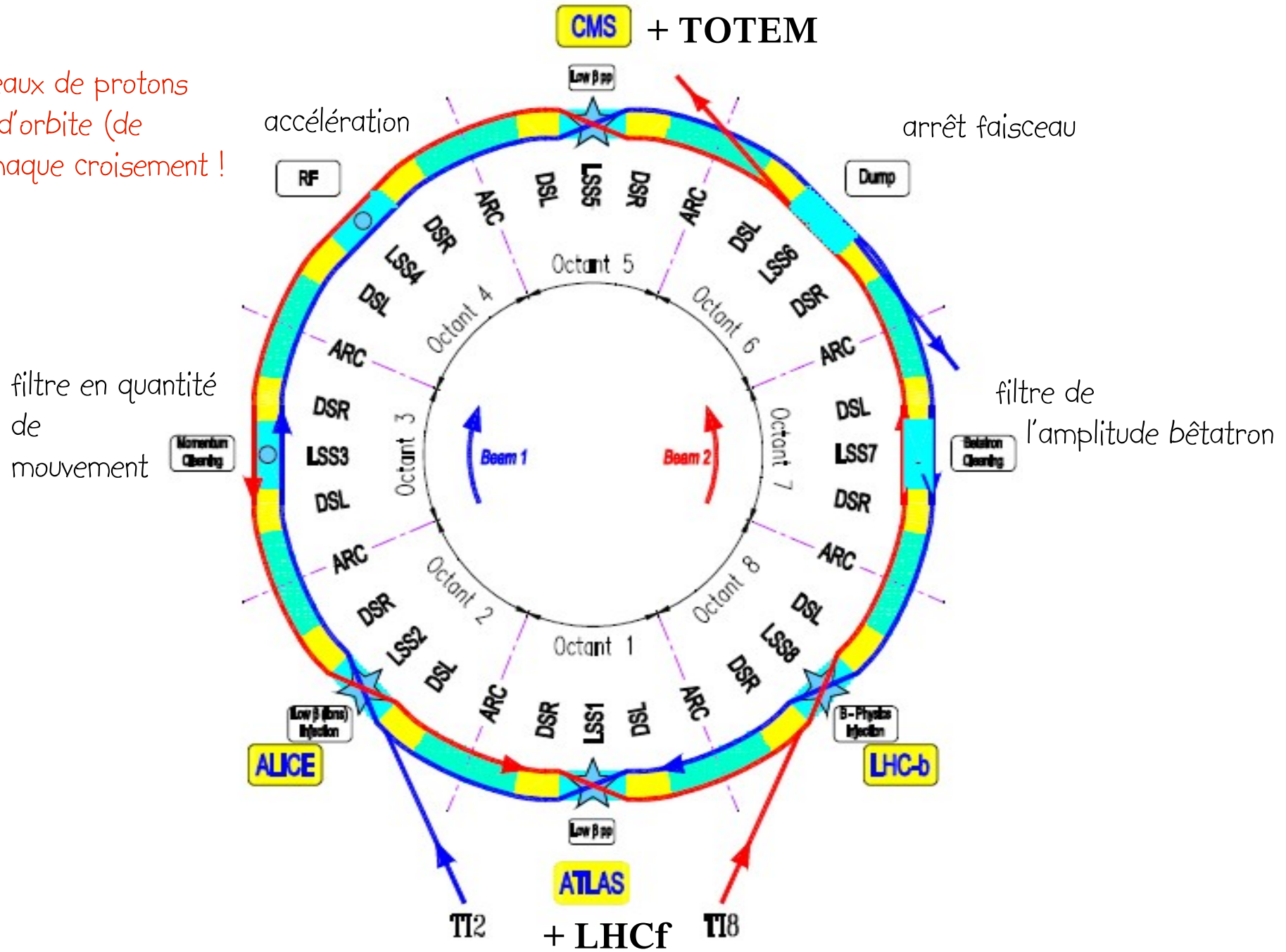


E540 - V10/09/97

- Plus les expériences :
- TOTEM intégrée au détecteur CMS
  - LHCf située à +/- 140 m du point de collision d'ATLAS
  - MeODAL située auprès de LHCb

# schéma d'ensemble du LHC

Les faisceaux de protons changent d'orbite (de tube) à chaque croisement !



# Principes fondamentaux de l'accélération de particules chargées

Force de Lorentz induite par des champs électrique et magnétique sur une charge  $q$  :

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{V} \times \vec{B}$$

force accélératrice  
gain d'énergie  
et changement possible de direction

force défléctrice : changement de direction  
et focalisation  
Mais aucun gain d'énergie

Théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_{cin} = \int \vec{F} \cdot d\vec{s} = q \int \vec{E} \cdot d\vec{s} + q \int (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{V} dt = q \int \vec{E} \cdot d\vec{s} = \Delta E_{tot}$$

avec :  $E_{tot} = E_{cin} + m$

=0

# Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme

$$q = Ze$$

$$q V_{\perp} B = \gamma m \frac{V_{\perp}^2}{r}$$

$$q B = \gamma m \frac{V_{\perp}}{r}$$

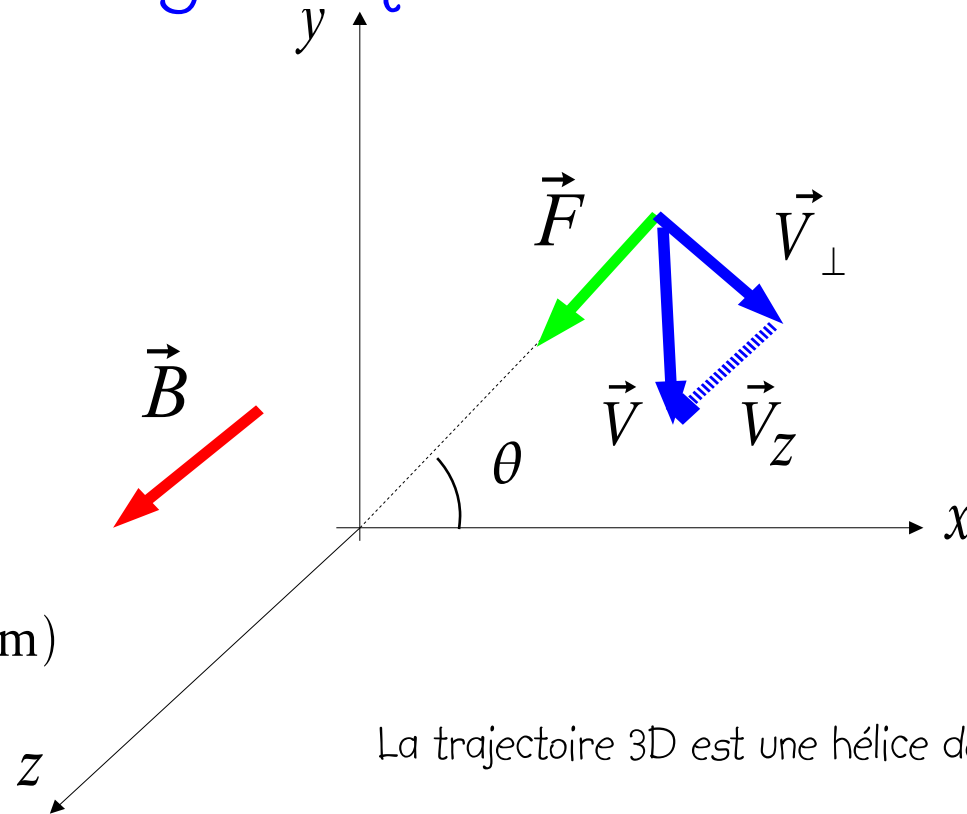
$$P_{\perp} = q B r$$

$$P_{\perp} (\text{GeV}) = 0,3 z B(\text{T}) r(\text{m})$$

$r$  rayon de l'orbite.

Rigidité magnétique :

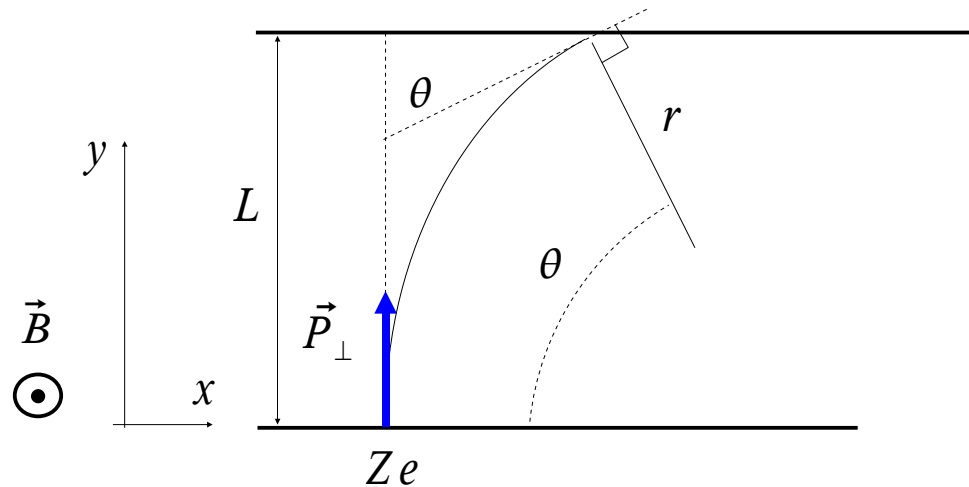
$$B(\text{T}) \rho(\text{m}) = 3,33 P_{\perp}(\text{GeV}) / z$$



La trajectoire 3D est une hélice de pas  $p^h$  avec :

$$P_z (\text{GeV}) = \frac{0,3}{2\pi} z B(\text{T}) p^h(\text{m})$$

# Angle de déflexion



$$\sin \theta = \frac{L}{r} = 0,3 \approx \frac{B(\text{T}) L(\text{m})}{P_{\perp}(\text{GeV})}$$

Aimants dipolaires du LHC :

Sachant que le LHC est une machine polygonale qui compte 1232 côtés, l'angle de déflexion par dipôle vaut :  $\theta = \frac{2\pi}{1232}$  Ce qui conduit à :  $B L = 119 \text{ T m}$

Les dipôles du LHC seront supraconducteurs, bobinés à partir de conducteur en Nb-Ti .  
Ils seront refroidis à la température de 1,9 K par de l'hélium liquide superfluide.

Si  $L = 14,3 \text{ m}$  alors  $B = 8,33 \text{ T}$

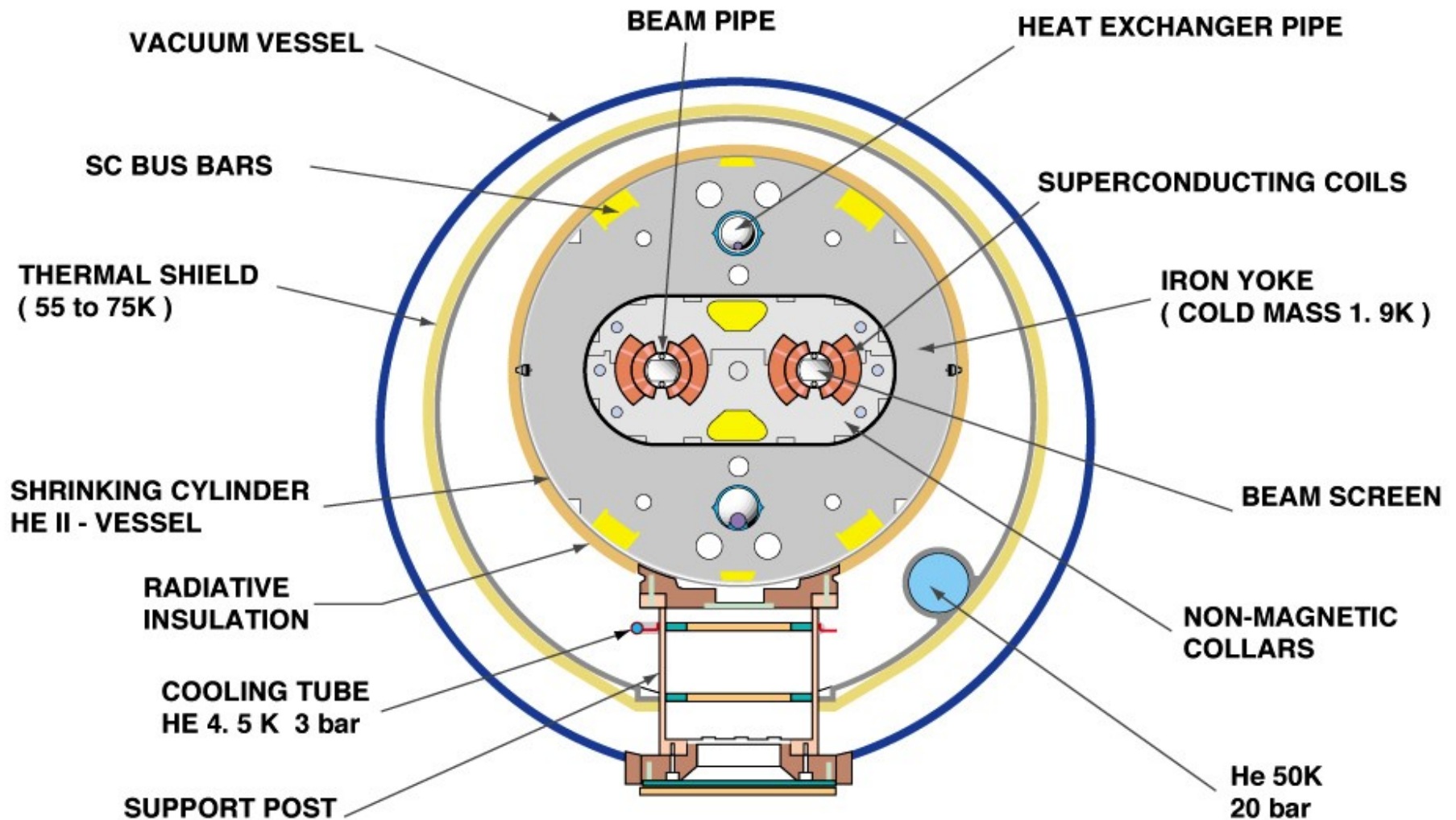
La circonférence totale de la machine est de 26659 m dont 66% est couverte par des dipôles.

Chaque dipôle sera courbé de 9,1 mm sur 14,3 m pour compenser la flèche du faisceau au centre.

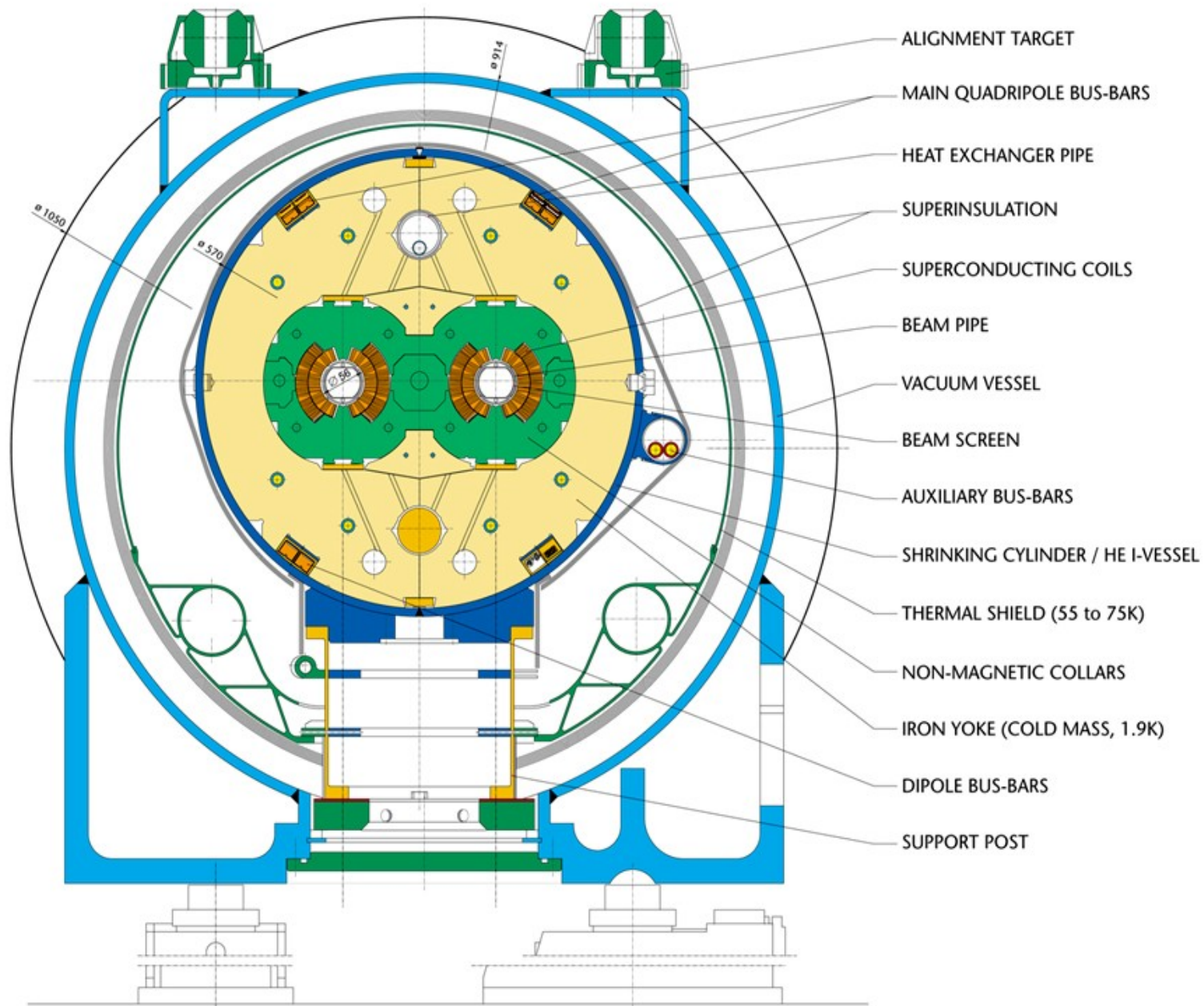
exo : montrer que  $f = r \cdot (1 - \cos \theta / 2) \approx \frac{r \cdot \theta^2}{8}$



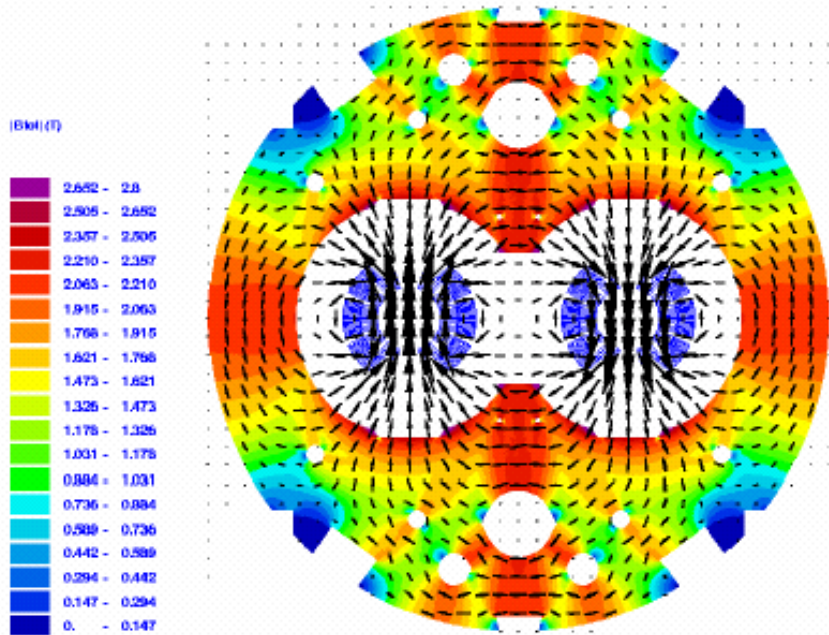
# CROSS SECTION OF LHC DIPOLE



# LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



CERN AC/DI/MM - HE107 - 30 04 1999

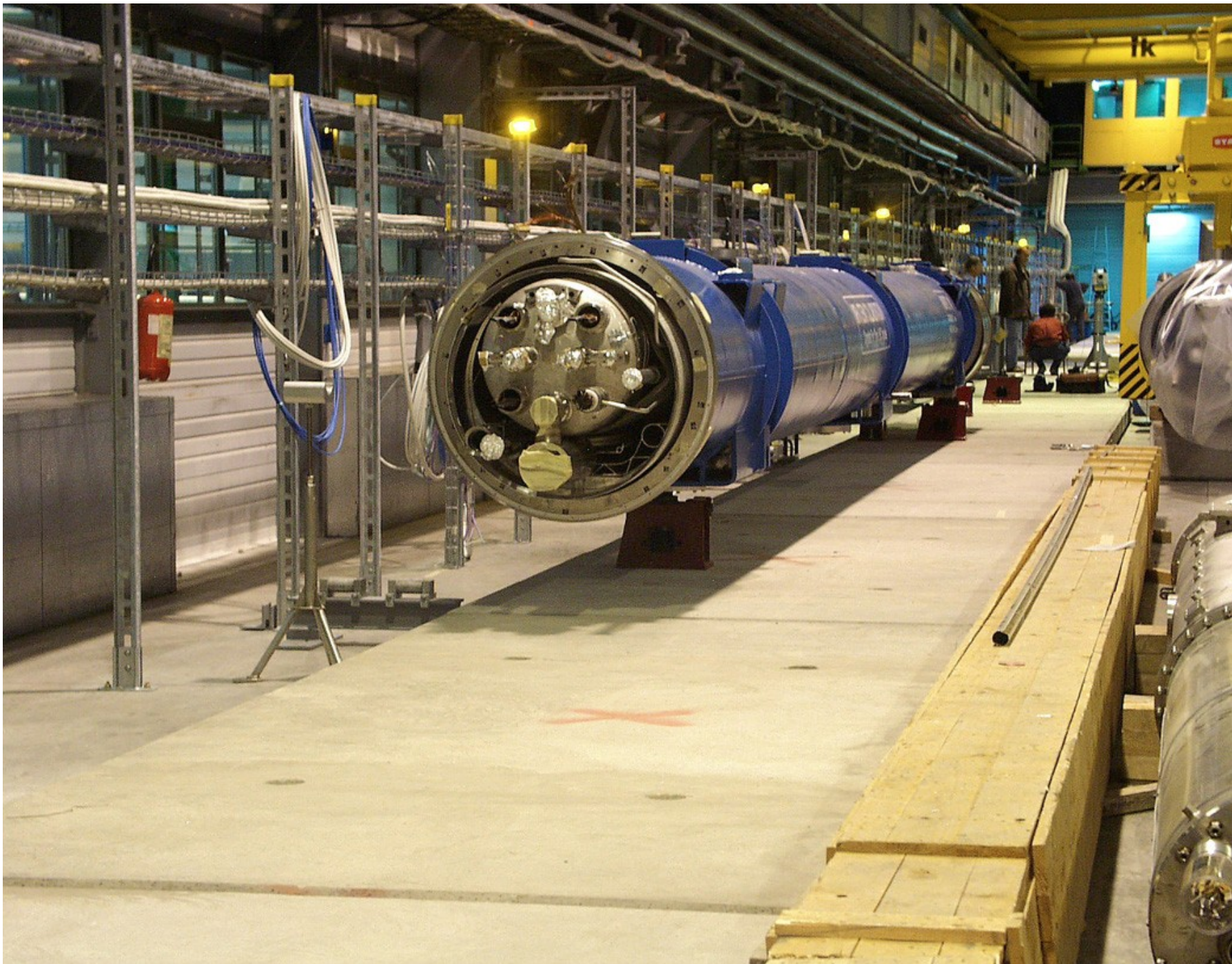


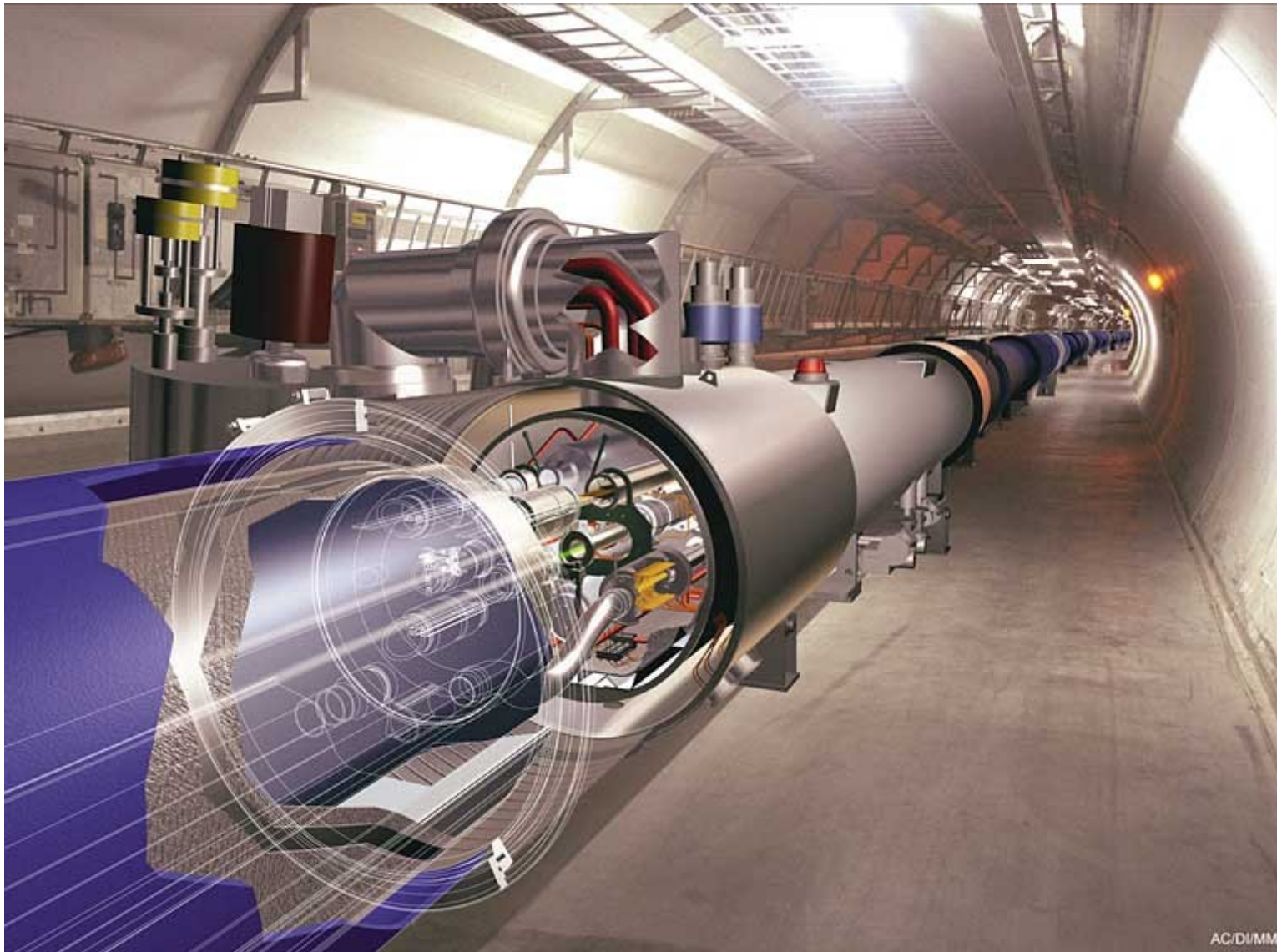
Reproductibilité du champ  $\sim 10^{-3}$

Homogénéité du champ  $\sim 10^{-4}$

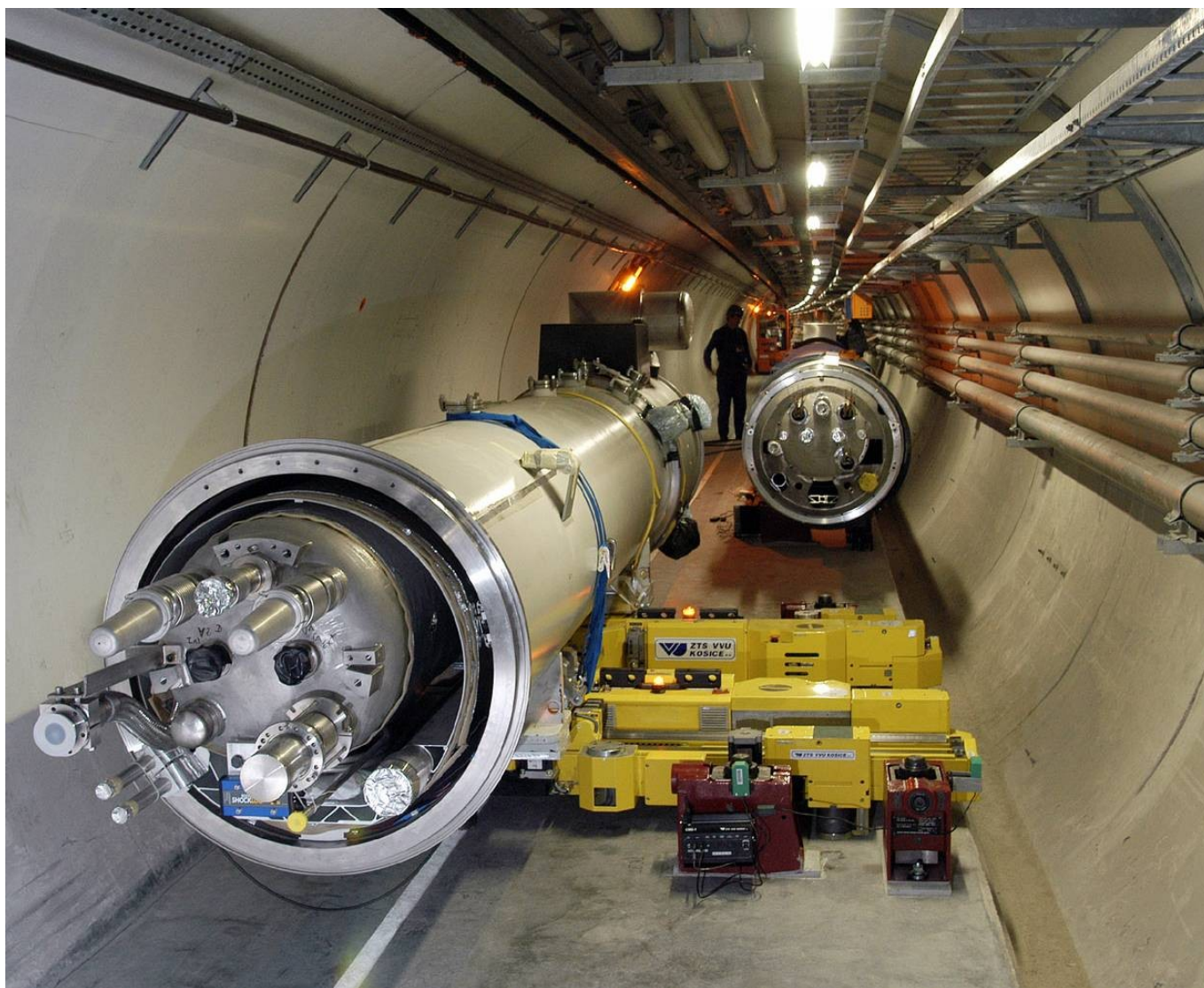


Précision de bobinage  $< 0,050$  mm



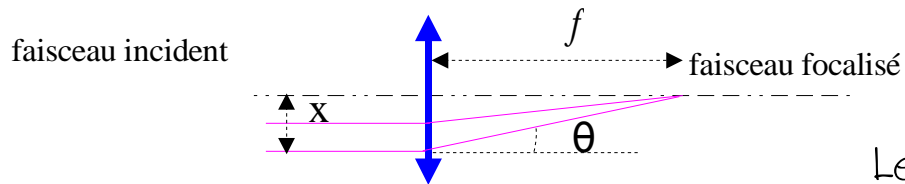


AC/DI/MM



# Focalisation des faisceaux

Guider et défléchir un faisceau ne suffit pas, il faut également le focaliser.



Le quadripôle magnétique fin de profondeur  $l$ , joue le rôle d'une lentille convergente ou divergente :

Un quadripôle parfait développe des composantes de champs qui croissent linéairement avec l'écart à l'axe :

$$B_y = \frac{\partial B_y}{\partial x} x, \quad B_x = \frac{\partial B_x}{\partial y} y$$

avec :

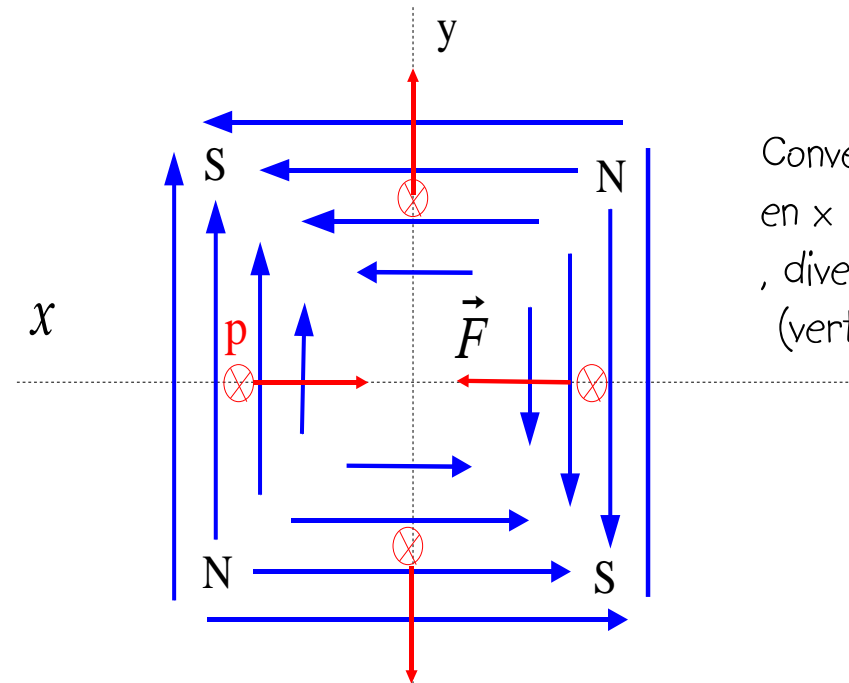
$$\frac{\partial B_y}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial y} = \text{cte}$$

Raideur  $k$  d'un quadripôle :

$$k = \frac{1}{B_y \rho} \frac{\partial B_y}{\partial x} \quad [k] = \text{m}^{-2}$$

alors :

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \frac{x}{f} \approx \theta = \frac{l}{\rho} = \frac{l B_y}{B_y \rho} = l \frac{(\partial B_y / \partial x) x}{B_y \rho} = l k x$$



Convergente en  $x$  (horizontale),  
divergente en  $z$  (verticale)

d'où :

$$f = \frac{1}{kl}$$

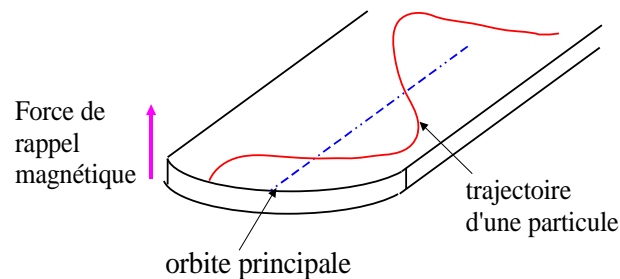
# Focalisation et guidage des faisceaux

Doublet (ou triplet) de quadripôles séparés d'une distance  $d$  : 
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

Si :  $f_1 = -f_2 = f'$  
$$f = \frac{|f_1 f_2|}{d} = \frac{f'^2}{d}$$

Donc si l'on place un quadripôle convergent suivi d'un quadripôle divergent, on construit une lentille globalement convergente qui offre la même distance focale selon les deux directions.

En disposant sur le parcours des particules une succession de quadripôles – convergents et divergents en alternance – on maintient ainsi le faisceau sur son orbite dans le synchrotron.

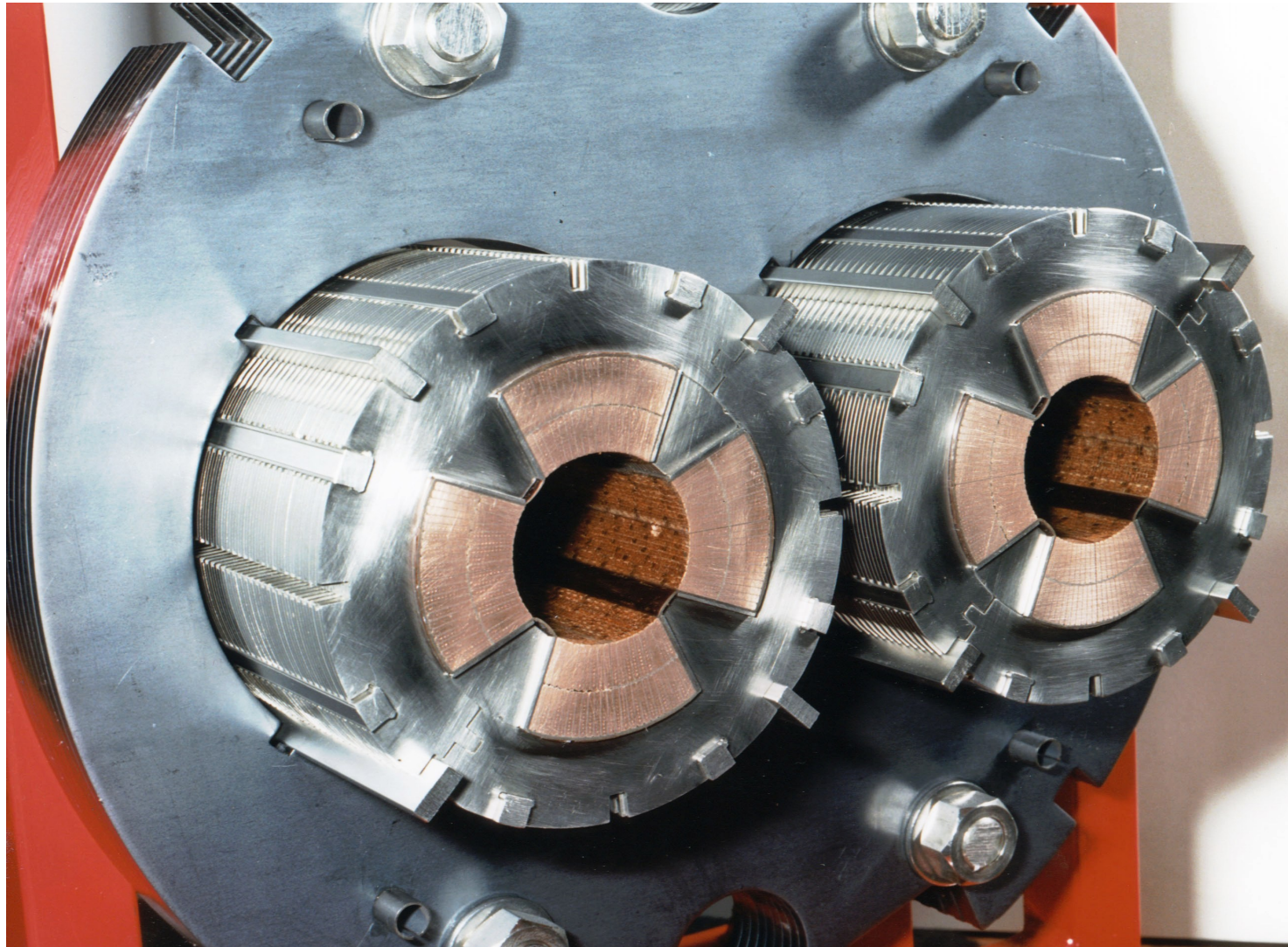


Les particules possédant une quantité de mouvement transverse oscillent autour de l'orbite centrale dans un mouvement comparable à celui d'une bille dans une goulotte concave : c'est le mouvement oscillatoire *bétatron*.

Il faut alors veiller à ce que la longueur d'onde de ce mouvement ne soit pas un multiple d'une dimension de la machine.



# Quadripôles principaux du LHC



Gradient de champ = 223 T/m , longueur magnétique = 3,1 m  
exo : calculer la raideur et la distance focale de ces quadripôles

$k = 9,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$  (à puissance max)  
 $f = 33,7 \text{ m}$  (valeur minimale) 17

# Structure du LHC

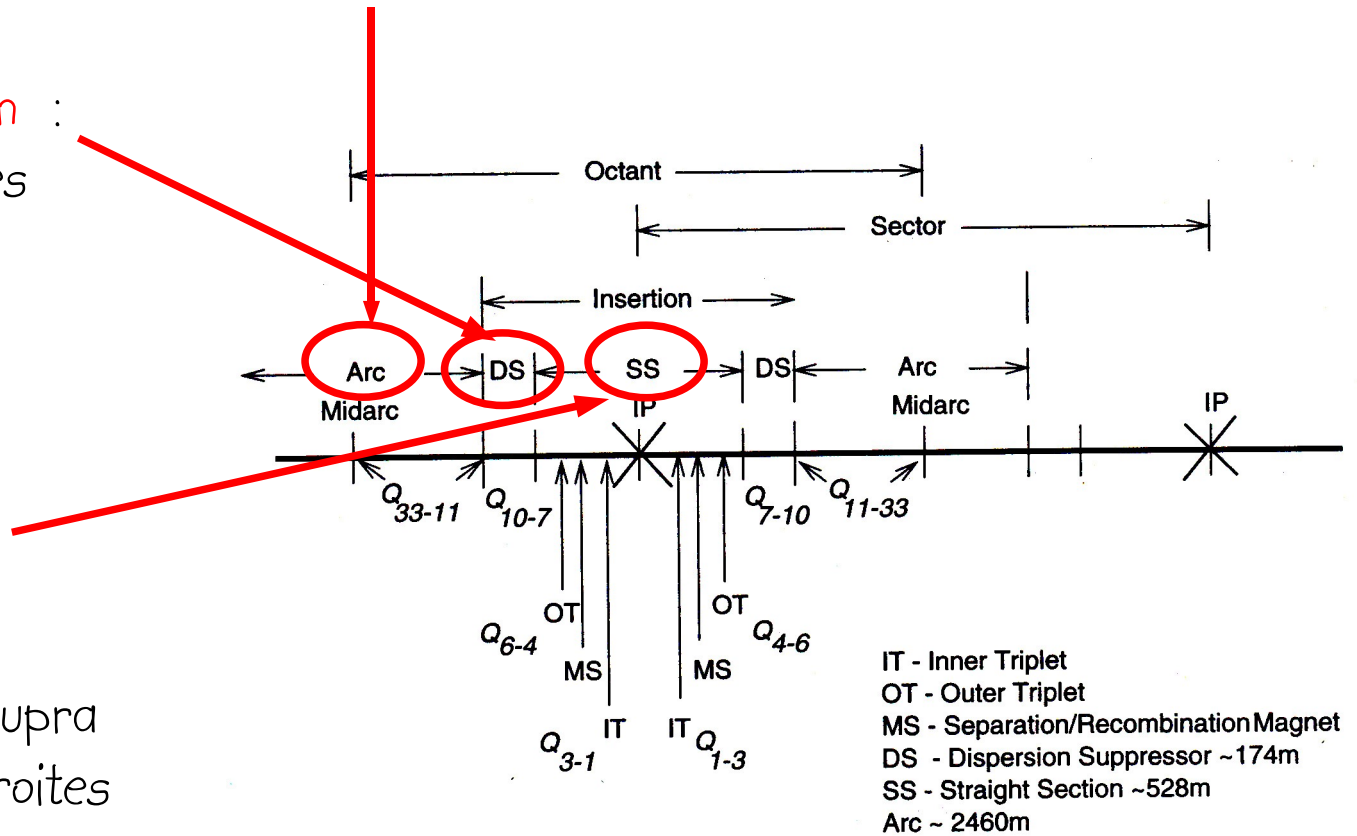
8 octants identiques : 8 arcs, 8 sections droites, 16 supresseurs de dispersion

**arc** : 23 cellules (FODO) de 2 quadripôles (F et D) et 6 dipôles de courbure  
+ aimants de correction ( correcteurs d'orbite, octupôles, sextupôles, décapôles ...)

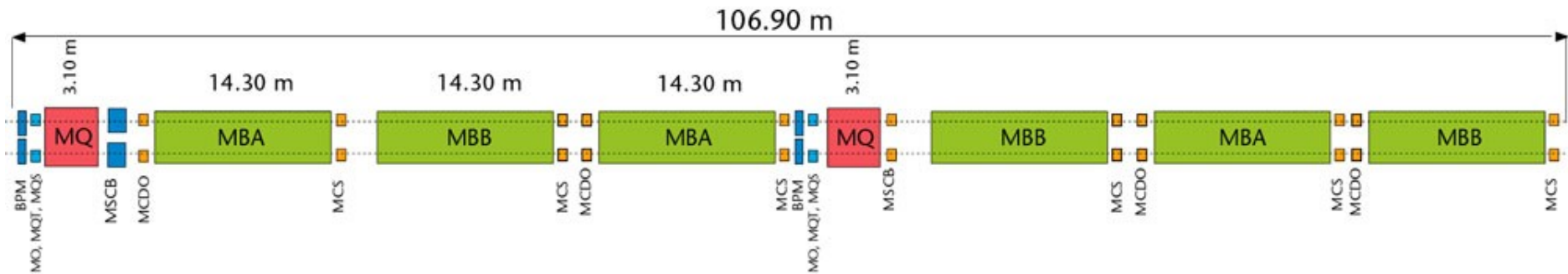
**suppresseur de dispersion** :  
8 dipôles + 4 quadripôles

**section droite** :  
12 quadripôles ( 4 x 3 )  
de focalisation +  
aimants de séparation  
et recombinaison

8 cavités accélératrices supra  
dans l'une des sections droites  
par faisceau



# Schematic layout of one LHC cell (23 periods per arc)



- MQ: Lattice Quadrupole
- MO: Landau Octupole
- MQT: Tuning Quadrupole
- MQS: Skew Quadrupole
- MSCB: Combined Lattice Sextupole (MS) or skew sextupole (MSS) and Orbit Corrector (MCB)
- BPM: Beam position monitor
- MBA: Dipole magnet Type A
- MBB: Dipole magnet Type B
- MCS: Local Sextupole corrector
- MCDO: Local combined decapole and octupole corrector

# Luminosité

$$L_0 = \frac{f_r n_p N_1 N_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

$N_1$  nbre de particules par paquet dans le faisceau 1

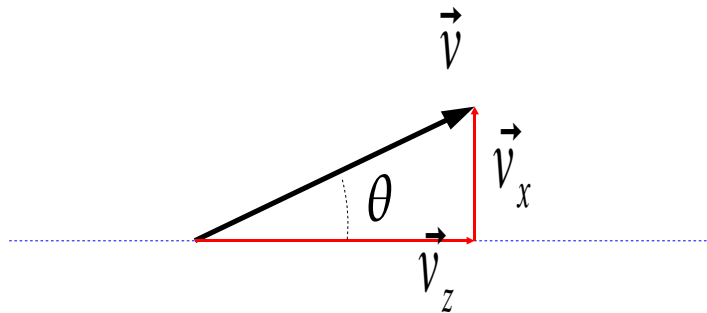
$N_2$  nbre de particules par paquet dans le faisceau 2

$f_r$  est la fréquence de révolution

$n_p$  est le nombre de paquets par faisceau

$\sigma_x$  et  $\sigma_y$  sont les écarts type transverses des faisceaux

Si les faisceaux ne sont pas parallèles, c-à-d s'il existe une distribution transverse non nulle des vitesses, pour chaque particule  $i$ , on peut relier son angle de divergence avec sa vitesse transverse :



$$\sin\theta = \frac{v_x}{v_z} \simeq \theta$$

Dans l'espace des phases :  $\{x^i, v_x^i, y^i, v_y^i, z^i, v_z^i\}$

ou encore :  $\{x^i, x''^i, y^i, y''^i, s^i, \delta^i\}$

avec :

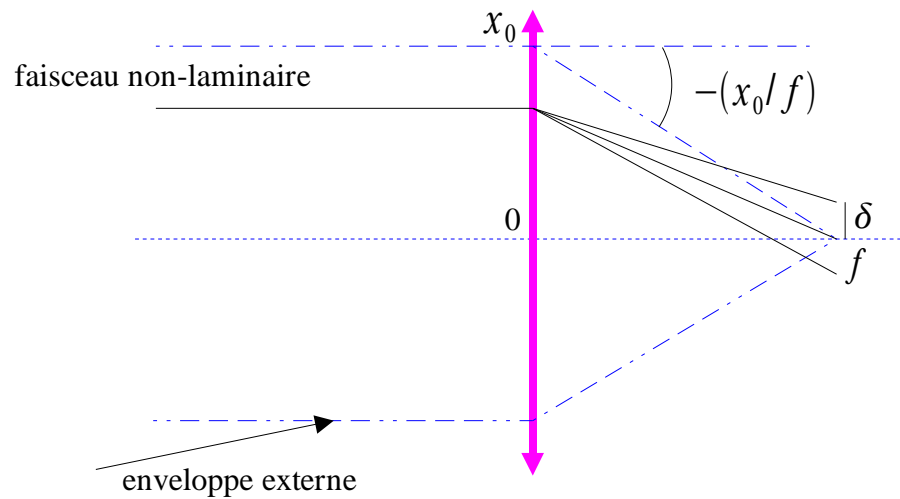
$$x''^i = \frac{v_x^i}{v_s^i}$$

$$y''^i = \frac{v_y^i}{v_s^i}$$

$$\delta^i = \frac{E^i - E_0}{E_0}$$

$$E_0 = \langle E^i \rangle$$

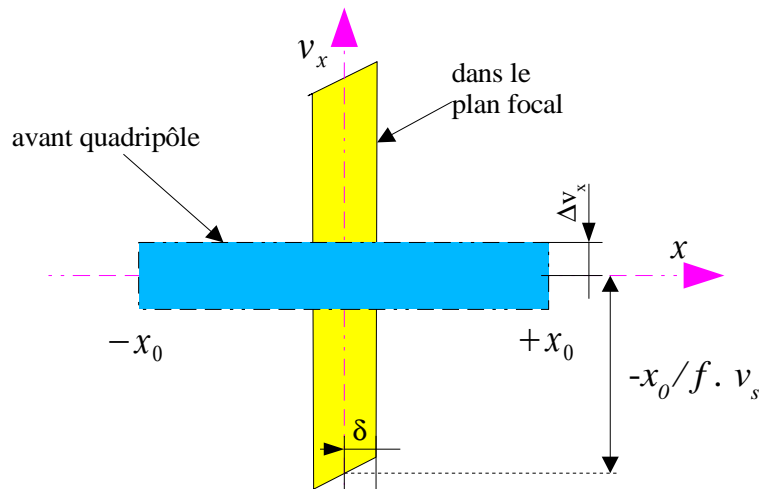
# Focalisation dans les sections droites



Ici  $f$  est la distance focale du quadripôle convergent

Au point focal, la vitesse transverse est comprise entre :  $-(x_0/f) \cdot v_s$  et  $+(x_0/f) \cdot v_s$

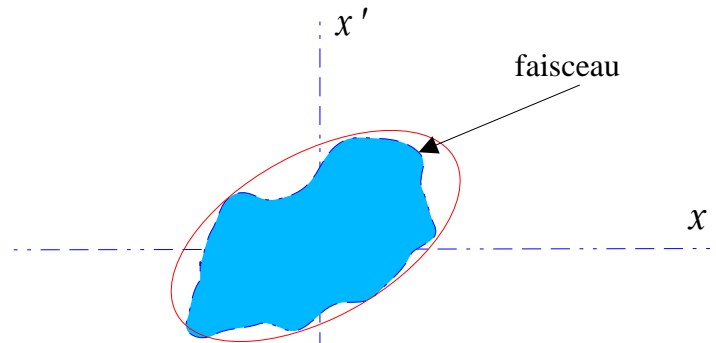
Si le problème est conservatif (pas de collision interne inélastique dans un paquet, effet faible du rayonnement), on peut utiliser le théorème de Liouville lequel implique la conservation de l'aire occupée dans l'espace des phases.



$$A_p = A_f = 4 \delta \frac{x_0}{f} \cdot v_s = 4 x_0 \Delta v_x$$

$$\text{soit : } \delta = \frac{\Delta v_x}{v_s} \cdot f$$

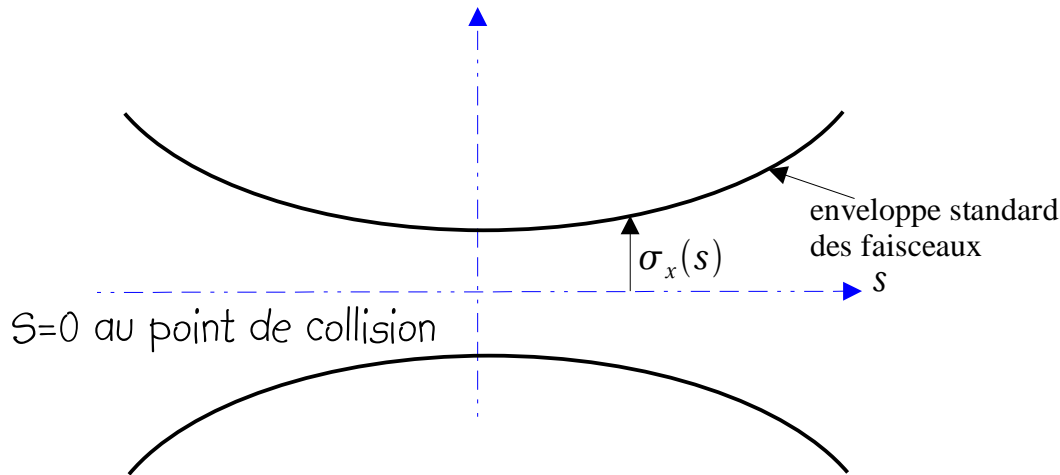
# Focalisation et émittance



L'émittance du faisceau est la surface de l'ellipse qui englobe le faisceau dans l'espace des phases, pour la direction donnée.

$$\epsilon_x = \iint_{\text{ellipse}} dx dx' / \pi$$

Dans le cas d'une section droite de collision :



$$\sigma_x(s) = \sqrt{\left(\beta_x^* + \frac{s^2}{\beta_x^*}\right) \cdot \epsilon_x}$$

où :  $\beta_x^*$  est la valeur de la fonction bétatron au point de collision

on obtient alors :

$$L_0 = \frac{f_r n_p N_1 N_2}{4\pi \sqrt{\beta_x^*} \epsilon_x \sqrt{\beta_y^*} \epsilon_y}$$

ou si le faisceau est rond :

$$L_0 = \frac{f_c n_p N_1 N_2}{4\pi \beta^* \epsilon}$$

# Luminosité du LHC

Fréquence de révolution : 11,25 kHz

Nombre de paquets par faisceau : 2808

Chaque paquet contenant  $1,15 \cdot 10^{11}$  protons.

L'émittance normalisée :  $\epsilon^* = \beta \gamma \epsilon = 3,75 \cdot 10^{-6}$  m rad

La valeur de la fonction *bétatron* au point de collision :  $\beta^* = 0,55$  m

$$\sigma_x = \sigma_y = \sqrt{\epsilon \beta^*} = \sqrt{5 \cdot 10^{-10} \cdot 0,55} = 16,6 \mu\text{m}$$

Le faisceau du LHC est transversalement rond

$$L_0 = \frac{3,16 \cdot 10^7}{4\pi} 1,15^2 \frac{10^{22}}{0,55 \cdot 5 \cdot 10^{-10}} = 1,21 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Il faut également tenir compte du fait que les faisceaux se croisent avec un angle de 285 mrad ce qui introduit un facteur géométrique de réduction de 0,84 soit au final :

$$L_{LHC}^{max} = 1,01 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

# Paramètres principaux du LHC

Energie	0,45 - 7 TeV
Champ dipolaire	0,535 - 8,3 T
Luminosité	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Courant par faisceau	0,582 A
période des paquets	25 ns
Nbre de paquets	2808
nbre de particules / paquet	$1,15 \cdot 10^{11}$
Énergie magnétique totale stockée	13 GJ
Energie stockée par faisceau	362 MJ
Fréquence de révolution	11,245 kHz
Fréquence HF	400,8 MHz
Harmonique de la HF	35640
Gain en énergie par tour	485 keV
Émittance transverse normalisée	$3,75 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$
longueur rms des paquets	7,55 cm
nbre d'ondes bétatron horizontal	64,32
nbre d'ondes bétatron vertical	59,32
fonction bétatron aux croisements	0,55 m
fonction bétatron max. dans les arcs	180 m
fréquence synchrotron	61,8 - 21,4 Hz
Puissance synchrotron totale dissipée par faisceau	3,6 kW
Durée de vie de la luminosité	14,9 h
Temps d'accélération	20 mn

exo : retrouver les valeurs du courant et de l'énergie stockée par faisceau.

Est-ce que les paquets sont uniformément répartis et occupent toute la circonférence de la machine ?

Paramètres ions lourds (Pb - Pb)	
Energie dans le centre de masse	1150 TeV
Luminosité	$1 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
émittance normalisée transverse	$1,5 \mu\text{m} \cdot \text{rad}$
fonction bétatron aux croisements	0,5 m
nombre de paquets	592

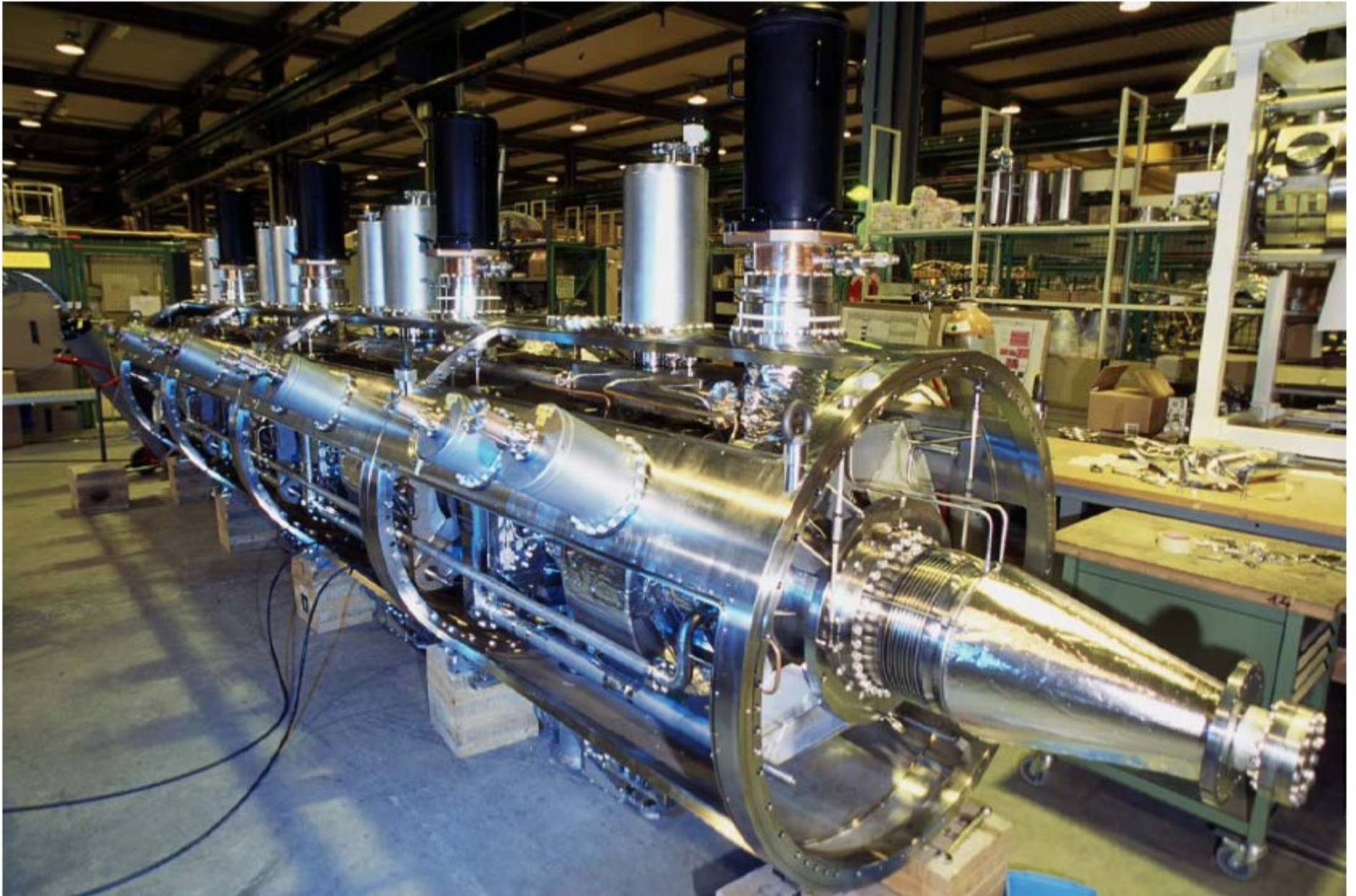
exo : déterminer l'énergie dans le centre de masse en mode Pb-Pb. À quel valeur du champ magnétique des dipôles cela correspond ?

Fonctionnement :

- 200 j/an
- ~12 h de prise de données (~durée de vie de la luminosité)
- 5,5 h de rechargement

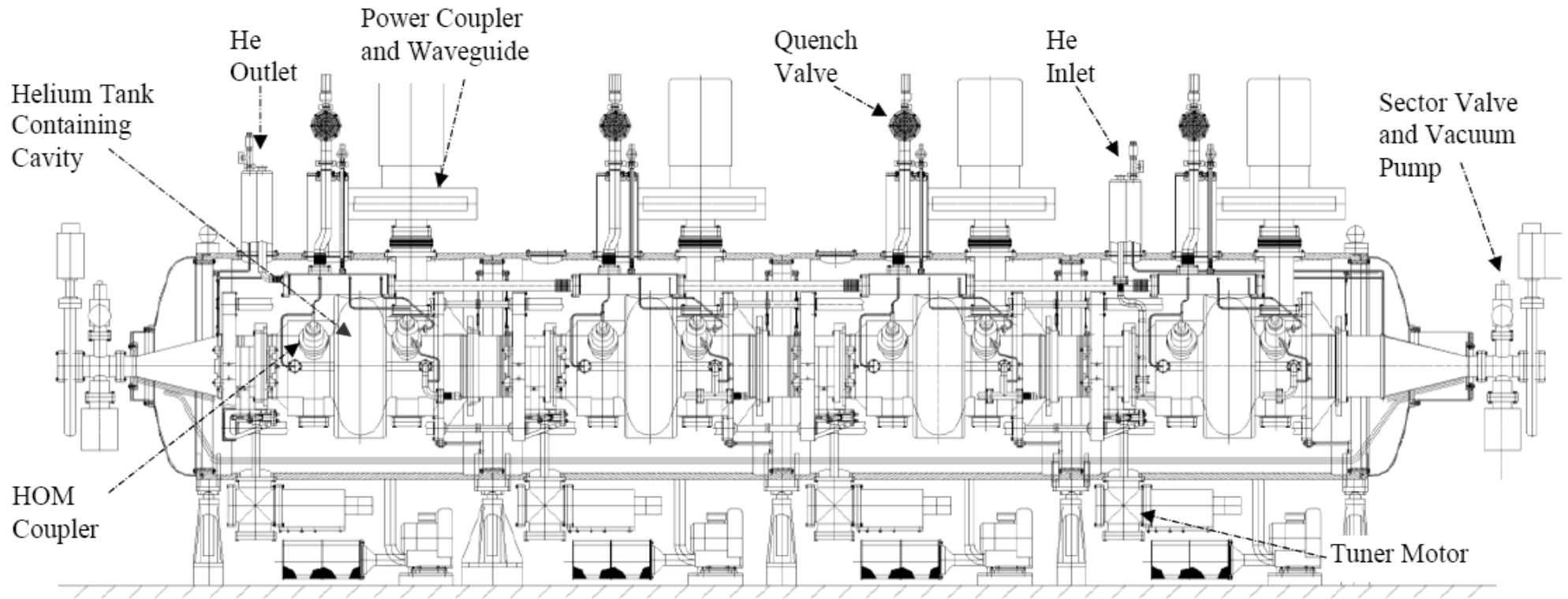


# Cavités accélératrices



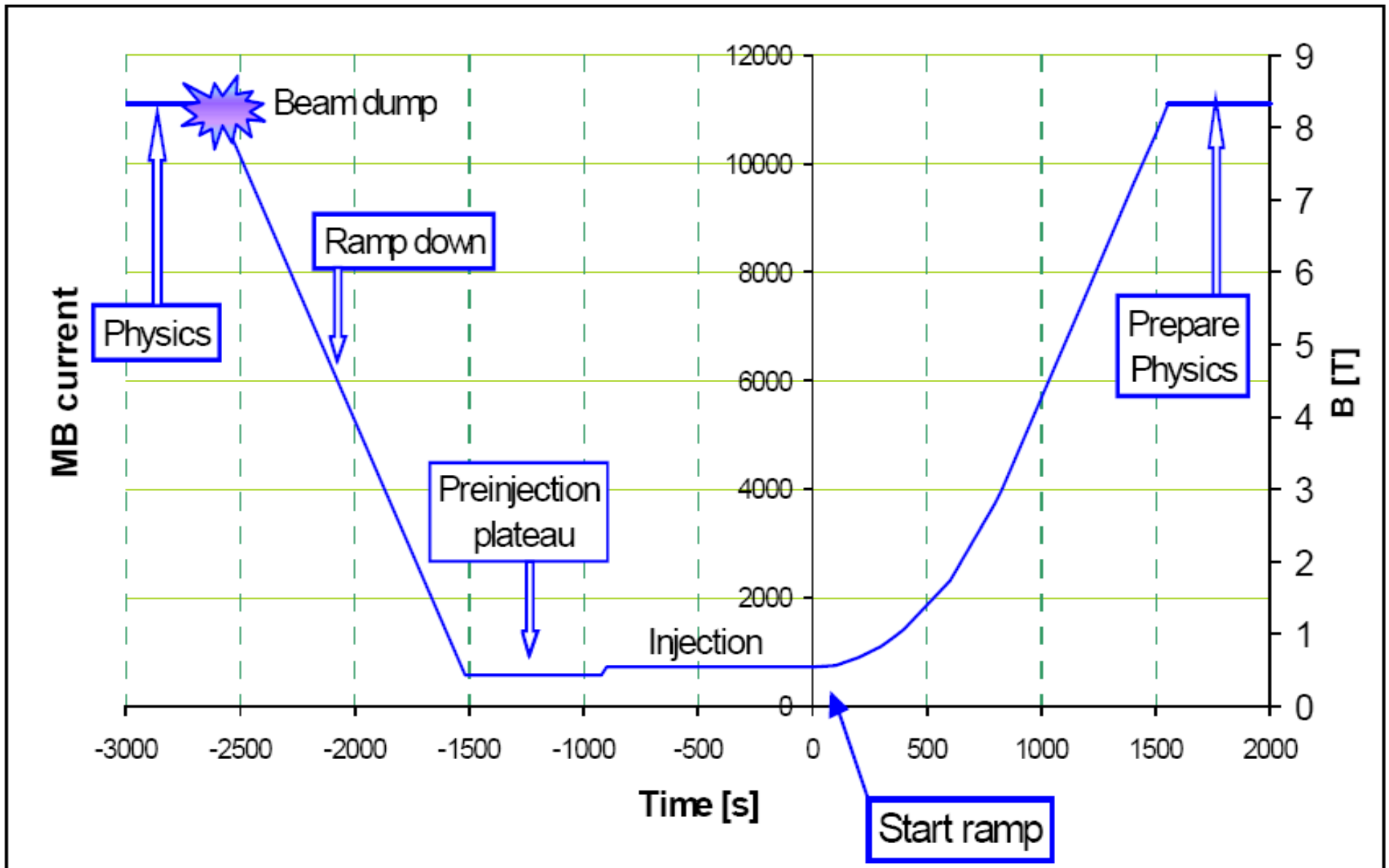
Cryomodule contenant 4 cavités accélératrices

# Cavités accélératrices

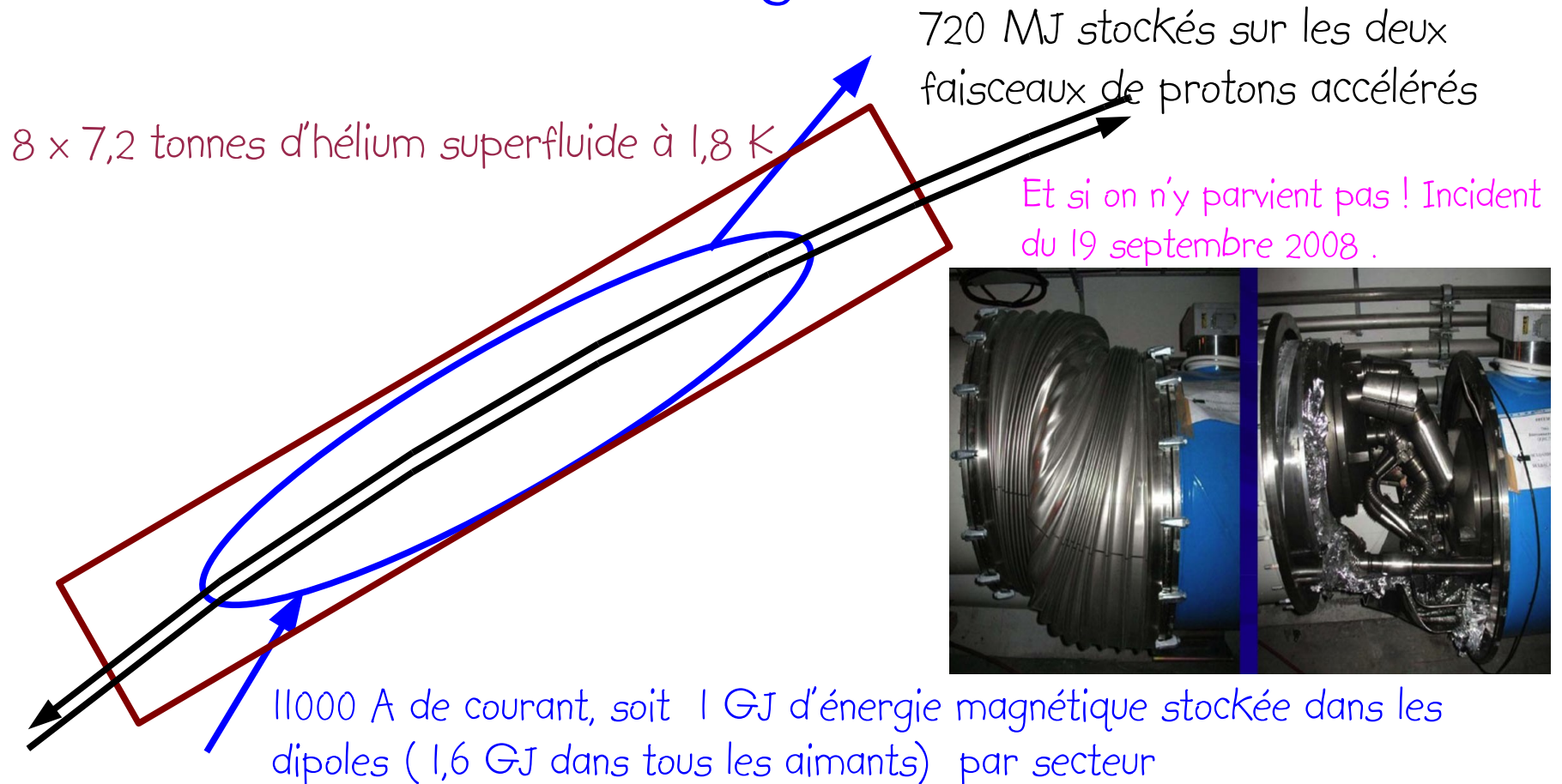


Cryomodule contenant 4 cavités accélératrices

# cycle de fonctionnement



# LHC : le Loup, la chèvre et le Chou à ménager



# exercice : le VLHC

Nous souhaiterions étudier le dimensionnement d'un collisionneur de protons qui atteindrait 100 TeV dans le centre de masse des collisions. Dans un premier temps nous utiliserons le même type de dipôles que ceux du LHC. Nous supposerons que l'ensemble des dipôles couvre approximativement 70% de l'anneau.

- a) déterminer l'angle de déflexion du faisceau par dipôle de type LHC.
- b) déterminer le nombre de dipôles contenus dans les arcs en adoptant une structure en cellules FODO et en octants comparable à celle du LHC.
- c) En ajoutant 16 dipôles pour chacune des huit sections droites d'interaction, déterminer le nombre total de dipôles de la machine. En déduire, la déflexion du faisceau par dipôle et le champ magnétique nominal auquel devra fonctionner chacun des dipôles.
- d) quelle est alors la circonférence et le rayon du tunnel ?
- e) quelle est la flèche du faisceau dans un dipôle ?
- f) déterminer la produit du gradient de champ et de la longueur magnétique d'un quadripôle pour obtenir une profondeur focale d'environ 40 m. Quelle devrait être sa longueur si son gradient de champ est de 250 T/m ? Est-ce réaliste ? Que devrait-on faire pour améliorer ce point ?
- g) reprendre le dimensionnement de la machine si l'on dispose de dipôles atteignant un champ de 16 T.