

Le LHC: un défi technologique

Magali Gruwé

Lyon

6 mars 2009



Remerciements à R. Alemany-Fernandez et R. Bailey

Plan

➤ Introduction (très) générale

- Composantes principales de la machine

➤ Plus en détails:

- Cryogénie et vide

• Arc:

- Dipôles
- Quadripôles
- Correcteurs

• Zones d'insertion:

- Zones d'interaction
- ...
- Système d'injection du faisceau
- Système de radiofréquence

➤ Energie emmagasinée dans la machine

- Système de protection contre les transitions résistives

➤ Energie emmagasinée dans le faisceau

- Système de décharge du faisceau
- Système de collimation
- Système d'interlock du faisceau

➤ Quelques problèmes rencontrés...

- Triplets internes
- PiMS
- Incident du 19 septembre 2008

➤ Conclusions

Qu'est- ce qu'un accélérateur de particules?

- Fourni un faisceau de particules énergétiques pour étudier la structure de la matière
- Utilise une chambre à vide dans laquelle circulent les particules
- Utilise des champs électriques pour accélérer les particules
- Utilise des champs magnétiques pour diriger et focaliser les faisceaux
- Etabli des collisions entre deux faisceaux de particules

- Dans un accélérateur linéaire:
 - les particules voyagent d'un bout à l'autre
- Dans un accélérateur circulaire:
 - les particules circulent continuellement dans un anneau



Composantes principales d'un accélérateur

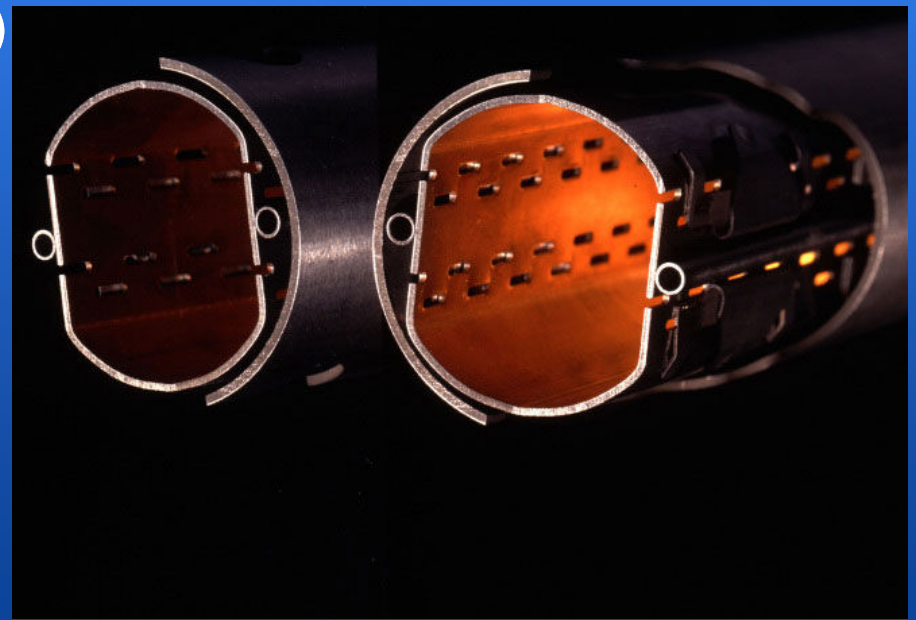
➤ Faisceau:

- Groupe de particules énergétiques qui circulent à une vitesse proche de celle de la lumière
- Il ne s'agit pas toujours d'un faisceau continu: paquets de particules
 - **Longueur** typique d'un paquet de particules (bunch): **quelques cm**
 - **Dimension transverse** typique d'un paquet de particules: **inférieure au mm**
 - **Intensités** typiques d'un paquet de particules: **quelques 10^{10} particules**
 - **Vitesses** typiques: **ultra relativistes**



Composantes principales d'un accélérateur

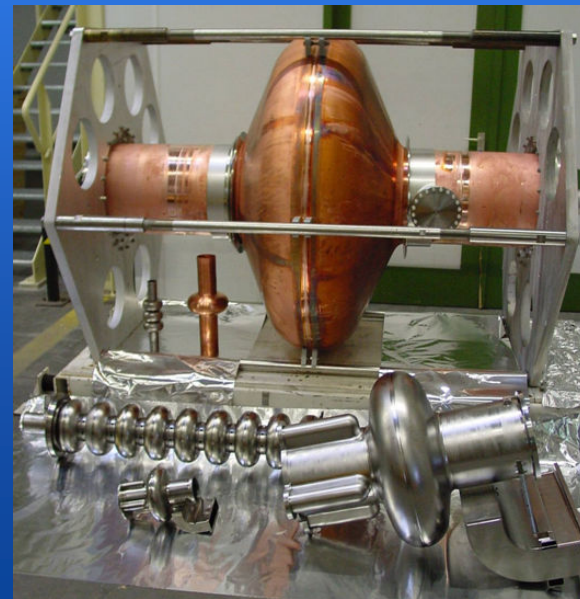
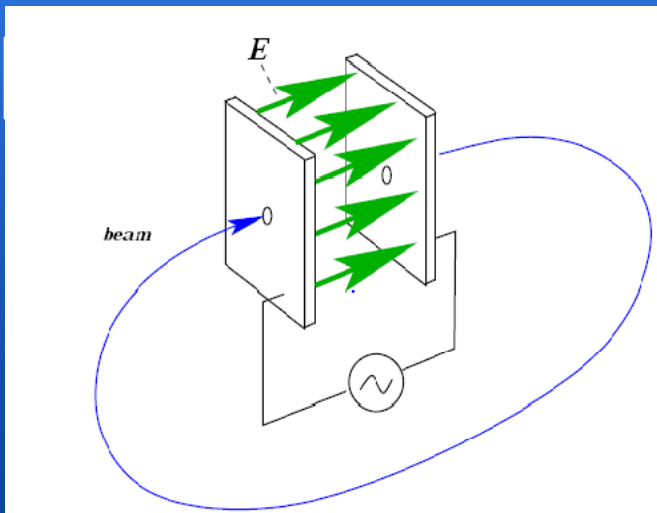
- Chambre à vide:
 - Tuyau de métal dans lequel circulent les particules.
 - Vide extrêmement poussé afin de minimiser la quantité de gaz présent, et donc le nombre de collisions des particules avec des molécules de gaz
 - **Vide extrêmement poussé**: 10^{-10} mbar
 - (La pression dans les chambres à vide du LHC est 10 fois plus faible que sur la surface de la lune)



Composantes principales d'un accélérateur

Champs électriques de radiofréquence

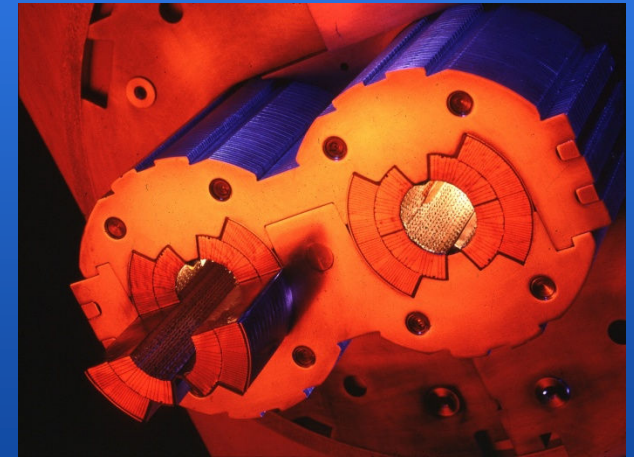
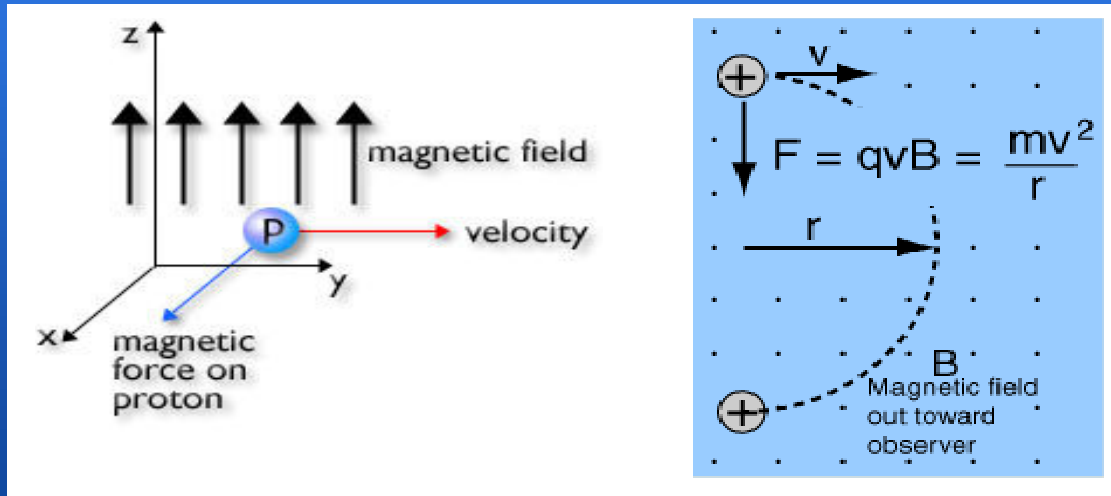
- Fournissent l'accélération des particules
- Des cavités radiofréquence sont installées à certains endroits le long de la chambre à vide
 - Chaque fois qu'un faisceau passe dans le champ électrique d'une cavité RF, une partie de l'énergie de l'onde radio est transférée aux particules qui sont ainsi accélérées



Composantes principales d'un accélérateur

Champs magnétiques:

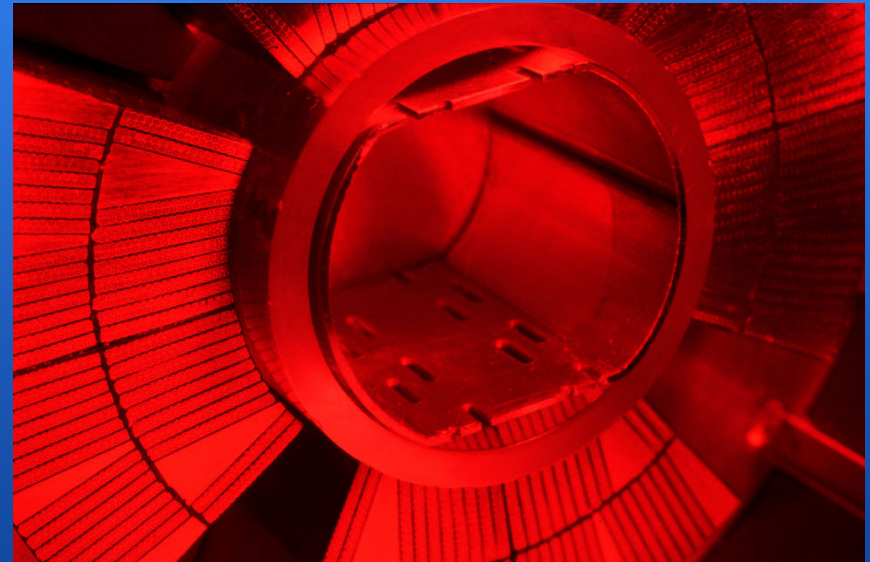
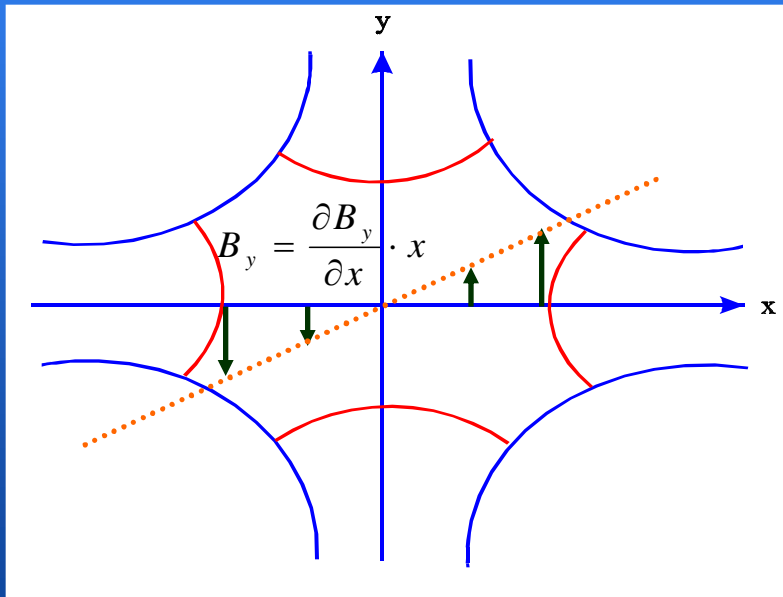
- Différents types d'aimants sont utilisés:
 - Des aimants dipolaires pour courber la trajectoire des particules (qui sans cela voyageraient en ligne droite). Plus la particule est énergétique, plus le champ magnétique nécessaire pour courber sa trajectoire est grand



Composantes principales d'un accélérateur

Champs magnétiques:

- Différents types d'aimants sont utilisés:
 - Des aimants quadripolaires sont utilisés pour focaliser le faisceau, maintenir les particules ensemble (en paquets), de la même façon que des lentilles optiques focalisent un faisceau lumineux

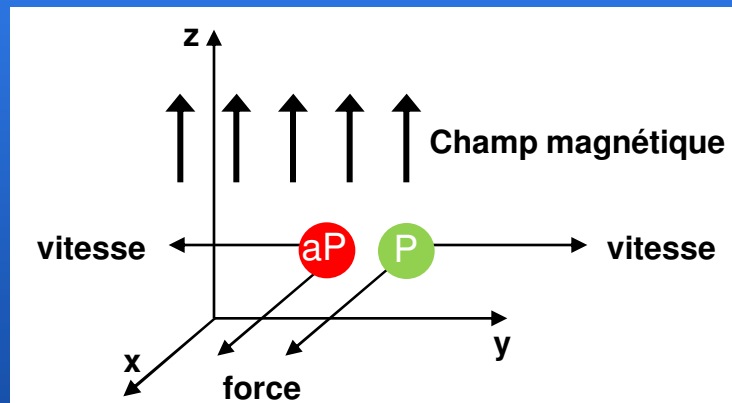


Composantes principales d'un accélérateur

Collisions

Antiparticule = "Identique" à la particule, mais avec une charge électrique opposée

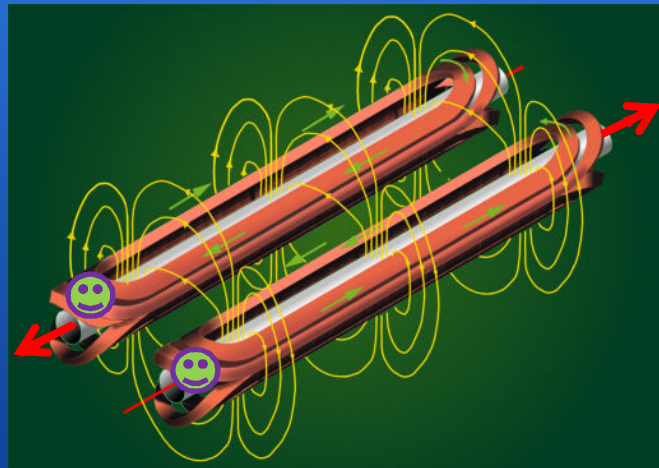
- Particules circulant dans une direction et antiparticules dans la direction opposée
 - Permet d'utiliser le même champ magnétique pour les deux faisceaux
 - Mais il faut produire et accumuler les antiparticules



- Particules identiques circulant dans les deux directions
 - Champs magnétiques de signes opposés sont nécessaires

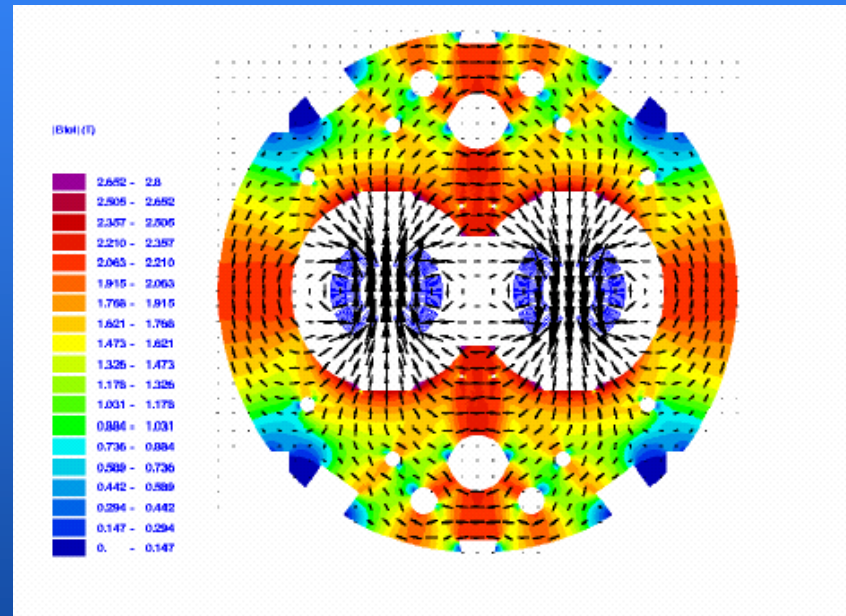
Paramètres de conception du LHC

- **Luminosité** (défini la quantité de collisions et donc l'efficacité pour la physique): $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - Exclu une machine proton – antiproton (Tevatron, SPPbarS)
 - Donc **machine proton – proton**
 - En conséquence: **champs magnétiques et chambres à vide séparés**



Paramètres de conception du LHC

- La dimension transverse du tunnel (4m) rend impossible la construction de deux anneaux différents pour les deux faisceaux
- En conséquence: **aimants avec ouvertures jumelles**



Paramètres de conception du LHC

- Circonférence du LHC: 27 km
- Energie: 7 TeV par faisceau \Leftrightarrow Champ dipolaire de 8.33 Tesla
 - Technologie de supraconductivité est nécessaire pour atteindre de tels champs
- Une machine équivalente avec des câbles normaux (non supraconducteurs) aurait une circonférence de 100 km et consommerait 1000 MW. Il faudrait une centrale nucléaire dédiée au fonctionnement du LHC.
- Le LHC utilise 10% de la puissance électrique fournie par une centrale nucléaire.



Cryogénie

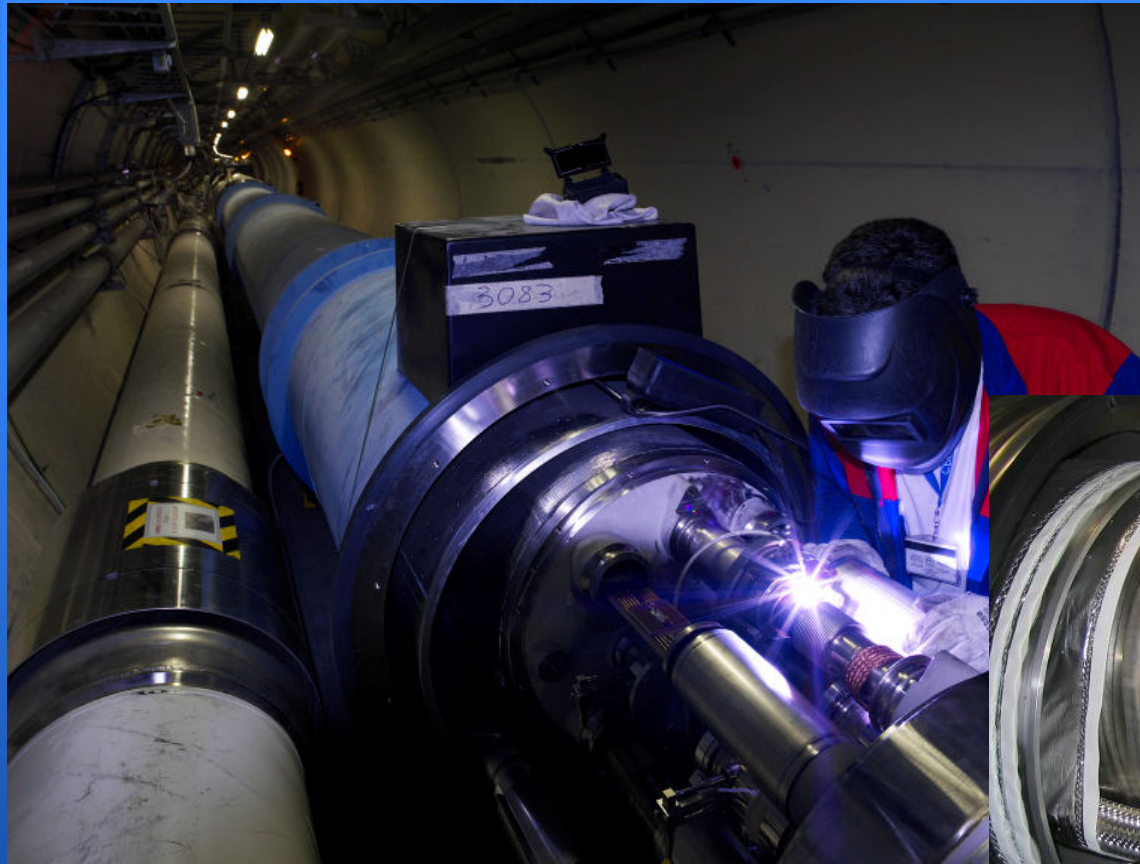
- Installation des lignes cryogéniques (distribution de l'hélium)



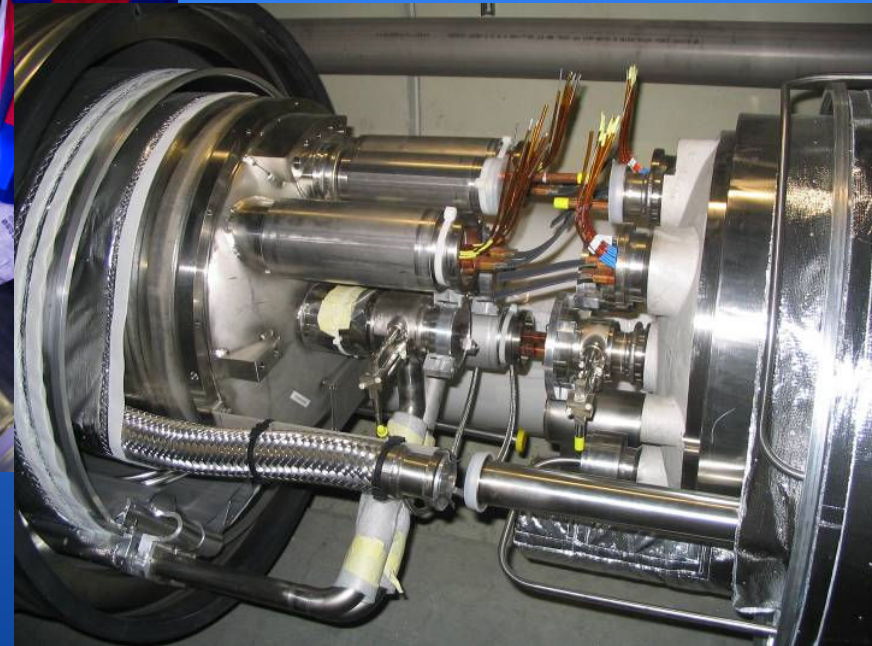
Installation des aimants (dipôles)



Interconnexions



1695 connexions entre les aimants
224 connexions à la ligne cryogénique



Caractéristiques du LHC

- Grand (27 km de circonférence)
- Froid (supraconductivité → 1.9 K)
- Complexe
- Haute technologie
- Puissance contenue dans les aimants: 10 GJ
- Puissance contenue dans chaque faisceau: 362 MJ



Paramètres du LHC

Paramètres conceptuels

Luminosité à CMS et ATLAS	10^{34} (cm ⁻² s ⁻¹)
Luminosité à LHCb et ALICE	$5 \cdot 10^{32}$ (cm ⁻² s ⁻¹)
Dimension transverse à CMS et ATLAS	16.7 (μm)
Dimension transverse à LHCb et ALICE	70.9 (μm)
Angle de croisement	285 (μrad)

Configuration nominale

Energie d'un faisceau	7 TeV
# p ⁺ /paquet	10^{11}
# paquets/faisceau	2808
Séparation entre les paquets / fréquence de passage	25 ns / 11 kHz
β* aux points d'interaction	0.55 ou 10 m
ε _n ^{xy}	285 (μm rad)

Plan

➤ Introduction (très) générale

- Composantes principales de la machine

➤ Plus en détails:

- Cryogénie et vide
- Arc:
 - Dipôles
 - Quadripôles
 - Correcteurs
- Zones d'insertion:
 - Zones d'interaction
 - ...
 - Système d'injection du faisceau
 - Système de radiofréquence

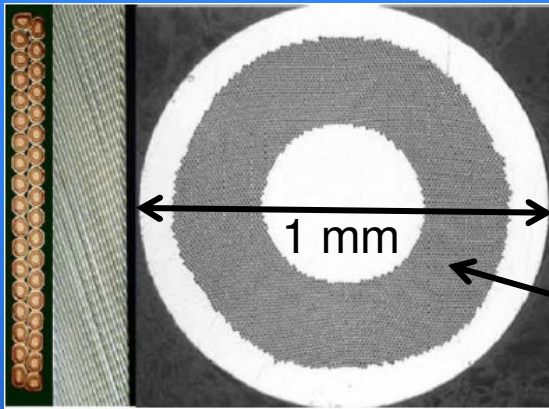
- Energie emmagasinée dans la machine
 - Système de protection contre les transitions résistives
- Energie emmagasinée dans le faisceau
 - Système de décharge du faisceau
 - Système de collimation
 - Système d'interlock du faisceau

- Quelques problèmes rencontrés...
 - Triplets internes
 - PiMS
 - Incident du 19 septembre 2008

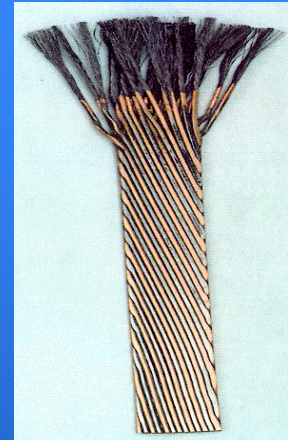
➤ Conclusions

Câbles supraconducteurs

- LHC comprend 20km de câbles supraconducteurs
 - Câbles en niobium-titane: supraconducteurs en dessous de 10 K



Filaments de Nb-Ti
6 μm de diamètre



- Aimants supraconducteurs → doivent être refroidis!
- Température de fonctionnement de 1.9 K, nettement inférieure à 10 K
 - Pour 7 TeV, il faut 8.3 Tesla, et 11700 A circulant dans les dipôles
 - A plus haute température (4.5 K), on n'atteindrait que 6.8 Tesla

Cryogénie

- Température de fonctionnement: 1.9 K
 - Déterminée par
 - L'alliage supraconducteur de Nb-Ti dans les bobines des aimants
 - Les propriétés de l'hélium: superfluidité au dessous de 2.1 K
 - Excellente conductivité thermique: réfrigérant de choix pour refroidir et stabiliser un si grand système supraconducteur
- Refroidissement:
 - De la température ambiante jusqu'à 80 K (température de l'azote liquide):
 - Pré-refroidissement avec de l'azote liquide, dans des échangeurs de chaleur
 - 1200 tonnes de N₂ / secteur (64 camions de 20 T, pendant 3 semaines)
 - De 80 K à 4.5 K (température de l'hélium liquide)
 - Refroidissement à l'aide de turbines des réfrigérateurs
 - 4700 tonnes de matériel / secteur à refroidir (2 semaines)
 - De 4.5 K à 1.9 K (hélium superfluide)
 - Refroidissement à l'aide de compresseurs froids (15 mbar)
 - Plus de 15 tonnes d'hélium / secteur (1 semaine)
 - Ajustements avant mise en puissance
 - Instrumentation, boîtes de distribution (DFB) (1 semaine)



Chambre à vide

➤ Qualité du vide:

- Contraintes:

- Durée de vie des faisceaux (~ 100 heures)
- Bruits de fond dans les expériences (le plus faible possible)

- Conséquences:

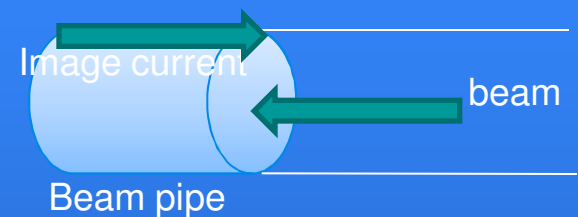
- Exigences drastiques sur la qualité du vide dans les chambres à vide dans lesquelles circulent les faisceaux:
 - 10^{15} H₂/m³
 - 10^{13} H₂/m³ dans les zones d'interaction



Chambre a vide

➤ Sources de chaleur:

- Lumière synchrotron émise par le faisceau (0.2 Wm^{-2} par faisceau)
- Perte d'énergie par diffusion nucléaire (30 mWm^{-1} par faisceau)
- Courants image (0.2 Wm^{-1} par faisceau)
- Nuages d'électrons

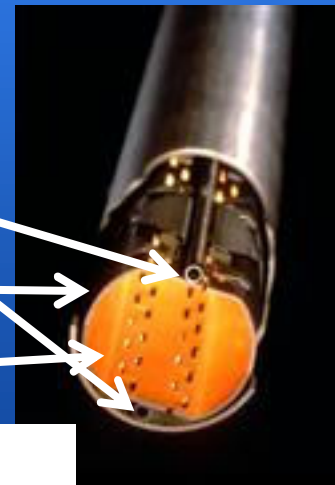


➤ Choix technologiques:

(Pour diminuer l'impact sur le système cryogénique)

- Ecran de faisceau (détermine l'ouverture mécanique)
- Couche de cuivre
- Contraintes sur la densité de gaz

Tubes de refroidissement (5-20 K)



Dimensions:

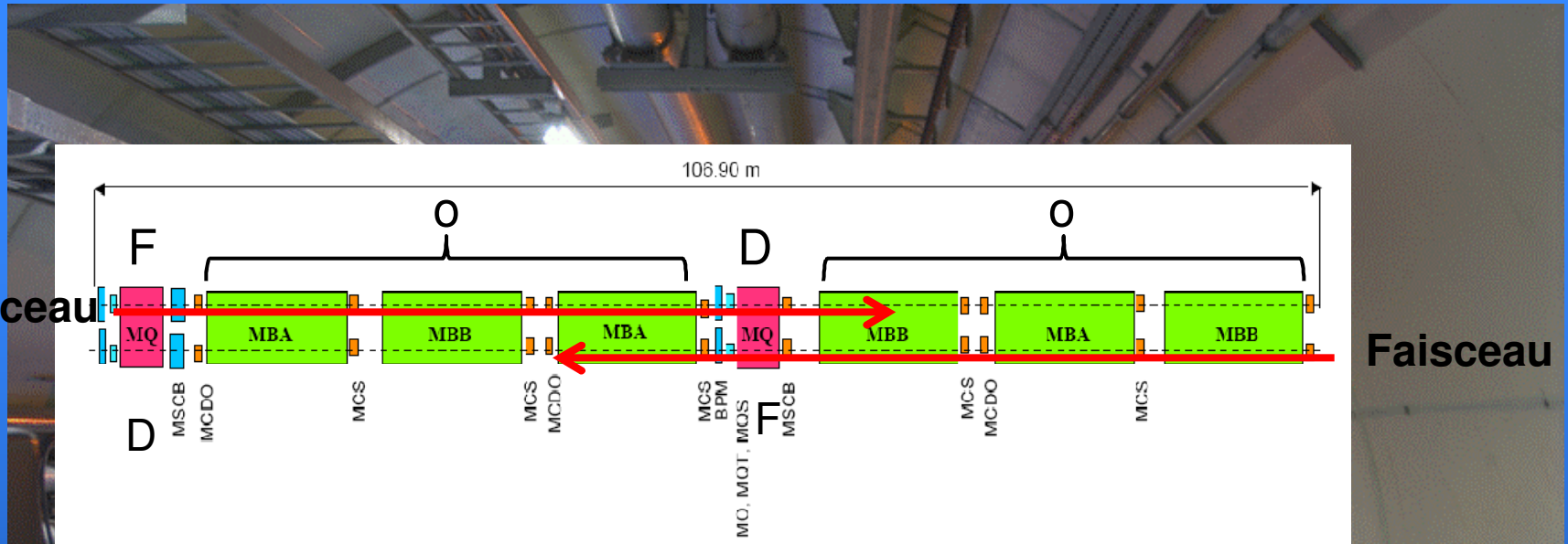
hauteur → ~ 2x17 mm

largeur → ~ 2x22 mm

Architecture du LHC



Arc



Faisceau

Faisceau

Maille FoDo:

Structure magnétique composée d'une alternance de quadripôles focalisant et délocalisant avec « rien » entre.

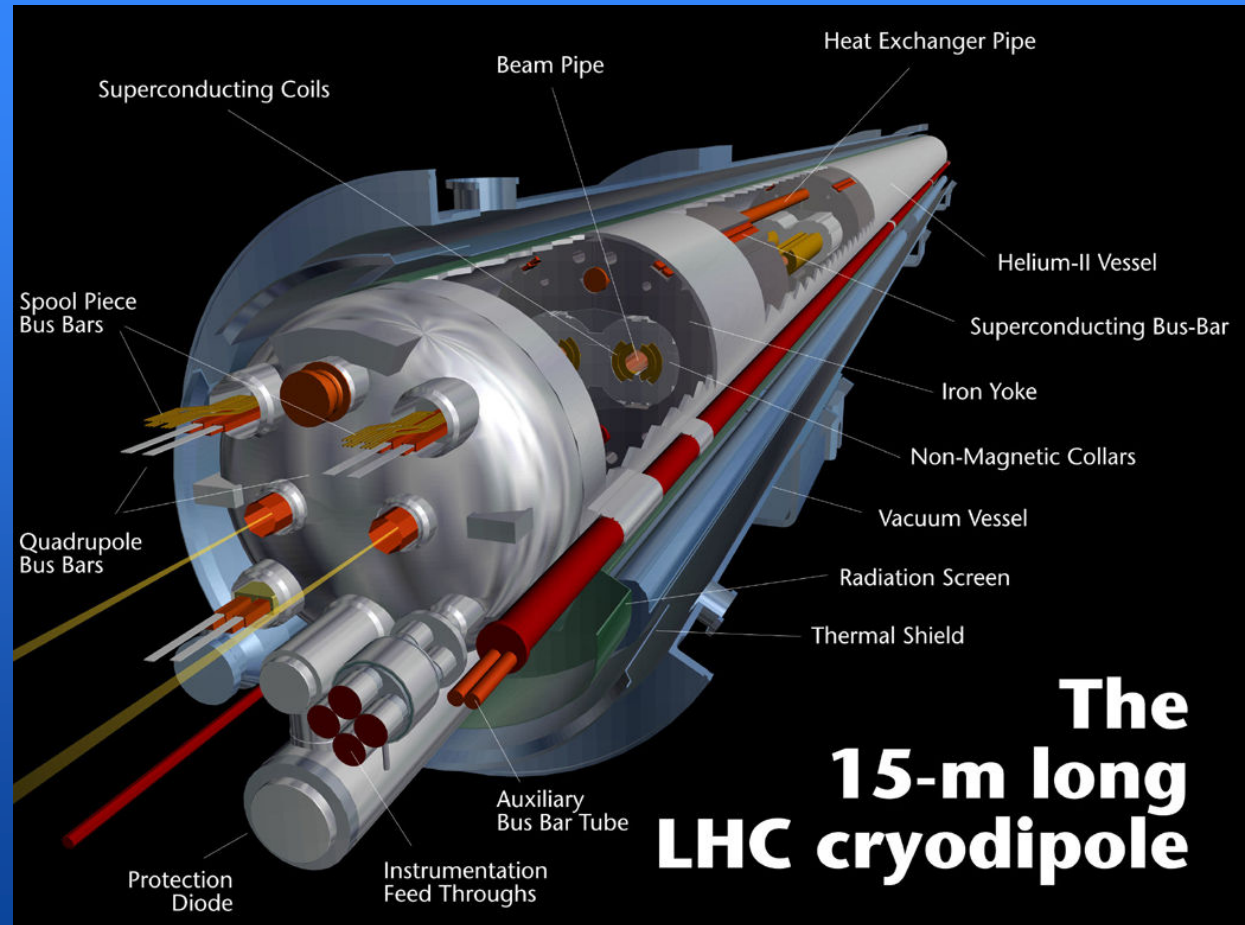
« Rien » = éléments négligeables, tels que zone de drift, dipôles, structures RF, expériences.

- MB:** Dipôle principal
- MQ:** Quadripôle principal
- MQT:** Quadripôle de réglage
- MQS:** Quadripôle tourne de réglage
- MO:** Octupôle (amortissement de Landau)
- MSCB:** Sextupôle tourne + Correcteur d'orbite
- MCS:** Sextupôle de correction
- MCDO:** Octupôle + Décapôle de correction
- BPM:** Moniteur de position de faisceau

Dipôles

➤ Quelques caractéristiques:

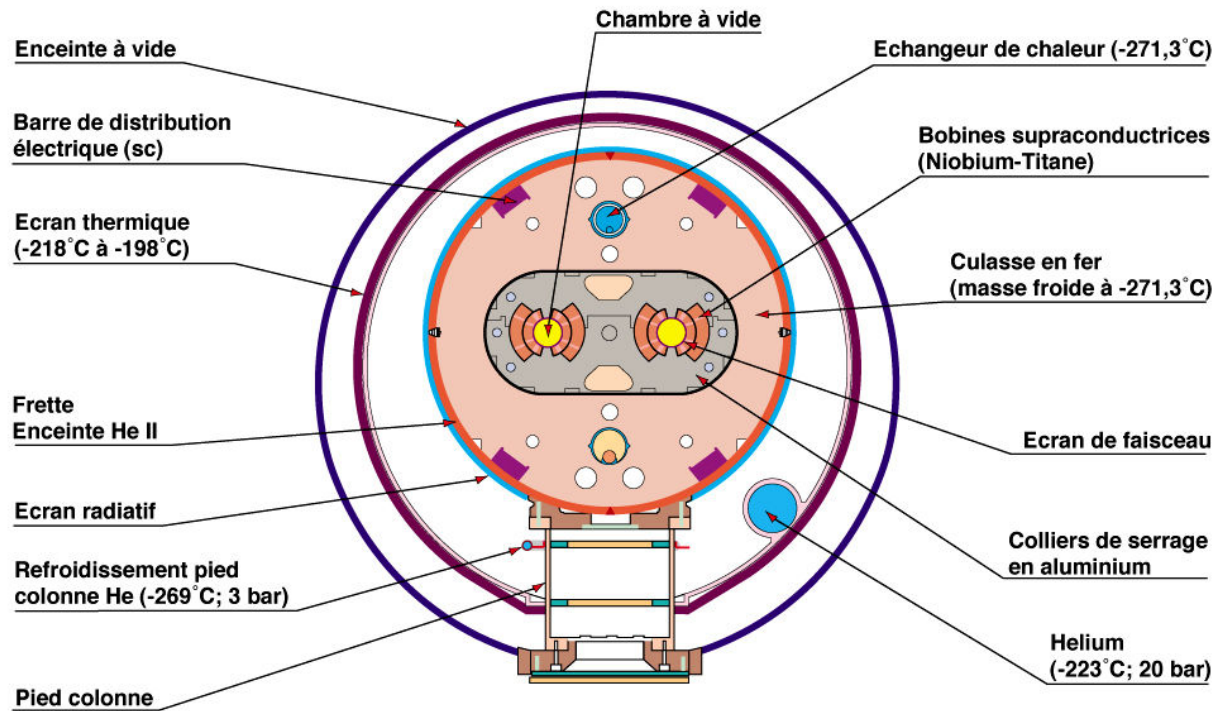
- 1232 dipôles
- 15 m de long
- 27.5 tonnes
- 1.9 K
- 8.33 T
- 11850 A
- 7 MJ



Dipôles

➤ Géométrie des dipôles

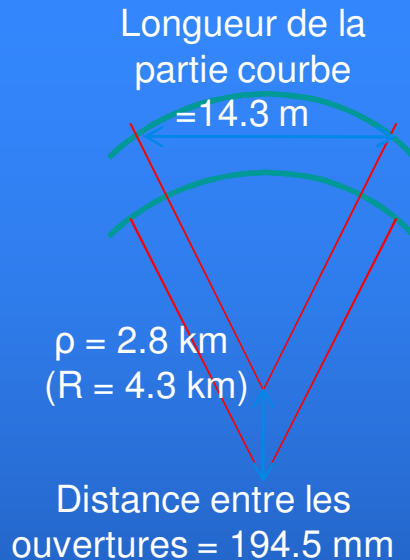
Dipole LHC: Coupe transversale



CERN AC - HE107

Dipôles

Plan horizontal



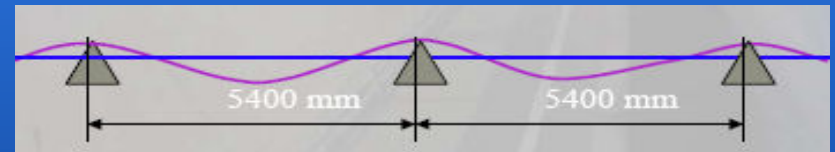
La partie active de la masse froide est courbée dans le plan horizontal avec un angle de 5.09 mrad et un rayon de courbure de $\rho = 2.8 \text{ km}$.

La forme des deux tubes à vide est identique.

Plan vertical

La forme théorique des tubes à vide est une ligne droite.

La forme réelle présente une déflexion naturelle de $\sim 0.3 \text{ mm}$ entre deux supports séparés de 5.4 m



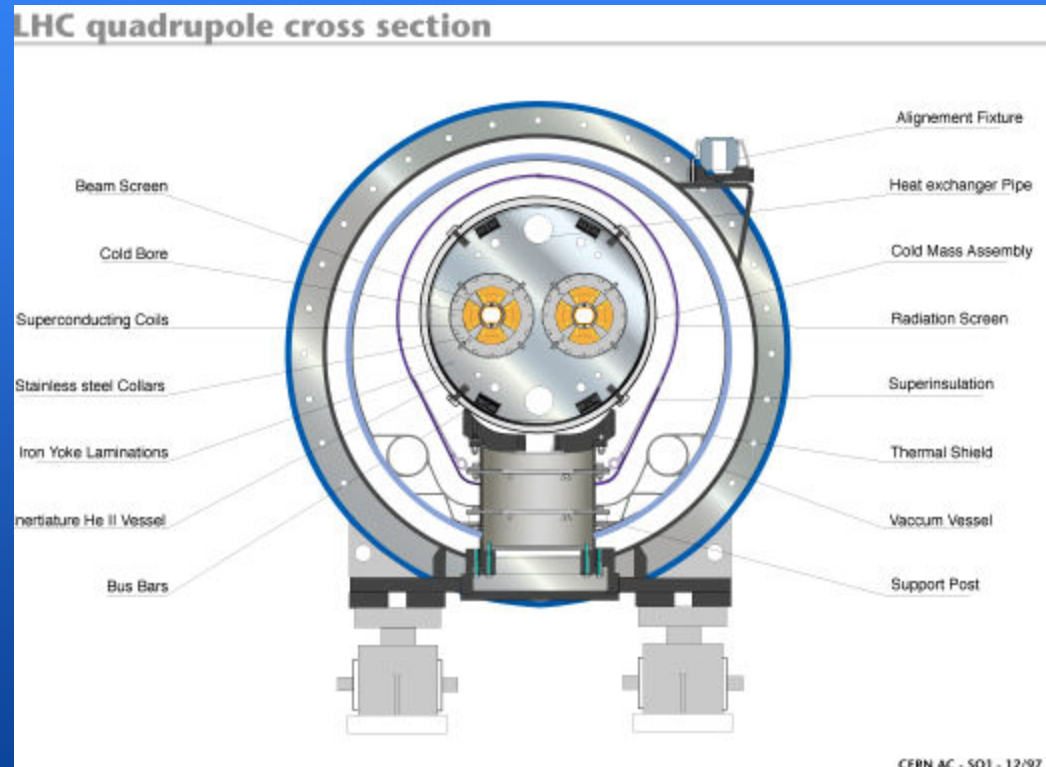
Dipôles

- La **stabilité géométrique** des bobines supraconductrices est essentielle pour assurer un champ magnétique homogène.
 - Le **stress mécanique** durant l'assemblage des bobines, le **stress thermique** durant le refroidissement et le **stress électromagnétique** durant l'opération sont autant de sources de déformation géométrique des bobines.
 - Il existe d'autres sources d'erreur du champs magnétique telles que les **tolérances** de dimension des composants des aimants ainsi que des outils de fabrication et d'assemblage.
 - Les erreurs relatives du champ magnétique intégré et des imperfections dues à la forme du champ ne doivent pas excéder $\sim 10^{-4}$ et leur reproductibilité doit être meilleure que 10^{-4} . Ceci est possible si la géométrie des bobines est précise, reproductible et symétrique, et si la stabilité structurelle de l'assemblage des aimants lors de la mise en puissance est garantie.



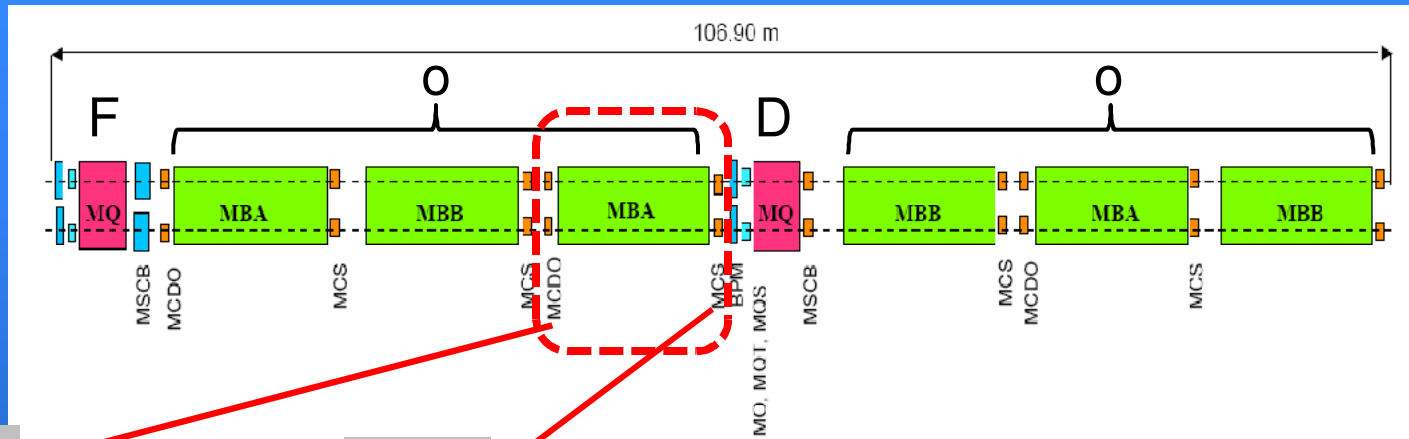
Quadripôles

- Quelques caractéristiques:
 - 55 quadripôles par secteur
 - Gradient intégré: 690 T
 - Gradient nominal: 223 T/m
 - 11870 A
 - 3.1 m de long



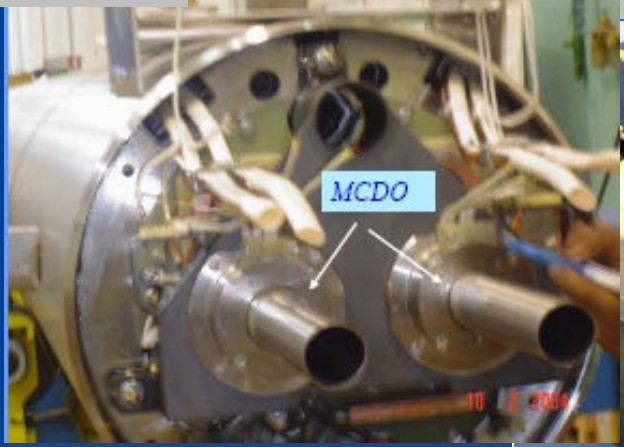
Correcteurs des dipôles

- Corrigent les composantes sextupôle, octupôle et décapôle du champ magnétique dipolaire



MCDO

MCS

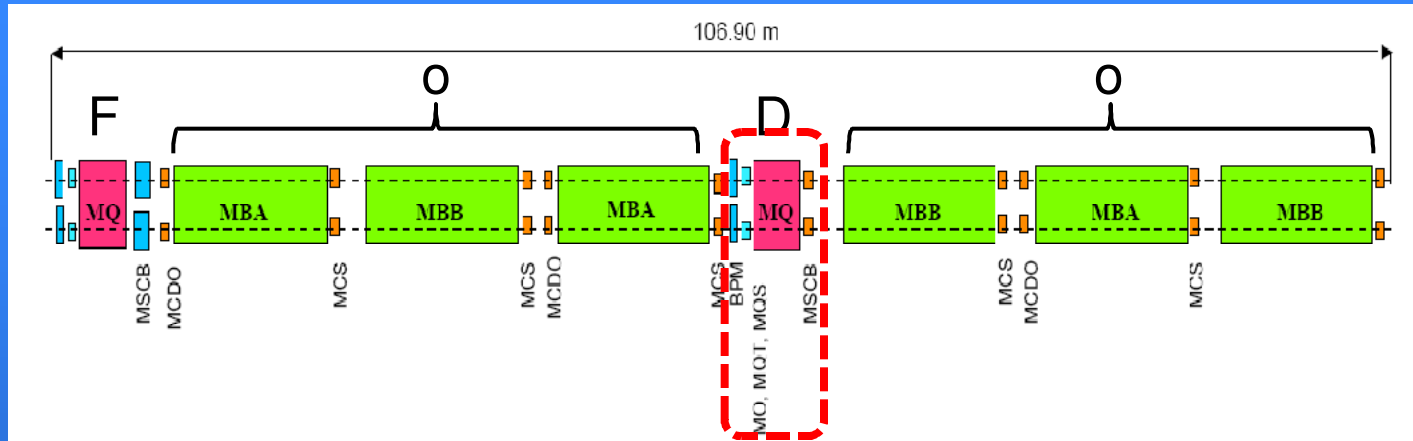


MCD:
 ~120 T/m⁴
 550 A
 1.9 K
 11 cm
 ~ 6 kg

MCO:
 ~8200 T/m³
 100 A
 1.9 K
 11 cm
 ~ 6 kg

MCS:
 1630 T/m²
 550 A
 1.9 K
 15.5 cm
 ~ 10 kg

Correcteurs des quadripôles

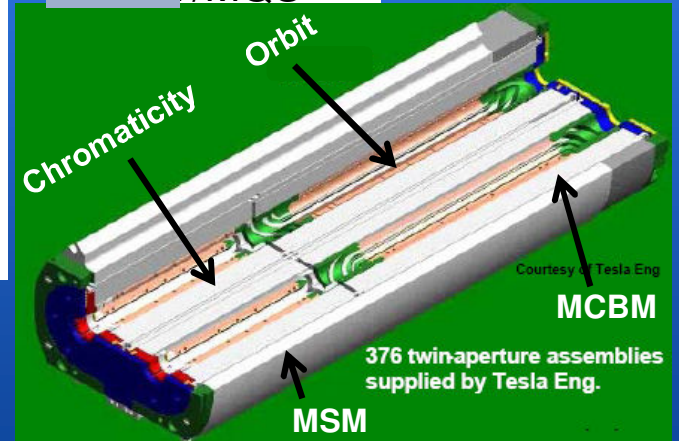


MO
 63100 T/m³
 550 A
 1.9 K
 38 cm
 ~ 8 kg

MSM (sextupole)
 4430 T/m²
 550 A
 1.9 K

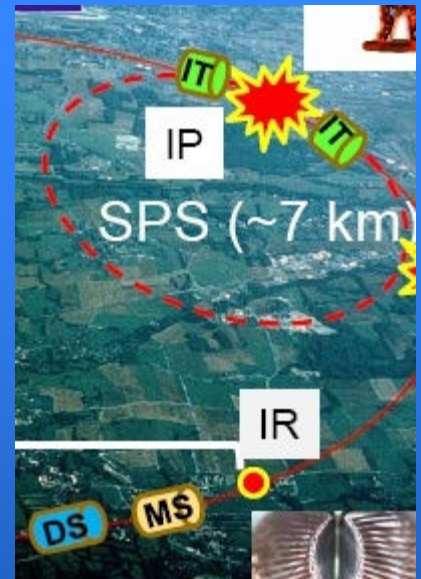
MCBM (dipôle)
 2.93 T
 55 A
 1.9 K
 78.5 cm
 ~ 143 kg

MSCB / MQS



Sections droites

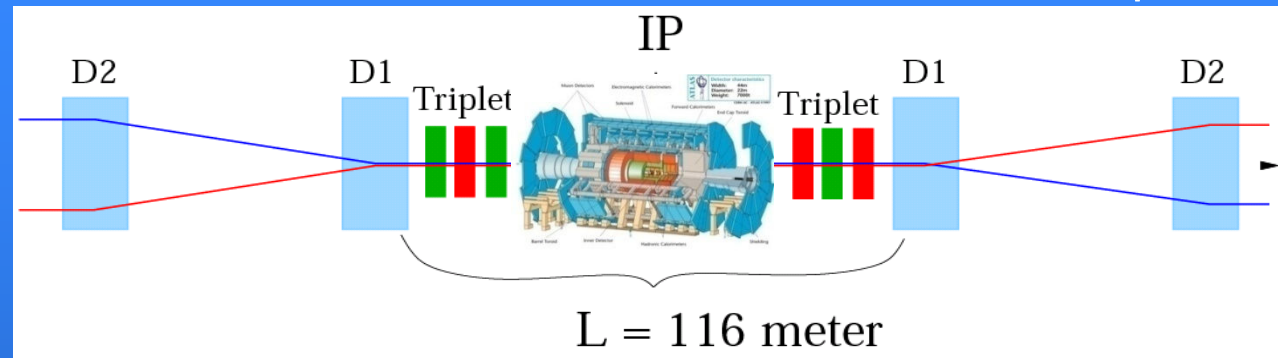
- Une section droite est composée de
 - Une section d'adaptation (Matching Section: MS)
 - En fonction de la région d'insertion (IR):
 - Expériences (points 1,2, 5, 8)
 - Collimateurs (points 3 et 7)
 - RF (point 4)
 - Lignes de décharge (point 6)
 - Ligne d'injection (points 2 et 8)
 - Aux points de collisions (expériences):
 - Des « triplets internes» (quadripôles de faible beta)



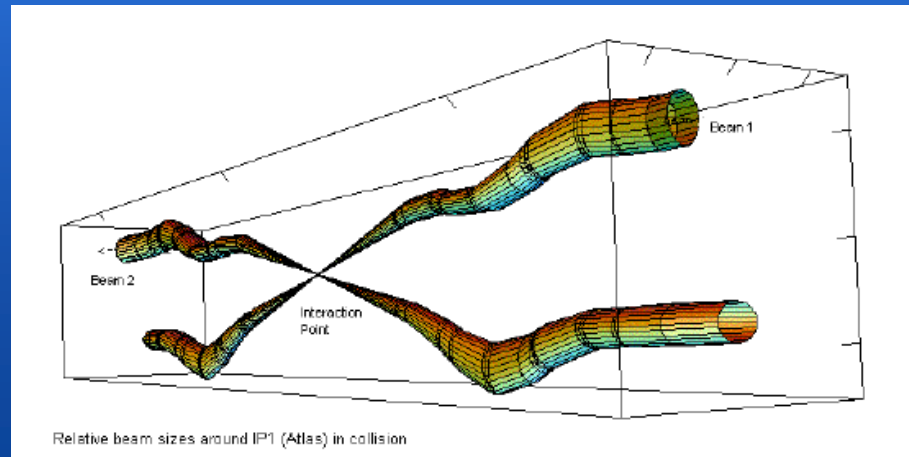
Régions d'insertions: expériences

➤ Fonction:

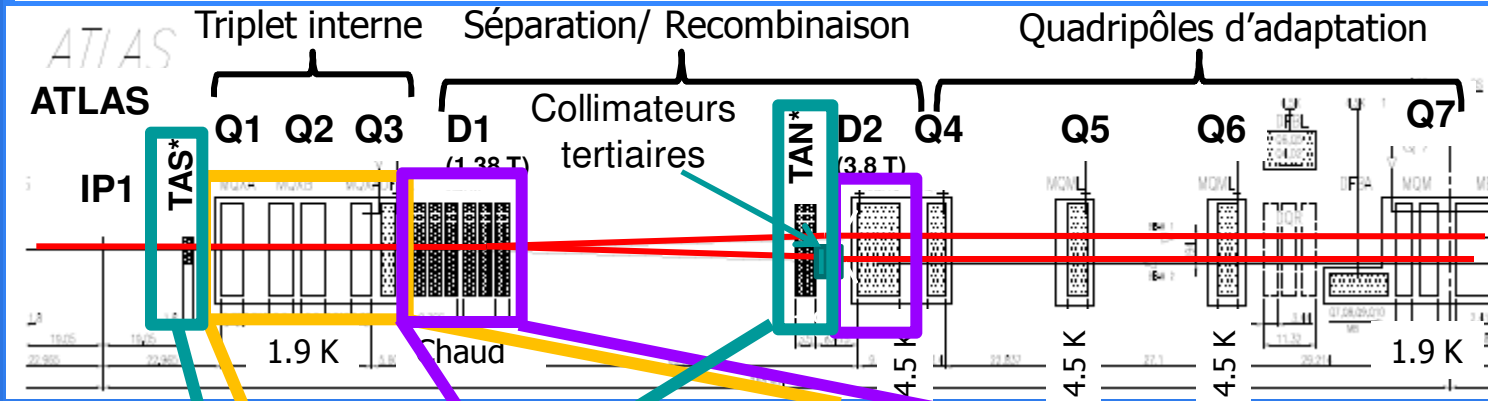
- Amener les faisceaux sur le même axe et les focaliser vers le point d'interaction



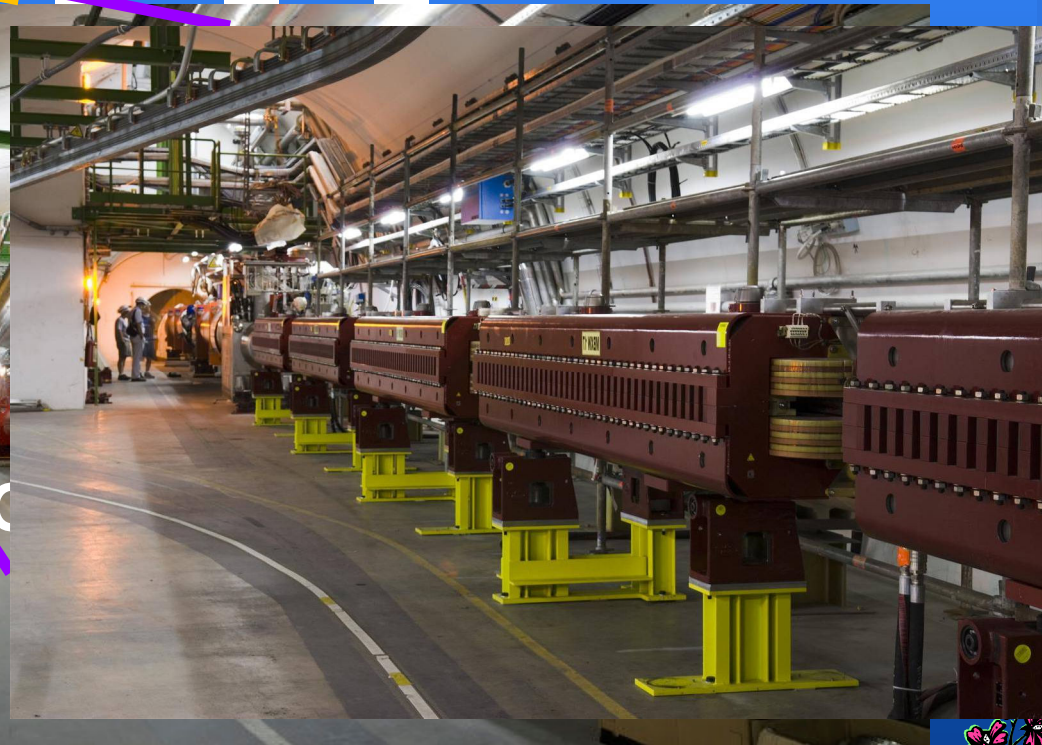
- Resserrer les paquets de protons (diminuer leur dimension transverse) afin de maximiser les chances de collisions



Régions d'insertions: expériences



Protègent le triplet interne et le dipôle D2 des particules provenant du point d'interaction



Régions d'insertions: expériences

- Luminosité et durée de vie du faisceau:
 - Malgré le resserrement des paquets de 10^{11} protons a une dimension de $16\ \mu\text{m}$ (1/5 de l'épaisseur d'un cheveu):
 - De l'ordre de 20 collisions par croisement (en opération nominale)
 - Les paquets se croisent toutes les 25 ns (11kHz):
 - 600 million de collisions par seconde
 - La plupart des protons ne se rencontrent pas et continuent leur voyage dans l'anneau.
 - Les faisceaux circuleront pendant environ 10 heures avant d'être déchargés et remplacés.
 - La luminosité diminue durant le run avec la dégradation de l'intensité et de la qualité des faisceaux
 - Causes :
 - Principalement les collisions
 - Interactions du faisceau avec des molécules de gaz
 - Interactions faisceau-faisceau

Plan

➤ Introduction (très) générale

- Composantes principales de la machine

➤ Plus en détails:

- Cryogénie et vide
- Arc:
 - Dipôles
 - Quadripôles
 - Correcteurs
- Zones d'insertion:
 - Zones d'interaction
 - ...
 - Système d'injection du faisceau
 - Système de radiofréquence

➤ Energie emmagasinée dans la machine

- Système de protection contre les transitions résistives

➤ Energie emmagasinée dans le faisceau

- Système de décharge du faisceau
- Système de collimation
- Système d'interlock du faisceau

➤ Quelques problèmes rencontrés...

- Triplets internes
- PiMS
- Incident du 19 septembre 2008

➤ Conclusions

Energie emmagasinée dans la machine

- Puissance contenue dans les aimants: 10 GJ
 - Equivalent à un porte avion navigant à 55 km/h
 - Ou 3 tonnes de TNT
- Comment évacuer rapidement et sans risque cette énergie?



Lors des tests des aimants, les **7 MJ** emmagasinés dans un aimant ont été entièrement libérés en un point donné de la bobine

P. Pognat

Energie emmagasinée dans les aimants: quench

- Un « quench » est une transition résistive d'un état supraconducteur à un état conducteur normal
- Un quench est initié lors d'une libération d'énergie de l'ordre du mJ
- Causes possibles:
 - Mouvement d'un supraconducteur de quelques μm (par friction ou dissipation thermique)
 - Perte de faisceau:
 - A 7 TeV, 0.6 mJ/cm³ peuvent créer un quench dans un dipôle: cette densité d'énergie peut être créée par 10^7 protons
 - A 450 GeV (énergie d'injection) 10^9 protons sont nécessaires
 - Problème de refroidissement



Energie emmagasinée dans les aimants: systeme de protection contre les quenchs (QPS)

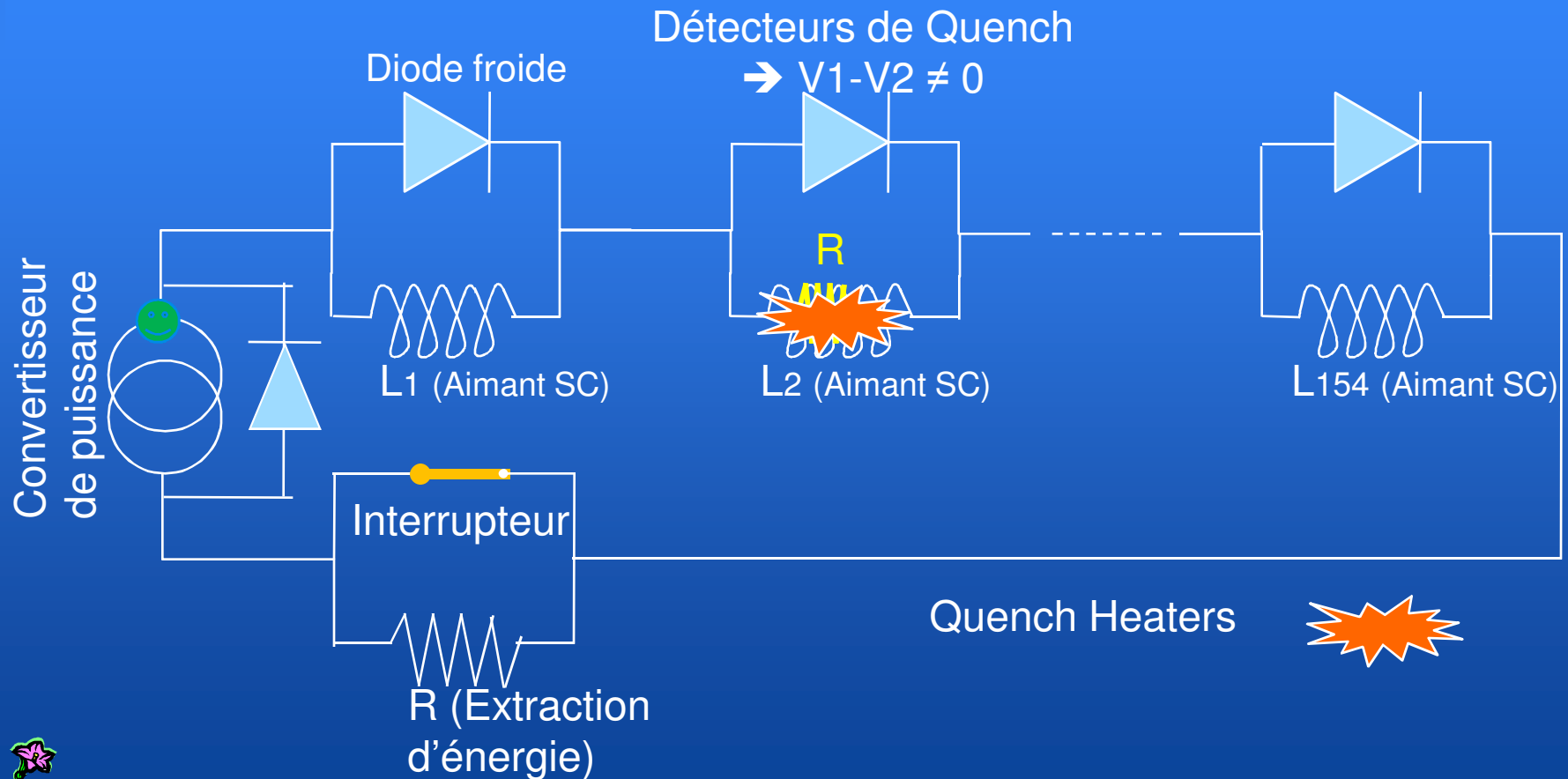
- Il faut limiter l'augmentation de température lors d'un quench
- Il faut donc:
 - Détecter le quench (détecteurs de quench)
 - Distribuer l'énergie dans tout l'aimant en forçant les bobines à subir une transition résistive (utilisation de quench heaters)
 - Libérer l'énergie de façon contrôlée (diodes froides « by-pass » et système d'extraction d'énergie)
- Lors d'un échec du système de protection:
 - Fausse détection: perte des conditions d'opération pendant plusieurs heures
 - Quench non-détecté: aimants endommagés: perte des conditions d'opération pendant 1 à plusieurs mois.

Système de protection
contre les quenchs



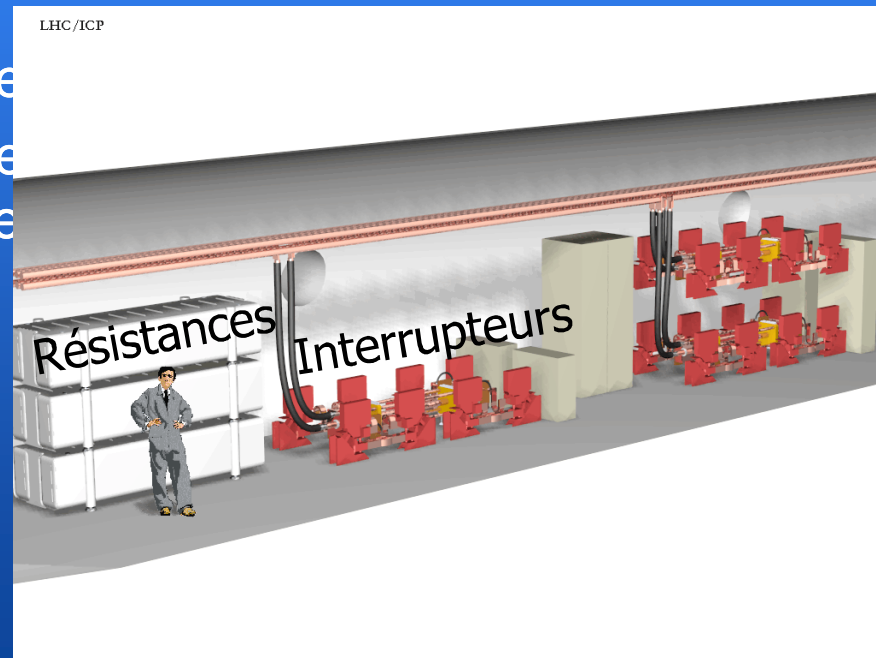
Energie emmagasinée dans les aimants: système de protection contre les quenches (QPS)

- Schéma de principe du système de protection contre les quenches dans les dipôles principaux d'un secteur

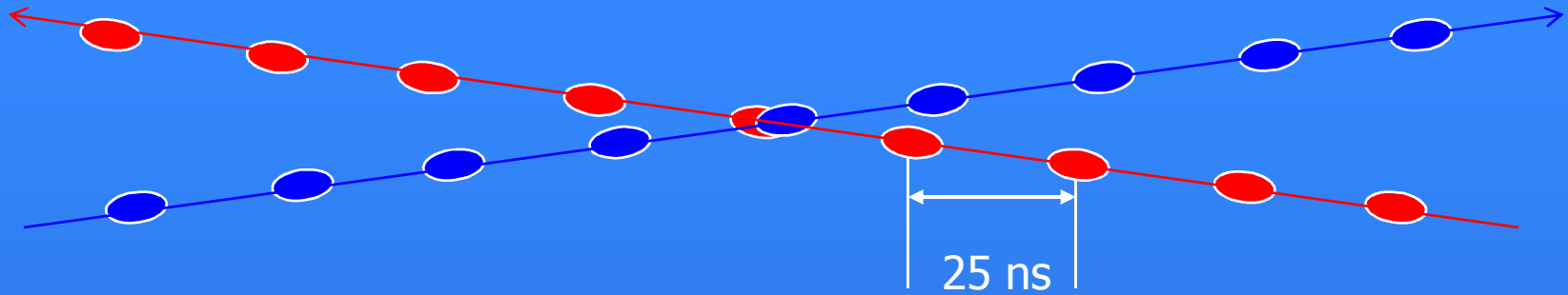


Energie emmagasinée dans les aimants: système d'extraction d'énergie (EES)

- En opération normale, chaque descente en puissance des aimants implique une extraction de l'énergie. Ceci dure environ 20 minutes: beaucoup trop long dans le cas d'une transition résistive.
- Un système d'extraction d'énergie dédié au système de protection contre les quenches est nécessaire
- Il y a 32 systèmes EES pour les 24 circuits principaux 13 kA (des dipôles et des quadripôles)
- (+ les systèmes EES des correcteurs)
- Le système EES libère l'énergie en 40 s (325 A/s) pour les quadripôles



Energie emmagasinée dans le faisceau



$$E_{\text{beam}} = E_{p^+} \times K_b \times \text{Num } p^+/\text{bunch}$$

$$E_{p^+} = 7 \text{ TeV}$$

$$K_b = 2808$$

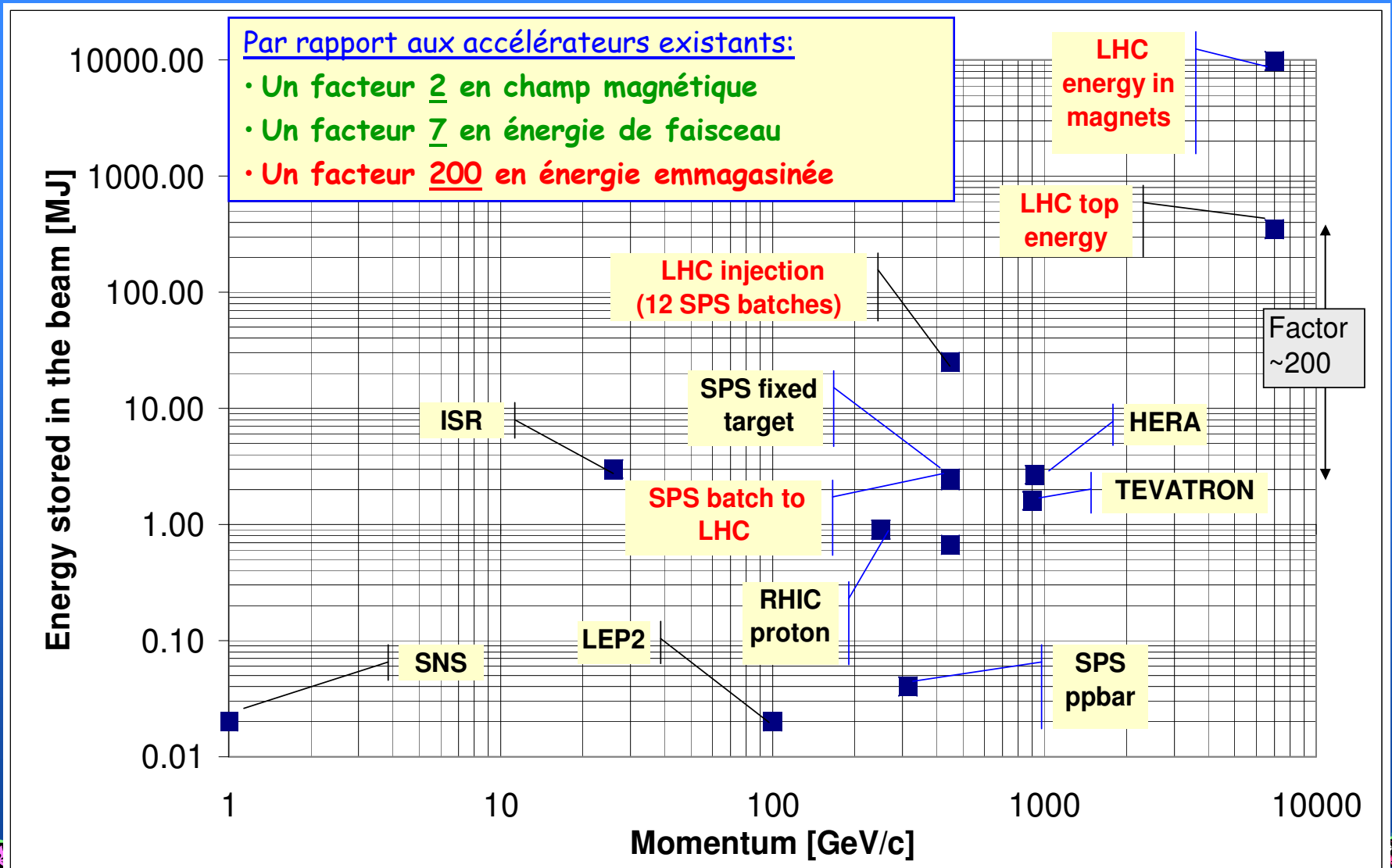
$$\text{Num } p^+/\text{bunch} = 1.15 \times 10^{11}$$

} Valeurs nominales

$$E_{\text{beam}} = 362 \text{ MJoules}$$

Suffisant pour fondre 500 kg de cuivre

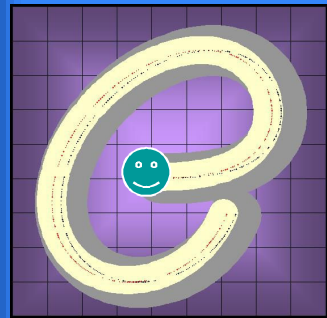
Energie emmagasinée dans le faisceau



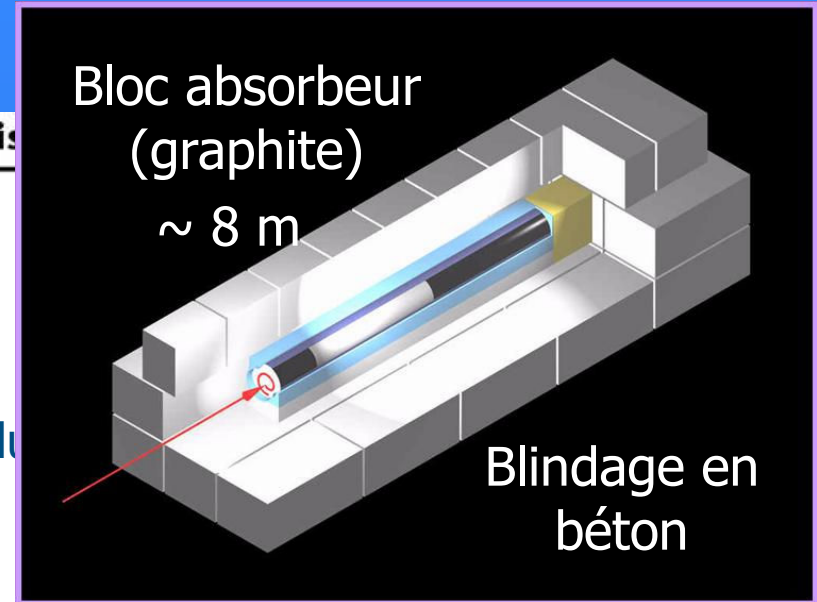
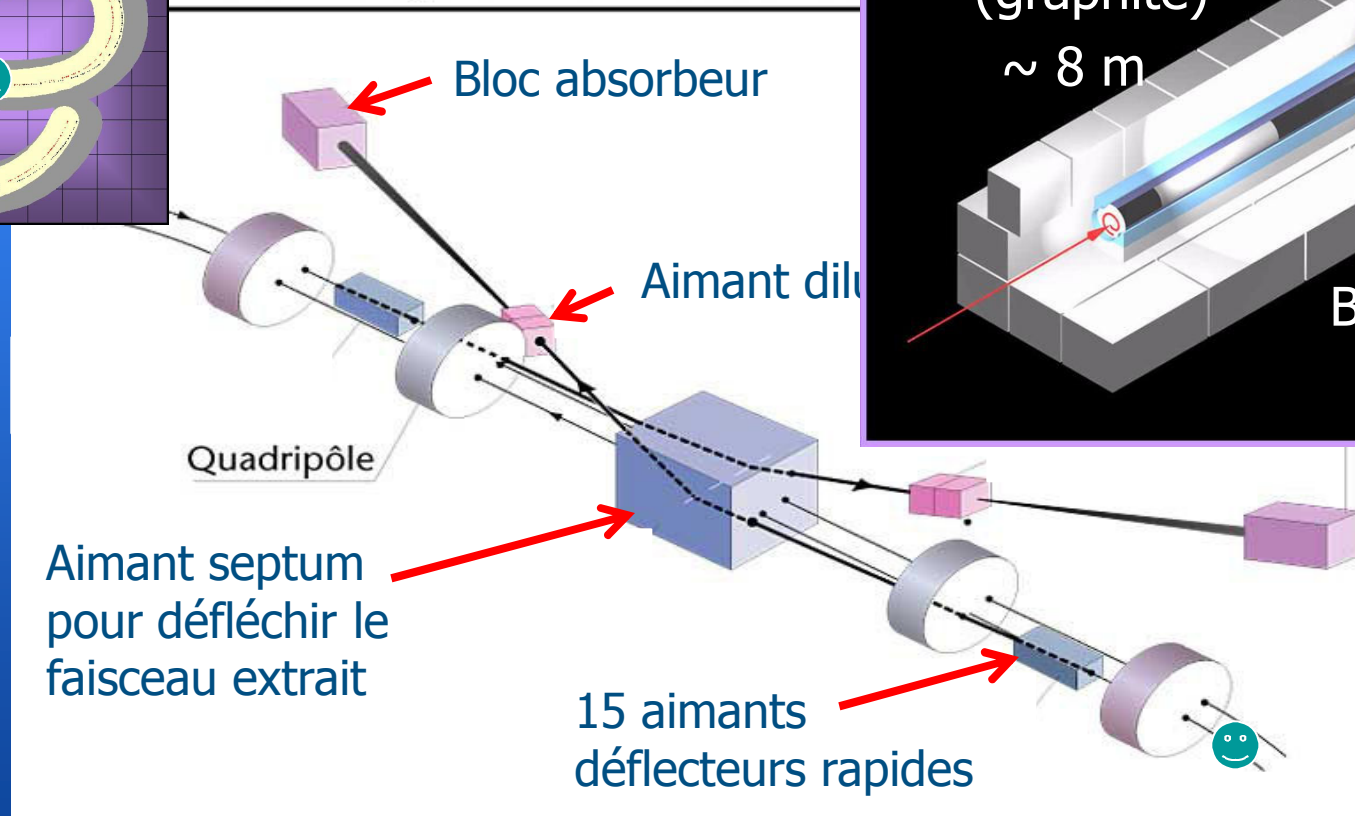
Energie emmagasinée dans le faisceau

Systeme de décharge du faisceau

- Le seul système qui peut accepter sans dommage toute l'énergie du faisceau



...ration du système d'arrêt de fais



Energie emmagasinée dans le faisceau

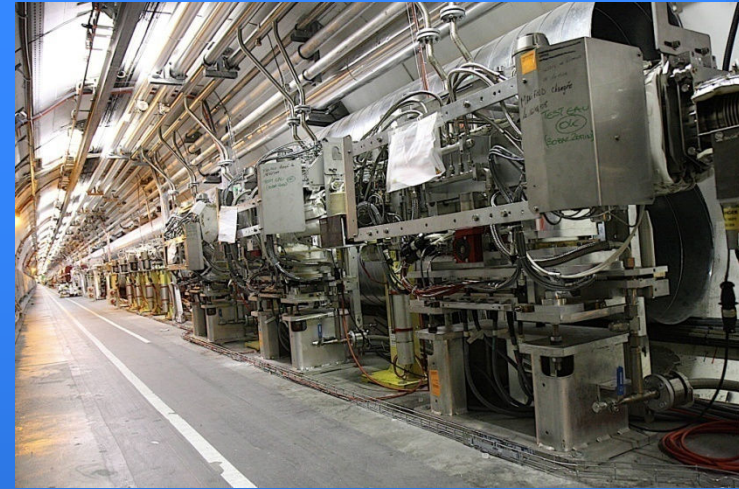
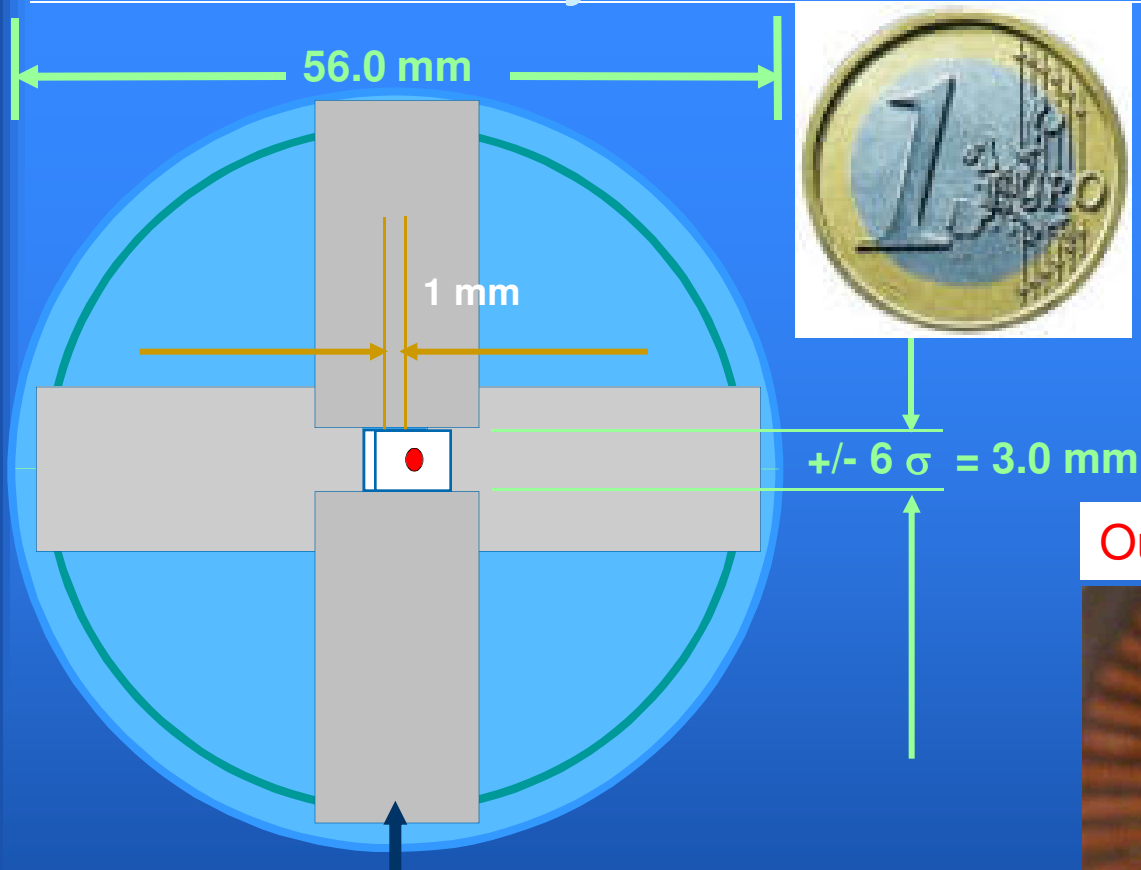
Systeme de collimation

- Raisons d'être du système de collimation:
 - Absorber le halo du faisceau (les particules qui s'éloignent du paquet) afin d'éviter les transitions résistives (quenches) des aimants
 - Lors d'une perte de faisceau: protéger les équipements et les expériences
 - Note: il y a des moniteurs qui permettent de repérer des pertes de faisceau. Lorsque ces équipements détectent des niveaux trop élevés: un interlock active le système de décharge du faisceau (Système de Dump)



Energie emmagasinée dans le faisceau

Système de collimation



Ouverture d'un collimateur

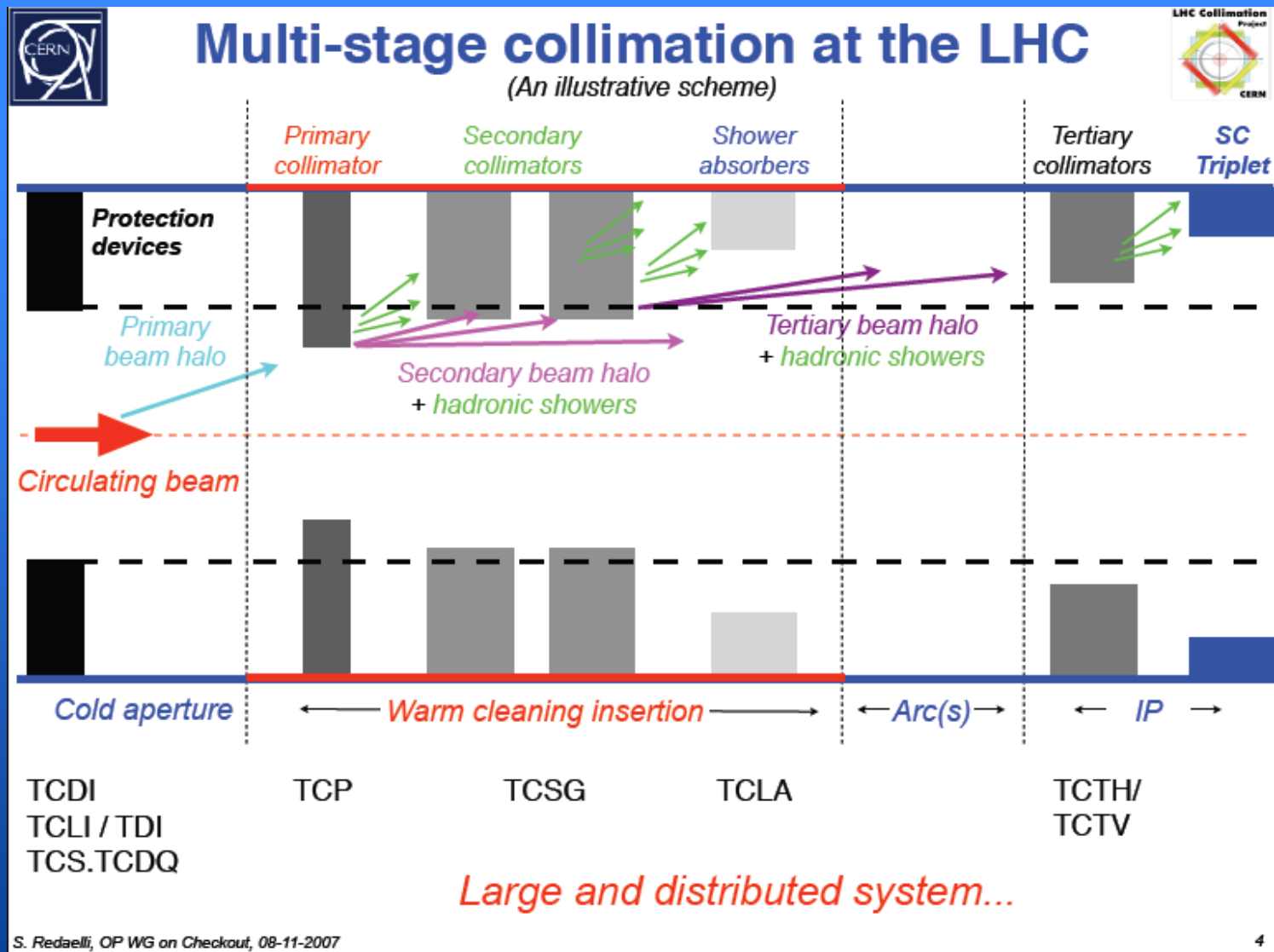


Impact du faisceau sur un collimateur

Réglages des collimateurs à 7 TeV
et luminosité nominale
Très serrés! Feedback d'orbite essentiel

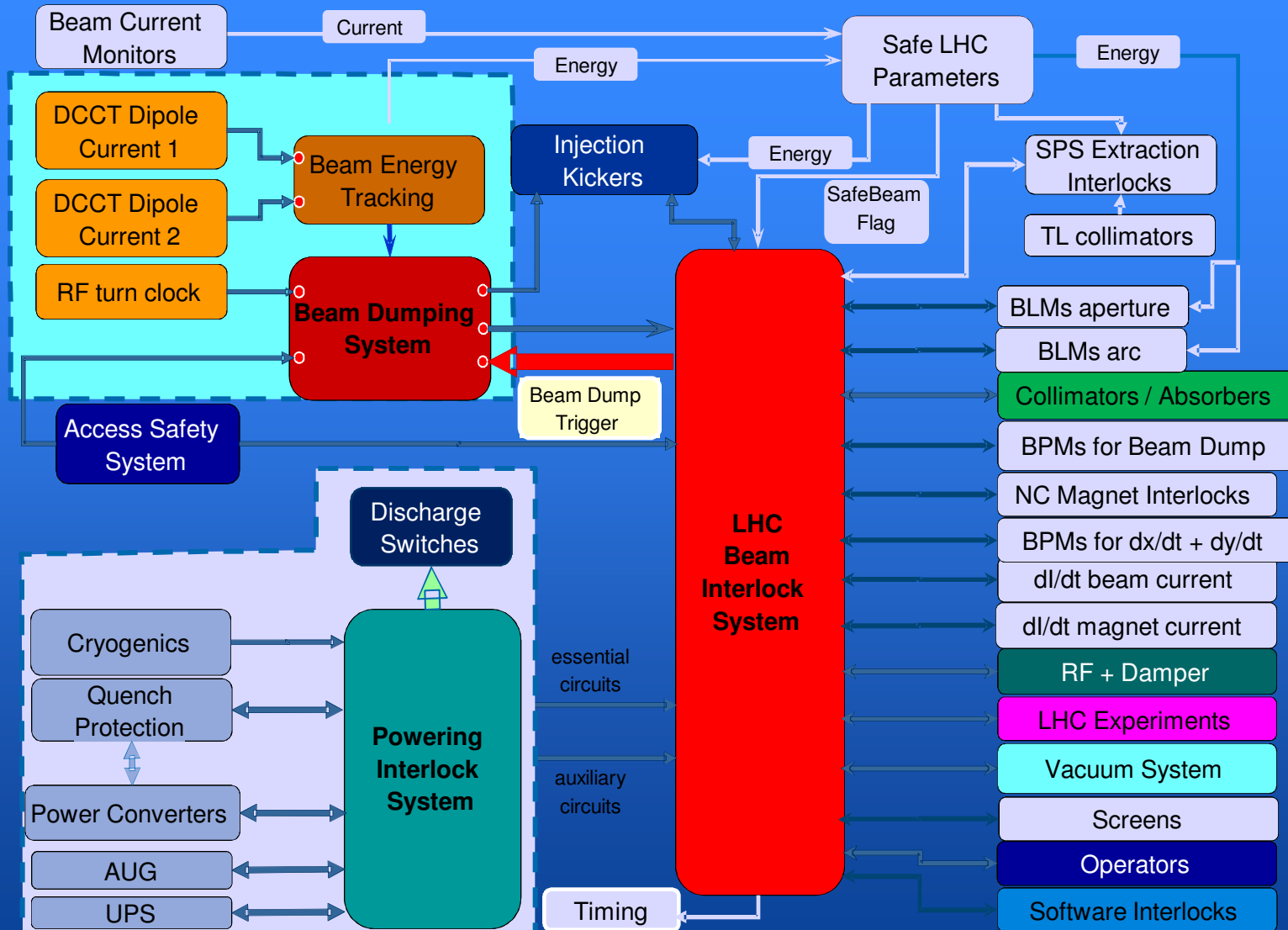
Energie emmagasinée dans le faisceau

Système de collimation



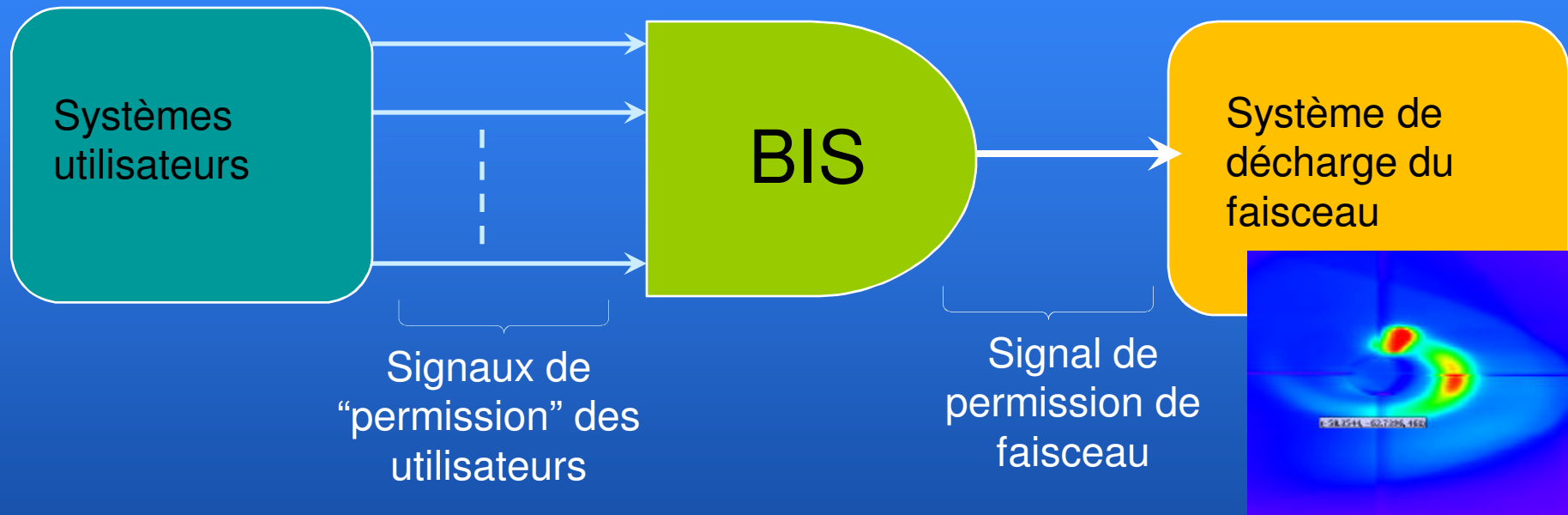
Energie emmagasinée dans le faisceau

Système d'interlock du faisceau (BIS)



Energie emmagasinée dans le faisceau

Système d'interlock du faisceau (BIS)



153 systèmes utilisateurs distribués sur les 27 km de circonférence

Plan

➤ Introduction (très) générale

- Composantes principales de la machine

➤ Plus en détails:

- Cryogénie et vide
- Arc:
 - Dipôles
 - Quadripôles
 - Correcteurs
- Zones d'insertion:
 - Zones d'interaction
 - ...
 - **Système d'injection du faisceau**
 - **Système de radiofréquence**

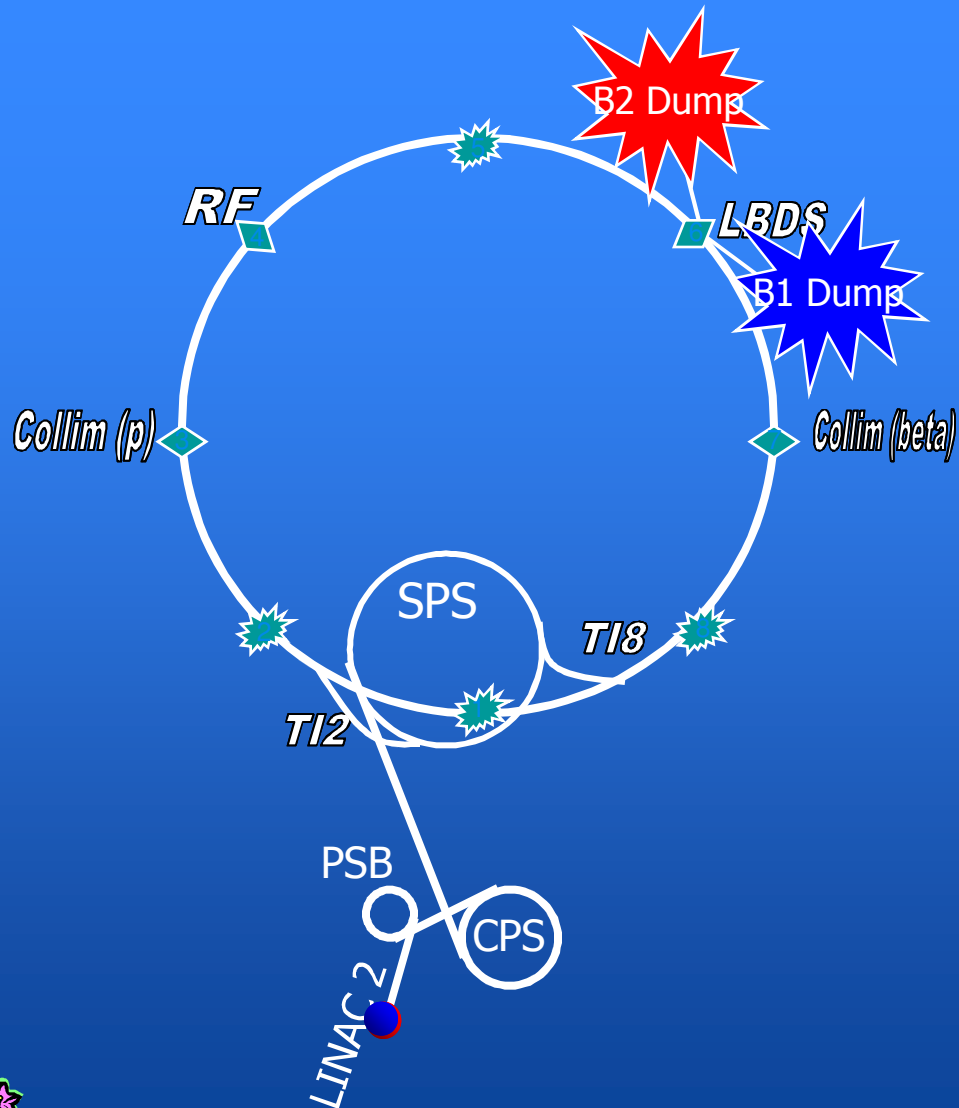
- Energie emmagasinée dans la machine
 - Système de protection contre les transitions résistives

- Energie emmagasinée dans le faisceau
 - Système de décharge du faisceau
 - Système de collimation
 - Système d'interlock du faisceau

- Quelques problèmes rencontrés...
 - Triplets internes
 - PiMS
 - Incident du 19 septembre 2008

➤ Conclusions

Système d'injection du faisceau

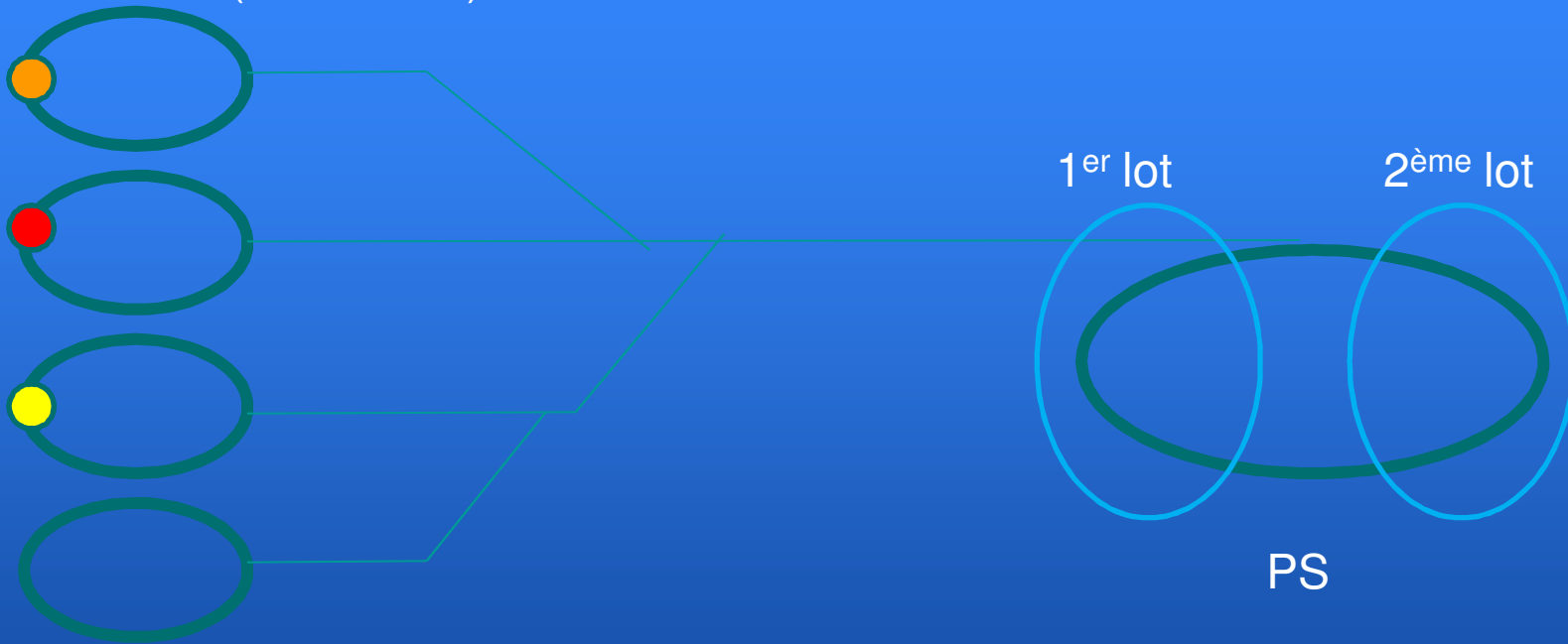


	<u>Energie maximale</u>
LINAC2	0.12 GeV
PSB	1.4 GeV
CPS	26 GeV
SPS	450 GeV
LHC	7000 GeV

Système d'injection du faisceau: dans les injecteurs

➤ BOOSTER (1.4 GeV) → PS (26 GeV) → SPS (450 GeV) → LHC

BOOSTER (4 anneaux)



Deux injections du BOOSTER vers le PS

Système d'injection du faisceau: dans les injecteurs

SPS



Jusqu'à 4 injections de 72 paquets du PS

72 paquets

26 GeV

Espace de 12x25 ns pour permettre la montée en puissance des aimants rapides d'extraction du PS

18 paquets

1.4 GeV

6 paquets

1.4 GeV

PS

Deux injections du BOOSTER vers le PS



BOOSTER

Quadruple séparation

Triple séparation

Systeme d'injection du faisceau: dans le LHC

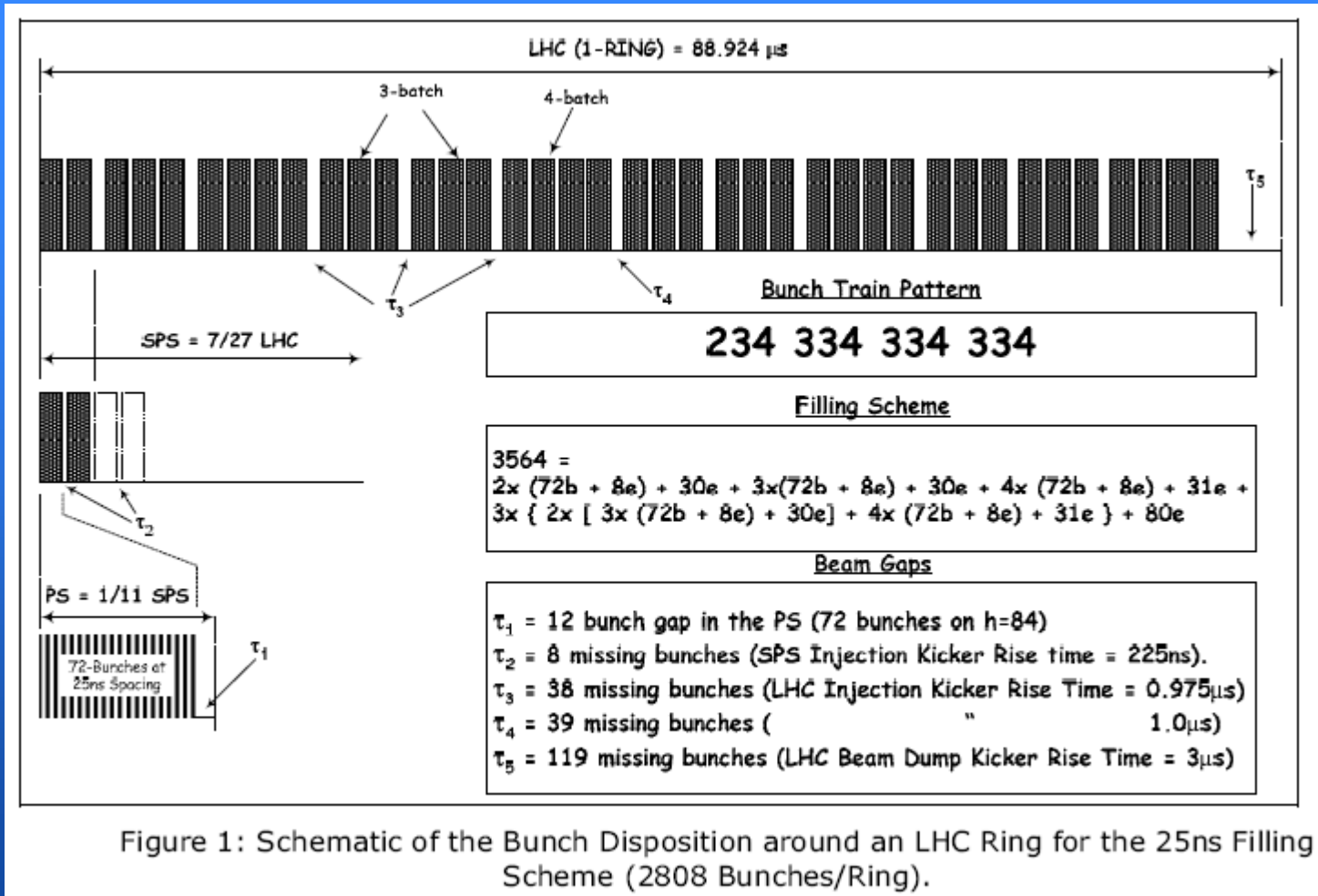
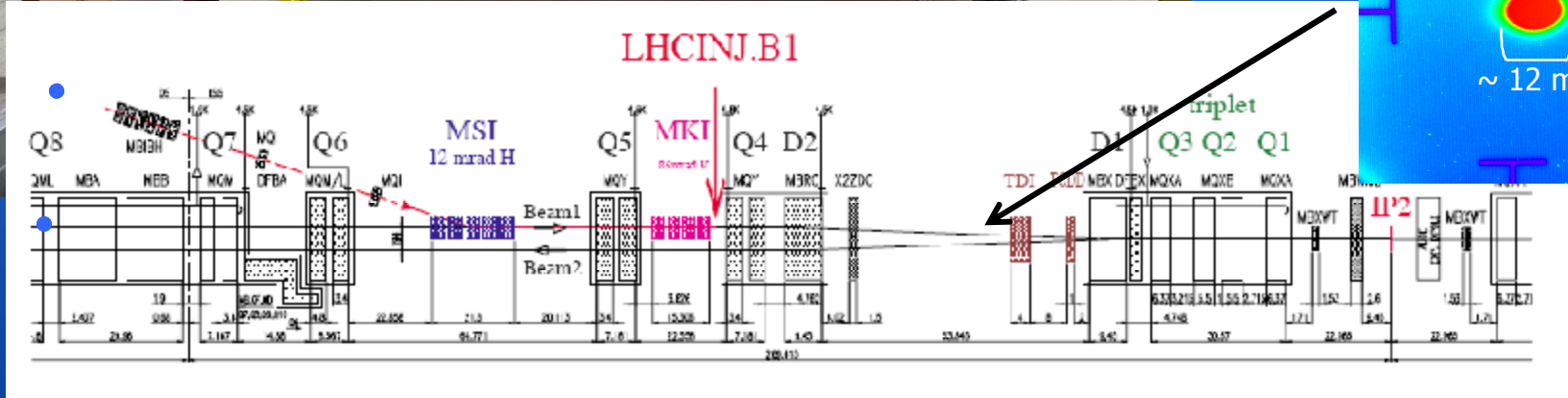
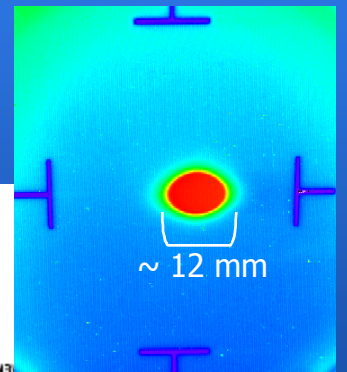
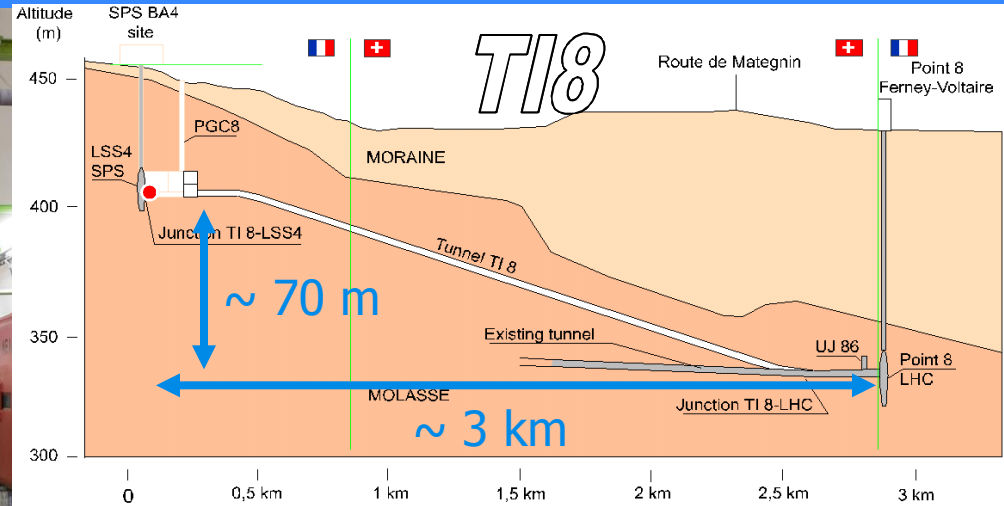
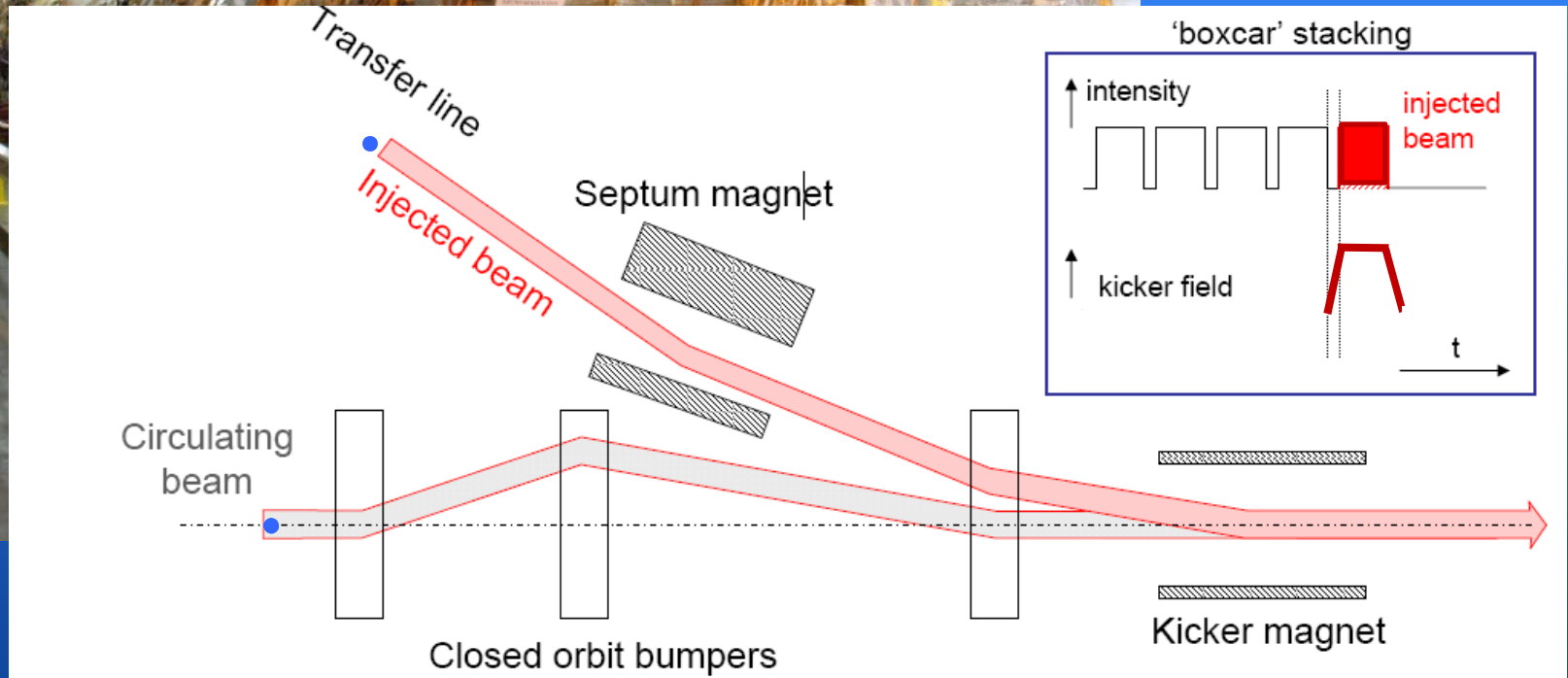
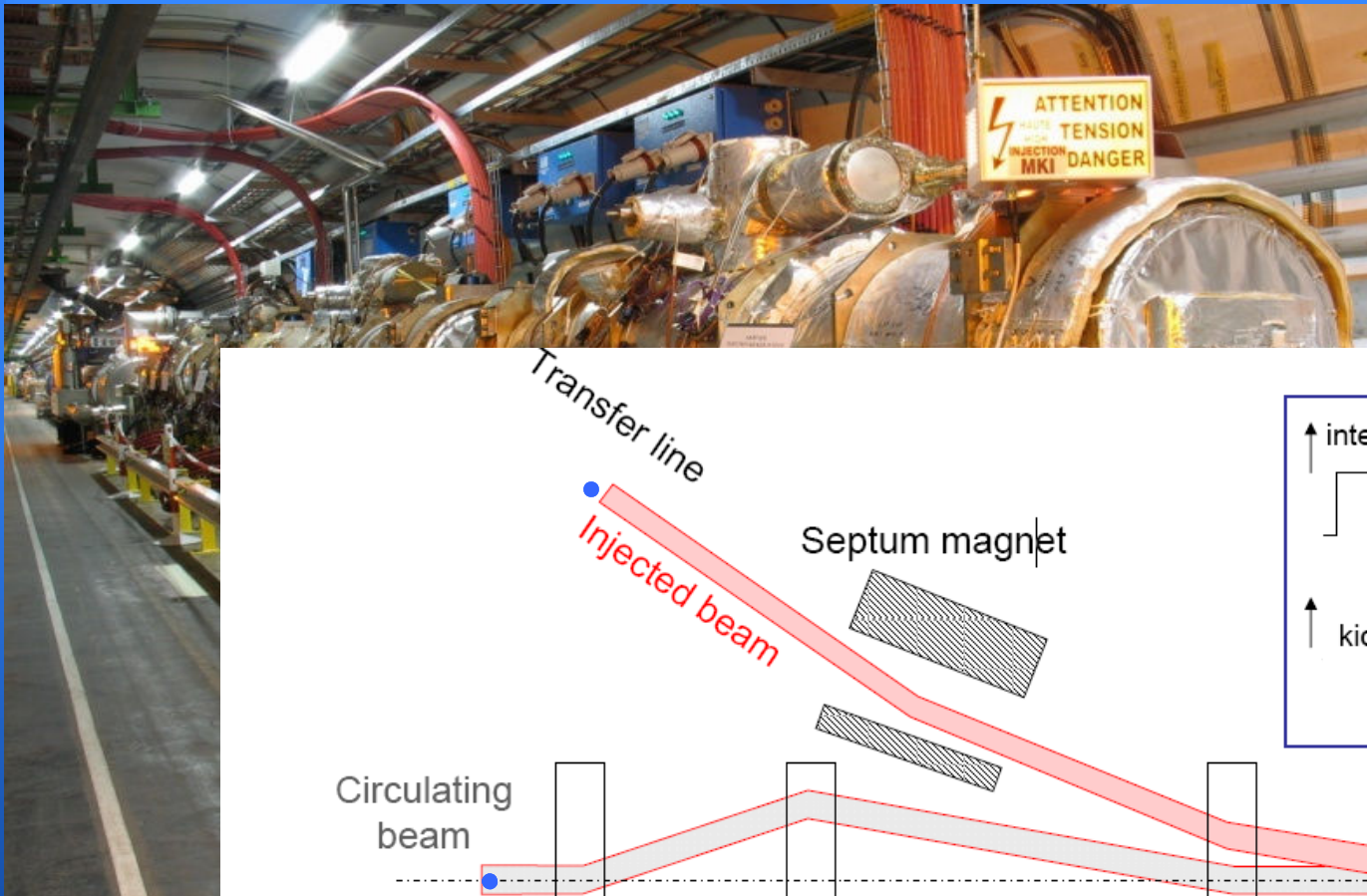


Figure 1: Schematic of the Bunch Disposition around an LHC Ring for the 25ns Filling Scheme (2808 Bunches/Ring).

Système d'injection du faisceau: dans le LHC



Système d'injection du faisceau: dans le LHC



Système de radiofréquence (RF)

➤ Fonctions:

- Synchronisation de l'injection
- Capture des paquets de protons
- Accélération (donner de l'énergie aux paquets de proton à chacun de leurs passages)
- Mesures sur le faisceau

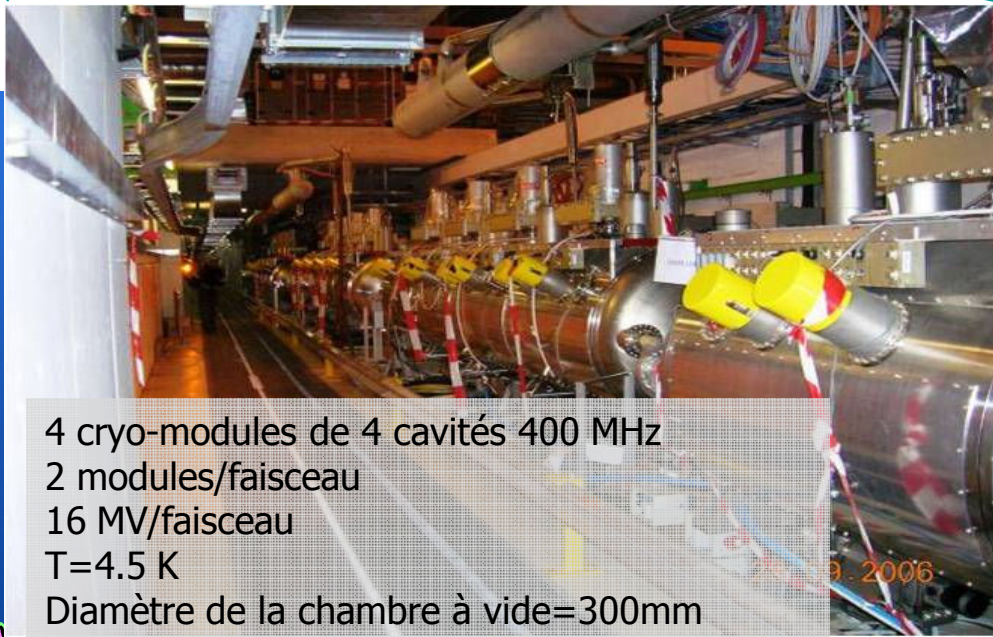
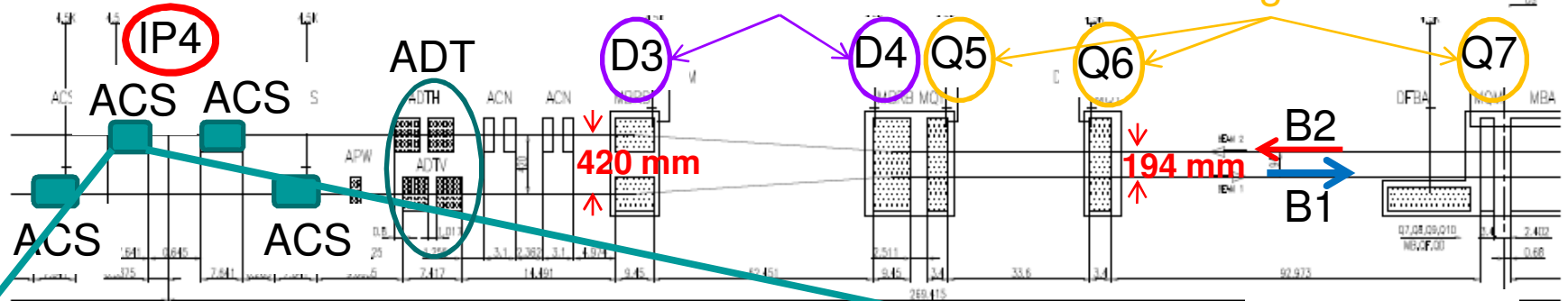
➤ Composantes:

- Système d'accélération principal:
 - Cavités radiofréquences à 400 MHz
- Amortissement transverse et système de feed-back
 - Fonctions (notamment):
 - Amortir les oscillations d'injection
 - Exciter des oscillations transverses pour permettre des mesures sur le faisceau
- Electronique de bas niveau du système RF
 - Fonctions (notamment):
 - Contrôle des cavités
 - Synchronisation

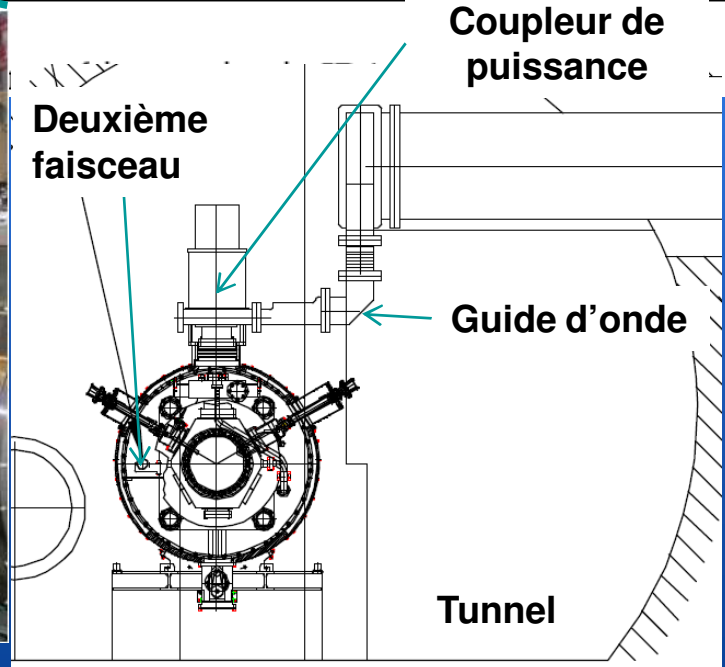


Système de radiofréquence (RF)

RF INSERTION



4 cryo-modules de 4 cavités 400 MHz
 2 modules/faisceau
 16 MV/faisceau
 T=4.5 K
 Diamètre de la chambre à vide=300mm



Plan

➤ Introduction (très) générale

- Composantes principales de la machine

➤ Plus en détails:

- Cryogénie et vide
- Arc:
 - Dipôles
 - Quadripôles
 - Correcteurs
- Zones d'insertion:
 - Zones d'interaction
 - ...
 - Système d'injection du faisceau
 - Système de radiofréquence

➤ Energie emmagasinée dans la machine

- Système de protection contre les transitions résistives

➤ Energie emmagasinée dans le faisceau

- Système de décharge du faisceau
- Système de collimation
- Système d'interlock du faisceau

➤ Quelques problèmes rencontrés...

- Triplets internes
- PIMS
- Incident du 19 septembre 2008

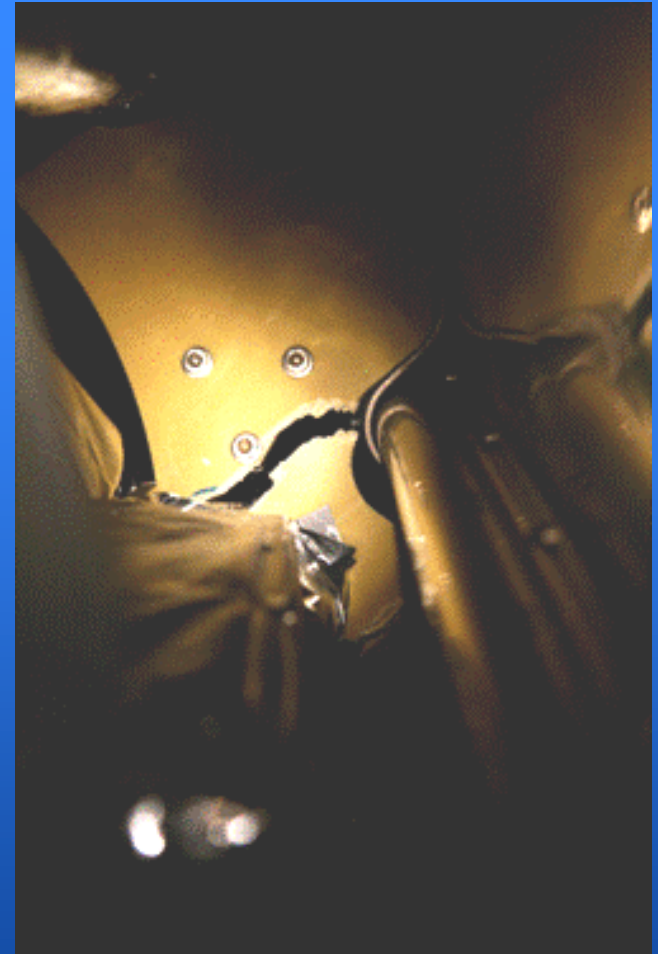
➤ Conclusions

Quelques problèmes rencontrés...

Triplets internes

➤ Problèmes:

- Novembre 2006: Lors des tests de pression un échangeur thermique dans un triplet interne n'a pas résisté à une différence de pression de 9 bar: écrasement de l'échangeur thermique



- Mars 2007: Un triplet interne a subi de gros dégâts lors d'un test de pression: rupture des supports des aimants composants le triplet

Quelques problèmes rencontrés...

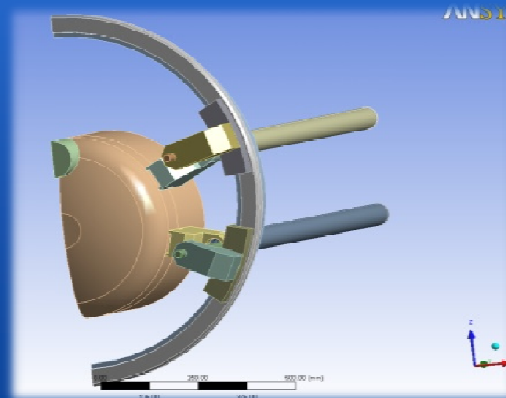
Triplets internes

➤ Solutions:

- Nouvelle conception de l'échangeur thermique des triplets internes



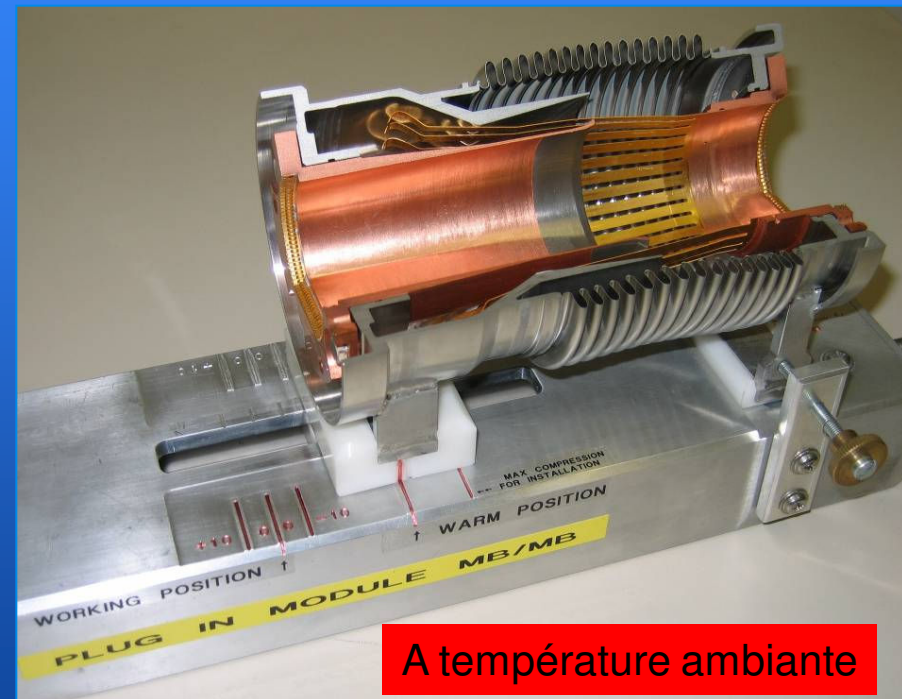
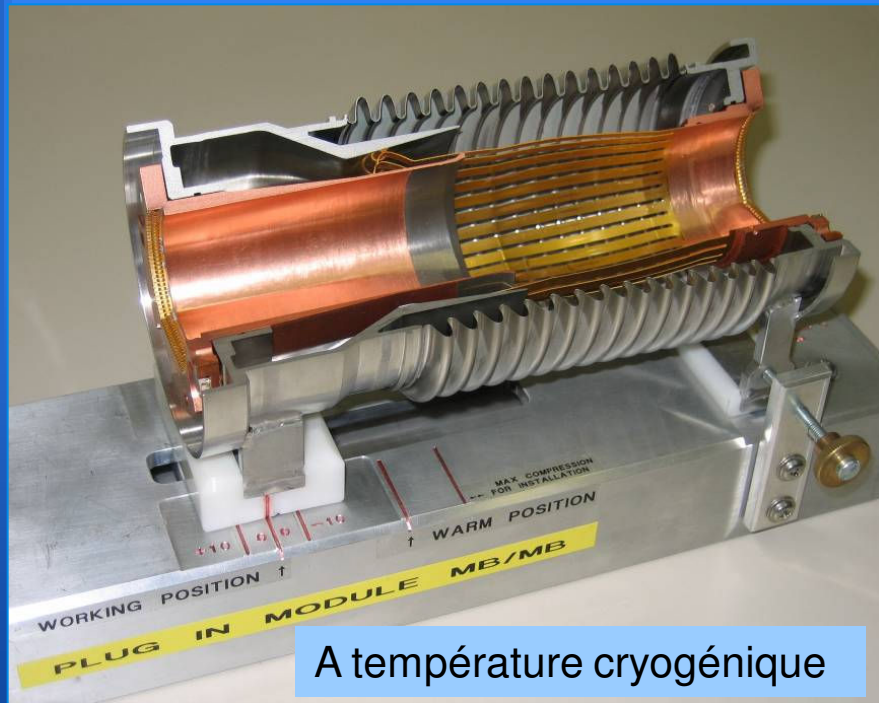
- Nouvelle conception des supports des aimants des triplets internes de façon à supporter les forces longitudinales et maintenir la masse froide en position



Quelques problèmes rencontrés: PiMs

➤ PiM (Plug-in module):

- module enfichable
- responsable de la continuité électrique de la chambre à vide au niveau des interconnexions entre les aimants



Quelques problèmes rencontrés: PiMs

➤ Problème:

- Certains PiMs ne respectent pas les critères de qualité requis
- En 2007, lors du réchauffement d'un secteur (après premier refroidissement complet):

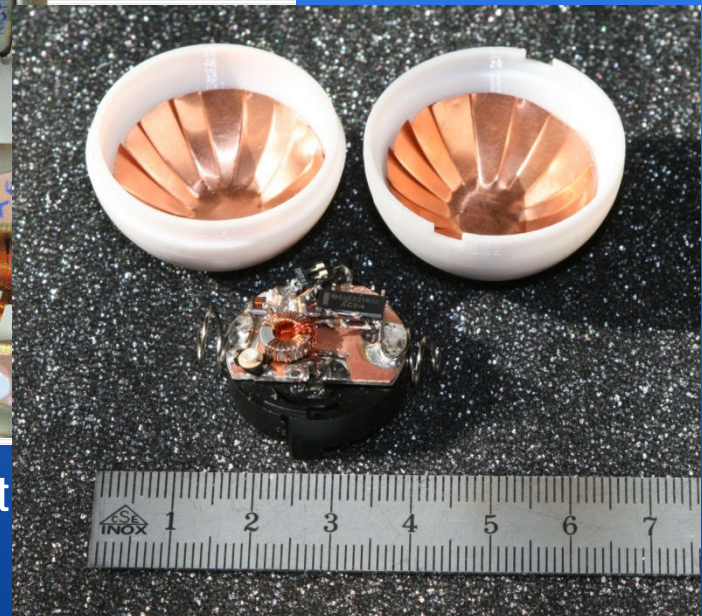
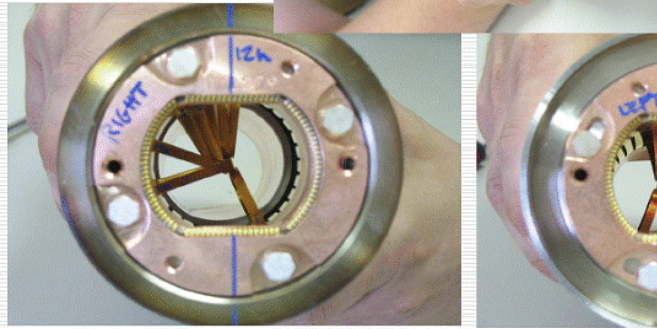
- Détérioration

QQBI.26R7 line V2

- Comment tester (ou réparer) sans avoir à démonter le réacteur

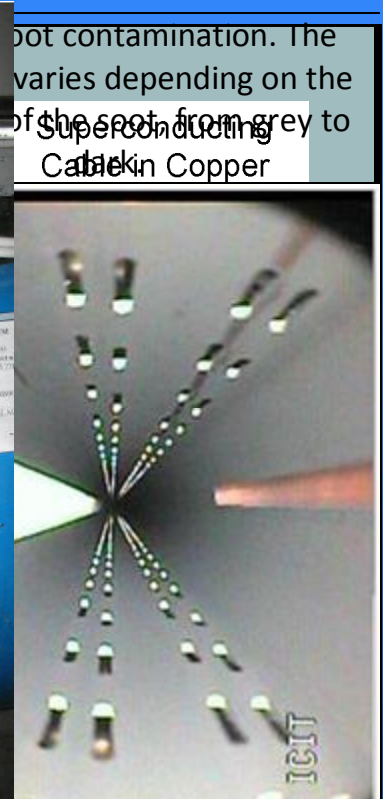
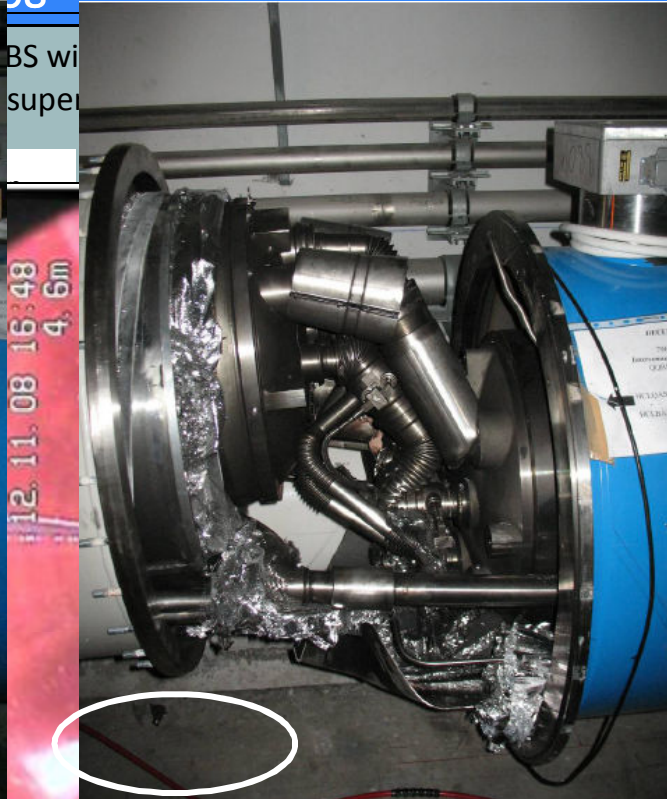
➤ Innovation:

- Une balle testant à 40 MHz
- Soufflée dans le réacteur
- Son passage est enregistré (moniteurs)
- L'absence de signal signifie que la balle est bloquée par un PiM détérioré



Quelques problèmes rencontrés: Incident du 19 septembre 2008

- Test de mise en puissance jusqu'à 9.3 kA des aimants dipolaires:
 - A 8.7 kA, développement d'une zone résistive dans un raccord de barres de distribution entre deux dinôles



- La chambre à vide a été affectée (suie et présence de morceaux de la couverture d'isolation)

Quelques problèmes rencontrés: Incident du 19 septembre 2008

➤ Réaction:

- Comprendre ce qui s'est passé:
 - Probablement une interconnexion défectueuse (manque de soudure?)
- S'assurer que cela ne se reproduise pas:
 - Outils de diagnostic plus performants pour identifier des connexions défectueuses
 - Amélioration du système de protection contre les transitions résistives (plus sensible, couvrant plus de cas possibles)
- Minimiser les conséquences en cas de nouveau problème:
 - Installation de soupapes rapides à capacité plus grande
- Et réparer, bien sûr.



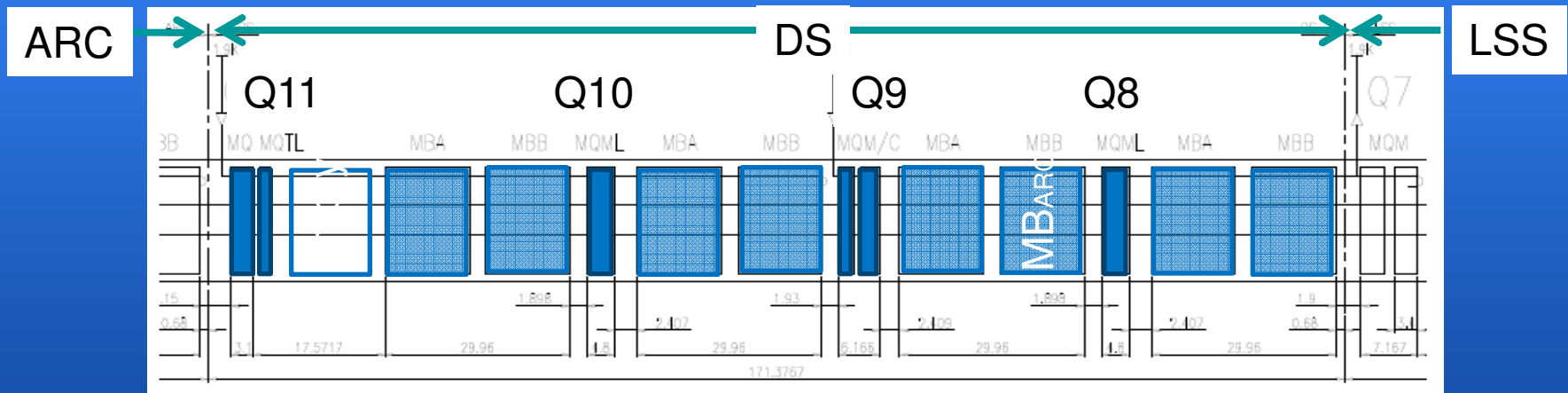
Conclusions

- Le LHC est une machine très complexe et représente de très nombreux défis technologiques.
- Sujets non abordés mais tout aussi importants/complexes/ambitieux, notamment:
 - Instrumentation
 - Tests de mise en puissance
 - Tests avec faisceau:
 - Injection
 - Faisceau circulant
 - Accélération
 - Augmentation d'intensité (# p⁺/paquet, # paquets)
 - Angles de croisement
 - etc... etc... etc...
 - Echéances
 - etc... etc... etc...



Suppression de dispersion

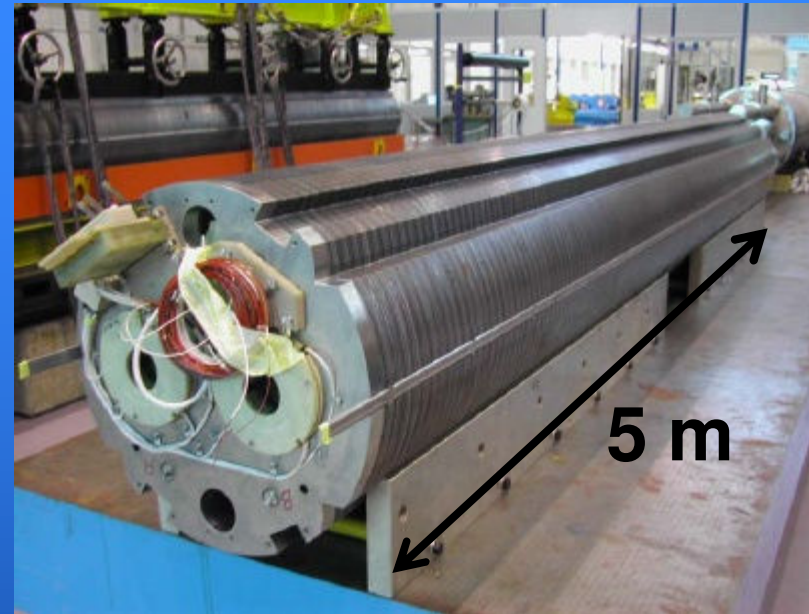
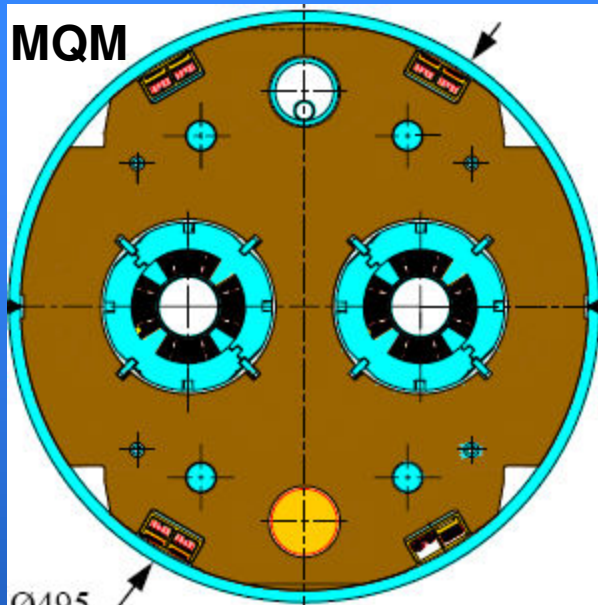
- Zone localisée à la transition entre l'arc et la section droite
- Raisons d'être:
 - Adapter l'orbite de référence du LHC à la géométrie du tunnel
 - Compenser la dispersion horizontale générée
 - par les dipôles de l'arc
 - par les dipôles de séparation/recombinaison et les bumps d'angles de croisement
 - Aider à l'adaptation de l'orbite d'insertion à la solution périodique de l'arc.



- Similaire à une maille de l'arc.
 - Si seuls des dipôles sont utilisés, ils ne peuvent pas compenser la dispersion. Des quadripôles alimentés individuellement sont donc nécessaires (Q8 à Q11, avec ~ 6000 A)

Suppression de dispersion

- Types de quadripôles: MQ, **MQM**, MQTL



Gradient nominal= 200 /160 T/m

$I_{\text{nominal}} = 5.4 / 4.3 \text{ kA}$

$L_{\text{mag}} = 2.4 / 3.4 / 4.8 \text{ m}$

$T = 1.9 / 4.5 \text{ K}$

Ouvertures alimentées indépendamment