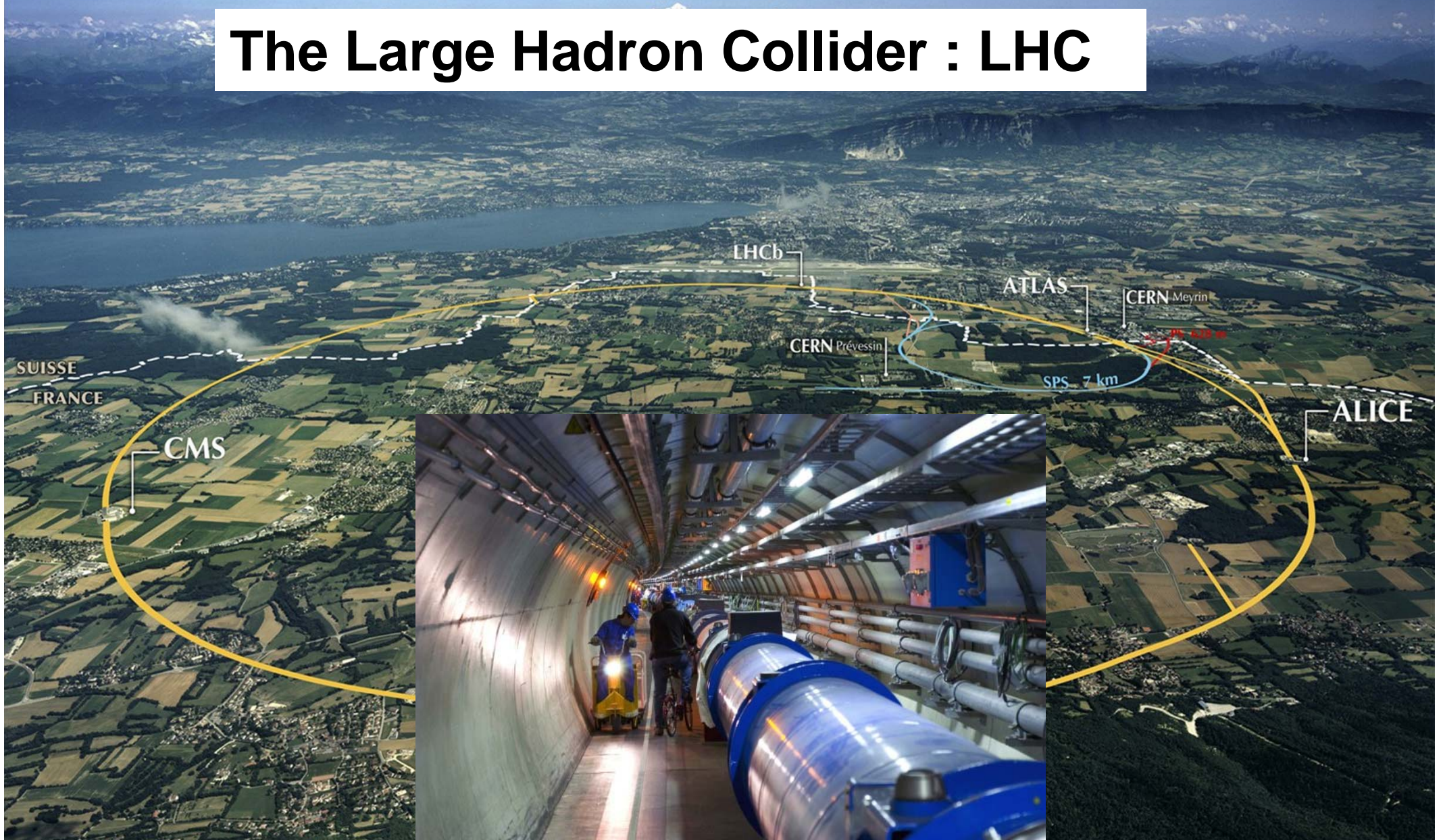


The Large Hadron Collider : LHC



Sommaire

1- Histoire du projet

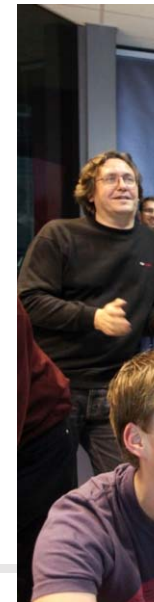
Pourquoi un **Collisionneur** de **protons** ?

2- Éléments clefs du LHC

3- Fonctionnement du LHC (2010-2013)

Le LHC: un quart de siècle de travail

1984	Etude préliminaire
1994	Approbation par le conseil du cern
1996-1998	Approbation des 4 grandes expériences
2000	arrêt de l'accélérateur précédent (le LEP) et démarrage de la construction du LHC
Fin 2007- début 2008	fin de la construction après plusieurs retards
septembre 2008	démarrage officiel du LHC et incident électrique
23 octobre 2009 :	Redémarrage
30 mars 2010	premières collisions à 7 TeV et Début de l'exploitation scientifique du LHC



Pourquoi le LHC ?

1983 : découverte des W/Z puis construction du LEP (pour étudier le Z puis W). Top pas découvert.

Faible contrainte expérimentale sur le Higgs $> 10^{\text{aine}}$ de GeV

Contrainte théorique : $< 800- 1000$ GeV

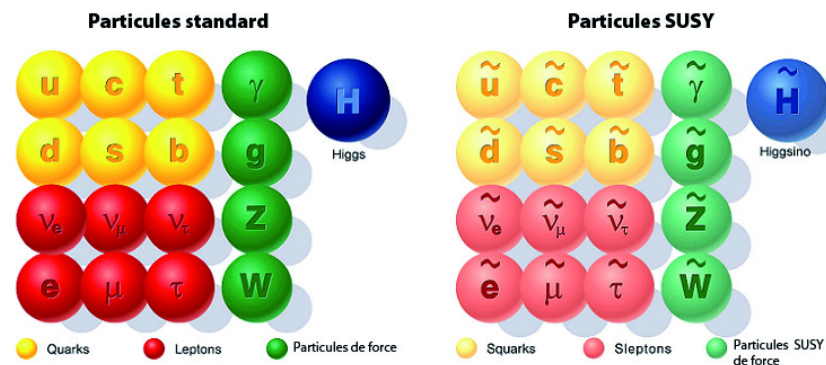
Raison première du LHC :

Prouver ou pas l'existence du Higgs en couvrant le domaine de masse

→ Nécessité d'une très haute énergie et haute intensité (phénomène rare)

Mais programme de physique bien plus vaste :

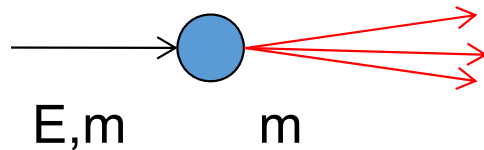
- Recherche de nouvelle physique directe (ATLAS +CMS) ou indirecte (LHCb) → **matière noire**
- Violation de CP (LHCb) → **asymétrie matière - antimatiere**
- Etude du plasma quark gluon (ALICE)



Pourquoi un collisionneur ?

→ Seule solution pour des collisions à haute énergie

Cible fixe

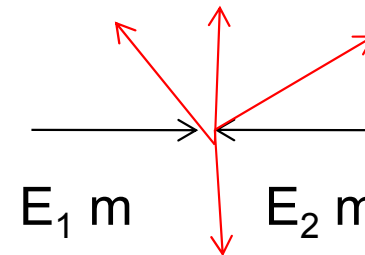


$$\sqrt{s} = [2(mE + m^2)]^{1/2}$$

Varie comme \sqrt{E}

Pour avoir 14 TeV dans le centre de masse :
E faisceau ~ 98 TeV !

Collisionneur



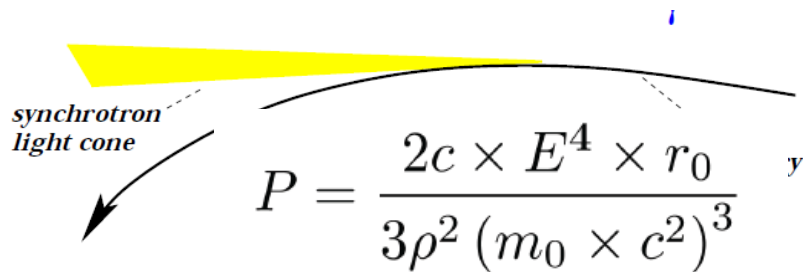
$$\sqrt{s} = (E_1 + E_2) = 2E_{\text{beam}}$$

Varie comme E

$E = 7$ TeV \rightarrow 14 TeV dans le centre de masse
Deux faisceaux à accélérer et à faire entrer en collision....

Proton-proton ?

LEP : e+e- dans le même tunnel de 27 km. Energie maximale dans le centre de masse en 2000 : 205 GeV (peut produire un Higgs si masse < 115 GeV)



$$P = \frac{2c \times E^4 \times r_0}{3\rho^2 (m_0 \times c^2)^3}$$

e-	$W(\text{MeV}) = 8.85 \times 10^{-5} \times E^4(\text{GeV})/\rho^2(\text{km})$	$\approx 2 \text{ GeV}$	(LEP)
p	$W(\text{keV}) = 7.8 \times 10^{-3} \times E^4(\text{TeV})/\rho^2(\text{km})$	$\approx 6 \text{ keV}$	(LHC)

e+e- : difficulté champ accélérateur E
pp : difficulté champ magnétique B

Puissance perdue varie comme :

- 4^{ième} puissance de l'énergie de la particule (qu'il faut réinjecter à chaque tour)
- 1/ rayon de courbure au carré
- 1/ masse de la particule au cube

- faire de grands accélérateurs
- favorable aux particule lourdes
- Proton plutôt que électron

Désavantage : proton pas une particule ponctuelle (quark+gluon)

- Energie disponible dans le centre de masse de la réaction jusqu'à ~4.5-5 TeV et pas connue,...mais proton pas de moment transverse (p_T)

L'énergie du LHC : 2x7 TeV

Énergie 1 proton : $7 \cdot 10^{12}$ eV

Une abeille de 1 g à 1 m/s



$$E = m v^2 / 2 = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ J} \\ = 3.125 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

1000 fois moins qu'une abeille !!!

Mais le faisceau du LHC c'est

10^{11} protons : $\sim 1 \cdot 10^8$ Joule

(~ 1200 paquets)

comme un camion de 100 T à 120 km/h

ou ~ 90 kg de TNT



Une collision c'est celle des deux camions dans $15 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$!!!!

Et les faisceaux se croisent
40 Millions de fois par seconde !!!

Défi: gestion des énergies stockées

Energie magnétique stockée dans les aimants: **11.3 GJoule**

10 GJoule \cong volant à 700 km/h



Energie stockée dans les faisceaux: **720 MJ** [$6 \cdot 10^{14}$ protons (1 ng of H⁺) à 7 TeV]

700 MJ suffisant pour fondre 1 tonne de cuivre



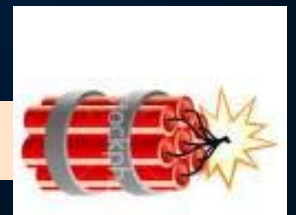
700 MJoule qui doivent être déchargés en 88 μ s

(27 km à la vitesse de la lumière)

$700 \cdot 10^6 / 88 \cdot 10^6 \cong 8$ TW

Puissance électrique mondiale installée $\cong 3.8$ TW

90 kg de TNT par faisceau

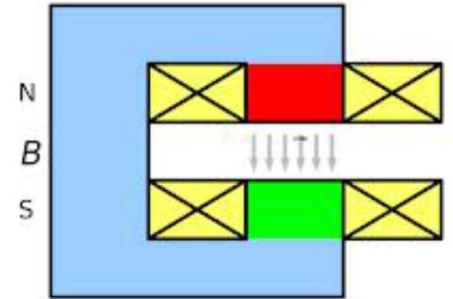


Éléments clefs du LHC : dipôles

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Pour guider les particules sur leur trajectoire

→ champ magnétique : dipôle avec champ vertical pour dévier dans le plan horizontal



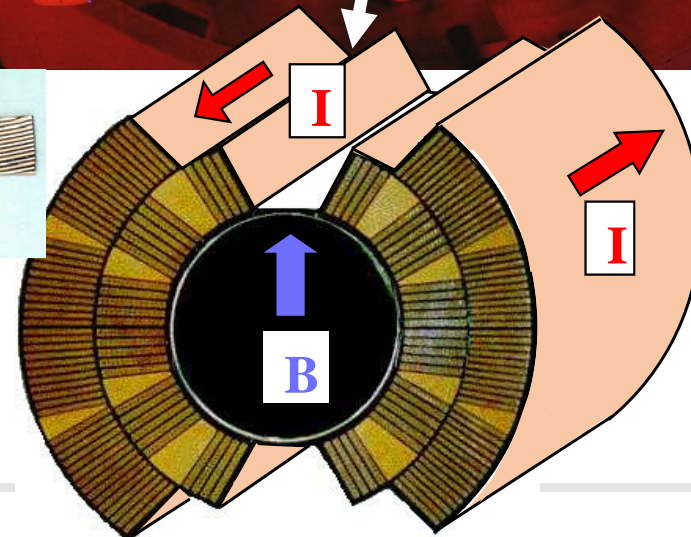
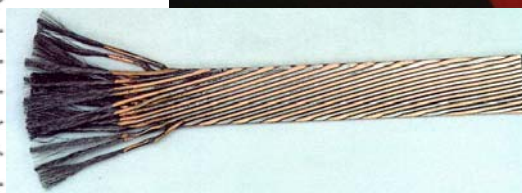
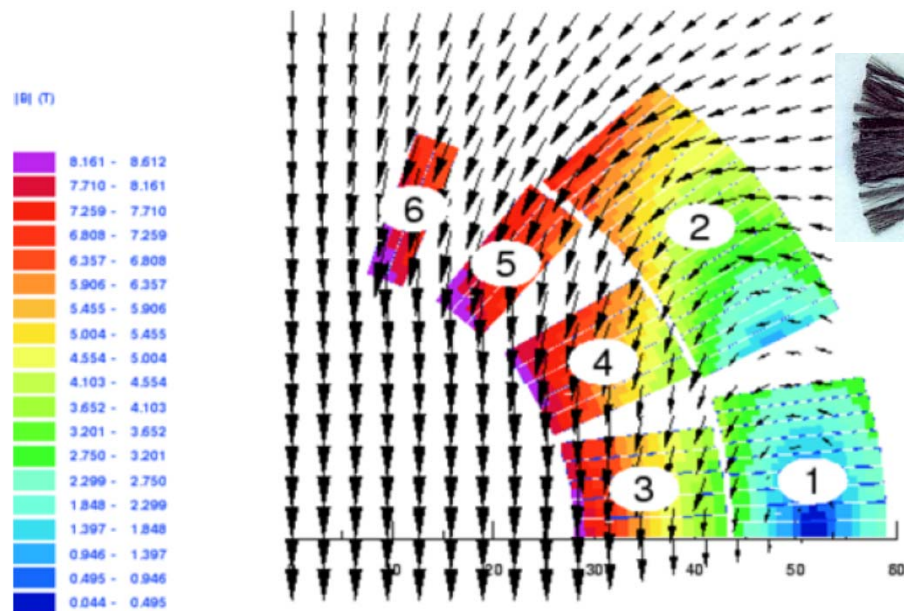
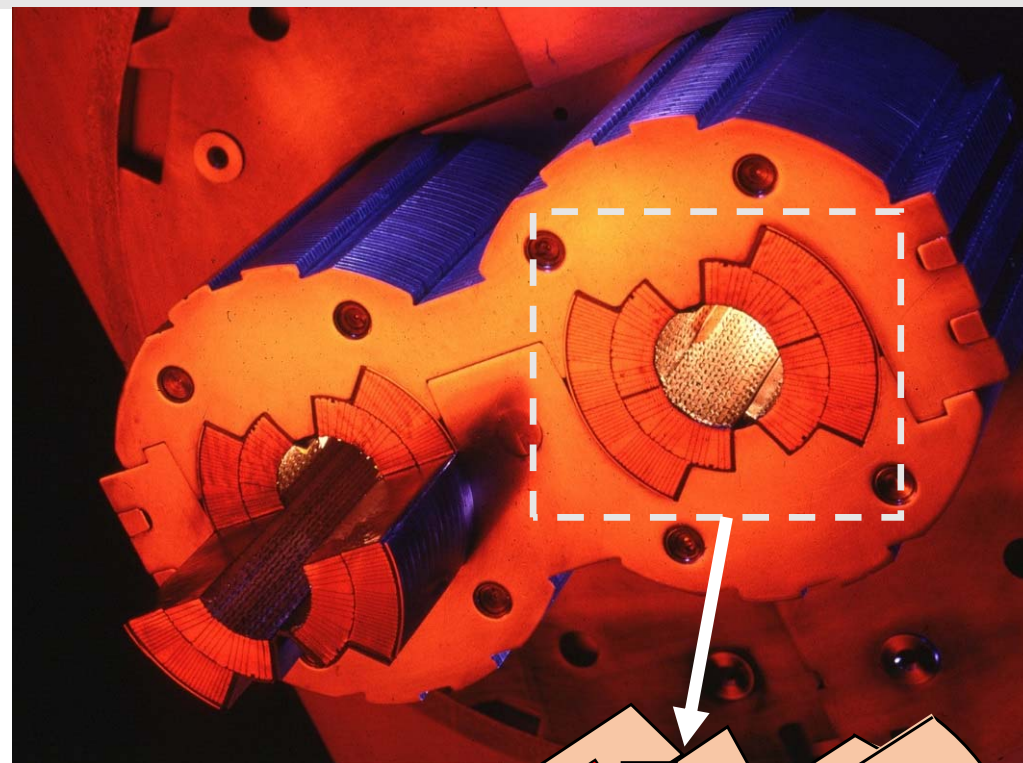
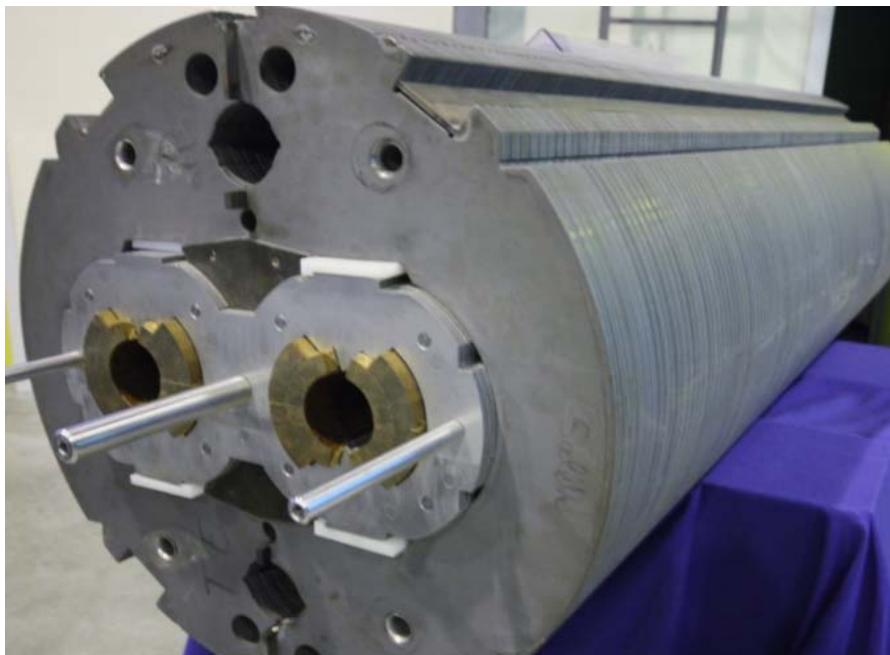
$$\frac{1}{\rho[m]} \approx 0.3 \frac{B[T]}{p[GeV/c]} \xrightarrow{\text{LHC 7 TeV, 8.3 T}} \frac{1}{2,8 \text{ km}} = 0.3 \frac{8.3}{7000}$$

SSC : Tunnel de 40 km utilisation de dipôles classiques « chaud »

Pour atteindre 8.3 T, nécessité d'utiliser des aimants supraconducteurs cryogénique (He liquide ~1.8 K)

Proton dans chaque faisceau en sens inverse → besoin de deux champs opposés !

Eléments clés du LHC : dipôles (1)

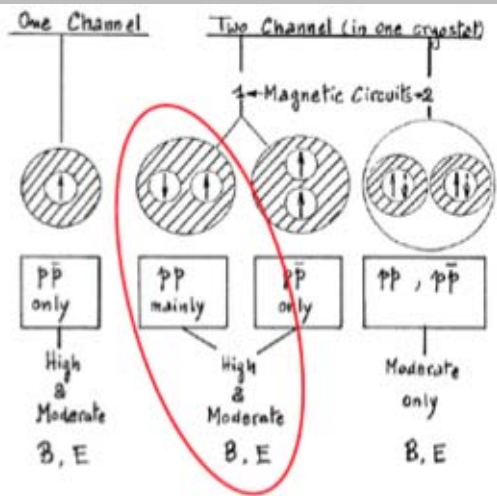


1200 t/7600 km câbles supra (Nb/Ti)

June 1994
first full scale prototype dipole

June 2007 First sector cold

ECFA-CERN workshop



April 2008
Last dipole down



1994 project approved by council (1-in-2)

SSC cancelled

Main contracts signed



First set of twin 1 m prototypes
Over 9 T



2002 String 2

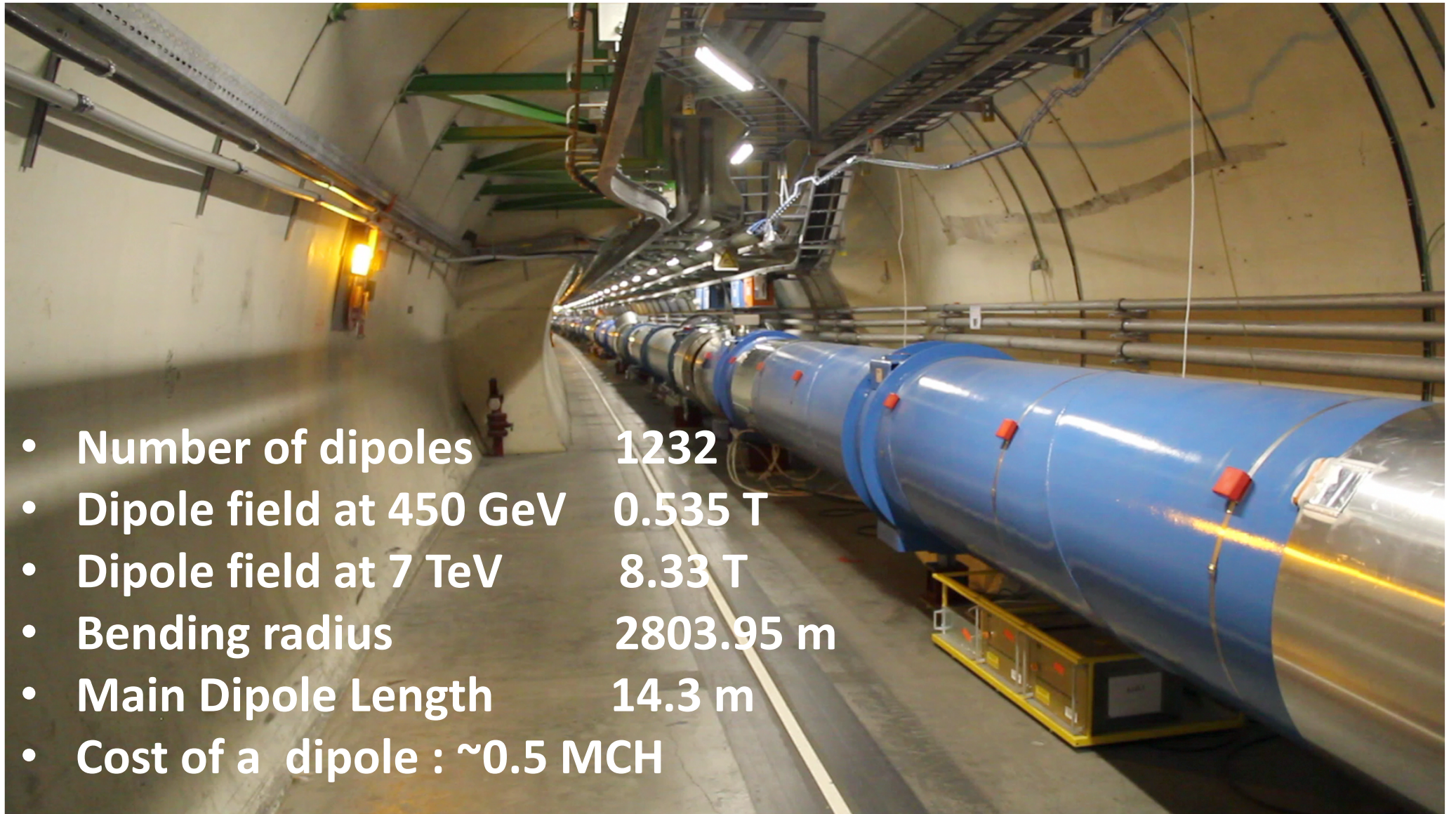


November 2006
1232 delivered



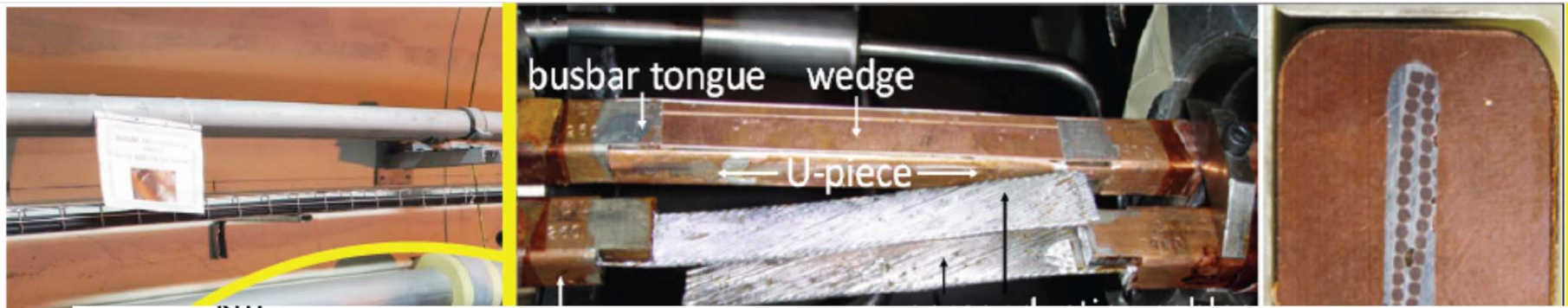
September 19, 2008

Eléments clefs du LHC : dipôles (2)

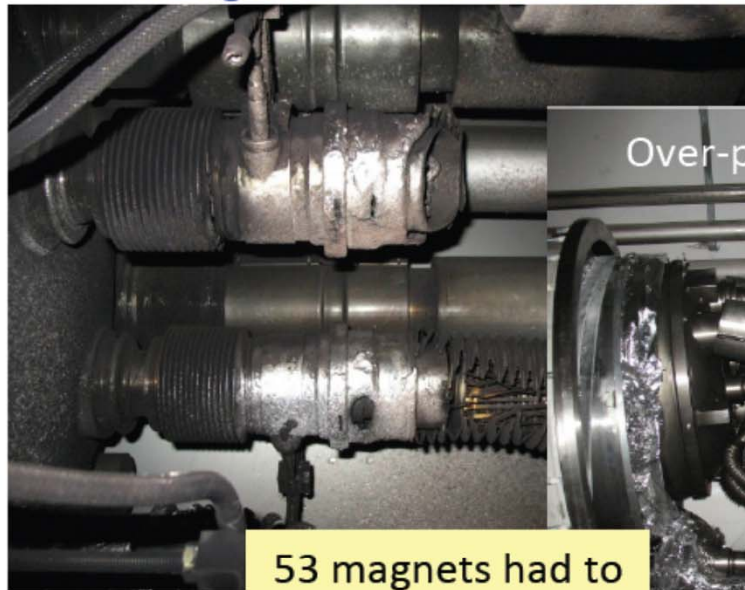


- Number of dipoles 1232
- Dipole field at 450 GeV 0.535 T
- Dipole field at 7 TeV 8.33 T
- Bending radius 2803.95 m
- Main Dipole Length 14.3 m
- Cost of a dipole : ~0.5 MCH

Interlude: Incident 2008



Arcing in the interconnection



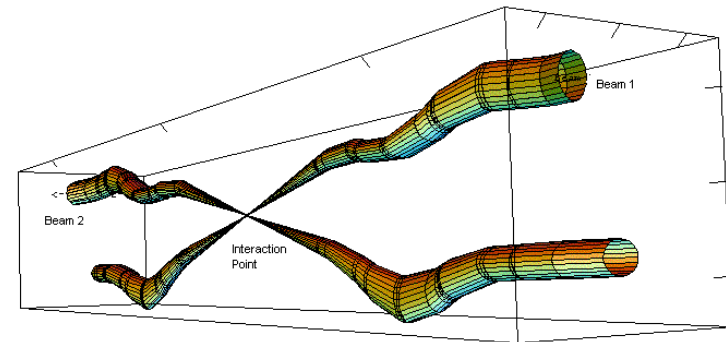
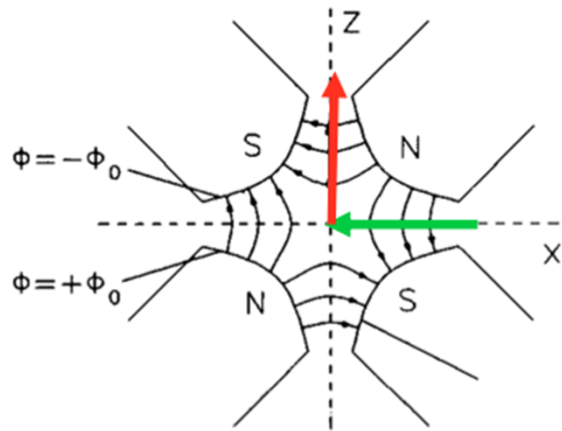
53 magnets had to be repaired



Résistance de qq centaines de nΩ dans les soudures suffisante (RI^2 avec 8000A)

Éléments clefs du LHC : quadripôles ...

Nécessité de confiner le faisceau dans le plan transverse ($15 \times 50 \mu\text{m}^2$ au point de collision) : \rightarrow quadripôles, sextupoles (diamètre d'un cheveu)

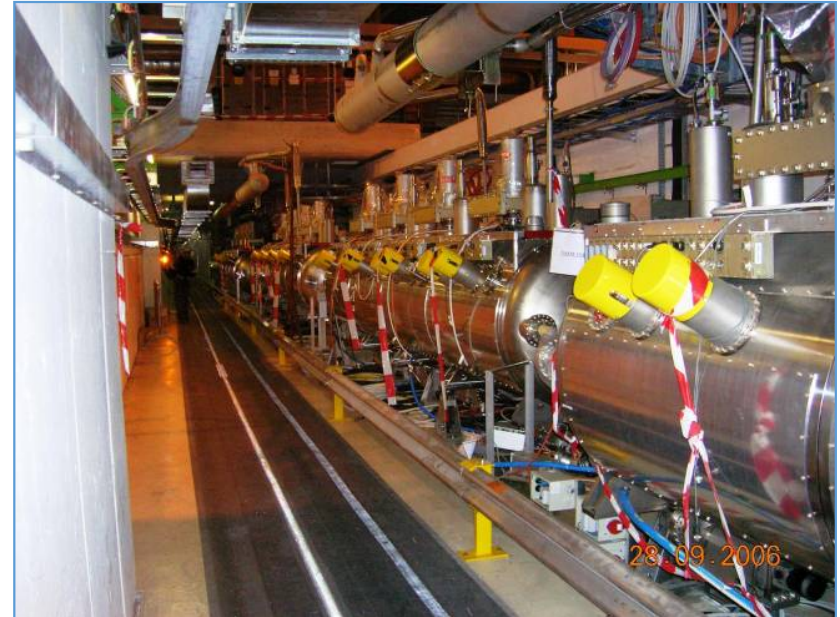
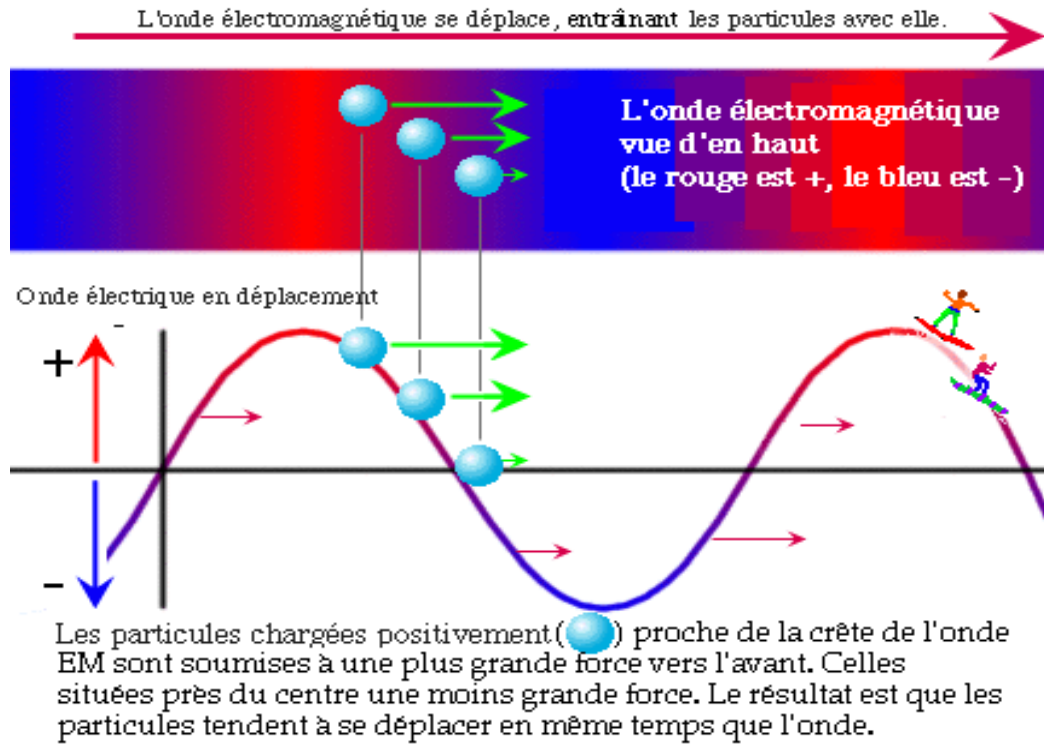


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision



Un total de 9300 aimants !

Éléments clefs du LHC : cavité RF



2x 4 cavités supra par faisceau
450 GeV \rightarrow 4 (7) TeV

Les particules gagnent 16 MeV par passage (11000 tours par seconde)

Eléments clés du LHC : cryogénie





- **Le machine la plus grande au monde** 26659 m et le circuit le plus rapide de la planète : **99.99999991%** de la vitesse de la lumière

Le Champs Magnétique : 1232 dipôles SUPRA de 14.3 m produisant un champ de 8.4 Tesla (9000 aimants)

Câble SUPRA : 7600 km câbles (filaments 5 fois la distance terre au soleil plus quelques distances terre lune!)

- **Le plus grand réfrigérateur**: -271 degrés Celsius (la plus grande installation cryogénique du monde !). Plus froid que l'espace intersidéral à 2.7 K !

Hélium liquide et superfluide : 700,000 litres

Azote : 12 Millions de litres pour le refroidissement initial

- **L'espace le plus vide du système solaire** : **6500 m³** (Tube à Vide/Isolation) ~ Cathédrale

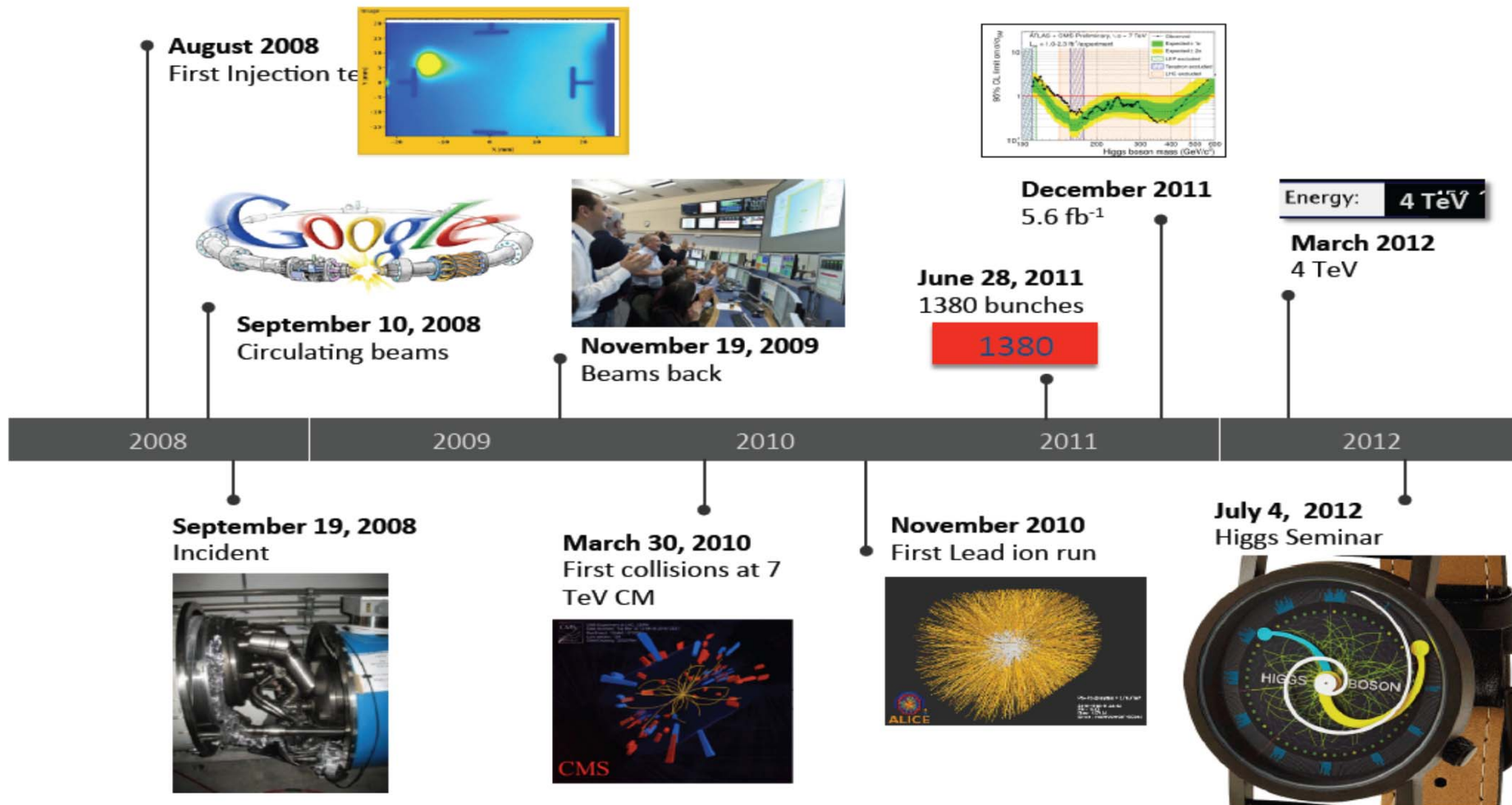
- **Le cout sur 10-15 ans** : **4700 MCHF** pour l'accélérateur et **500 MCH** par expérience

Le LHC en fonctionnement

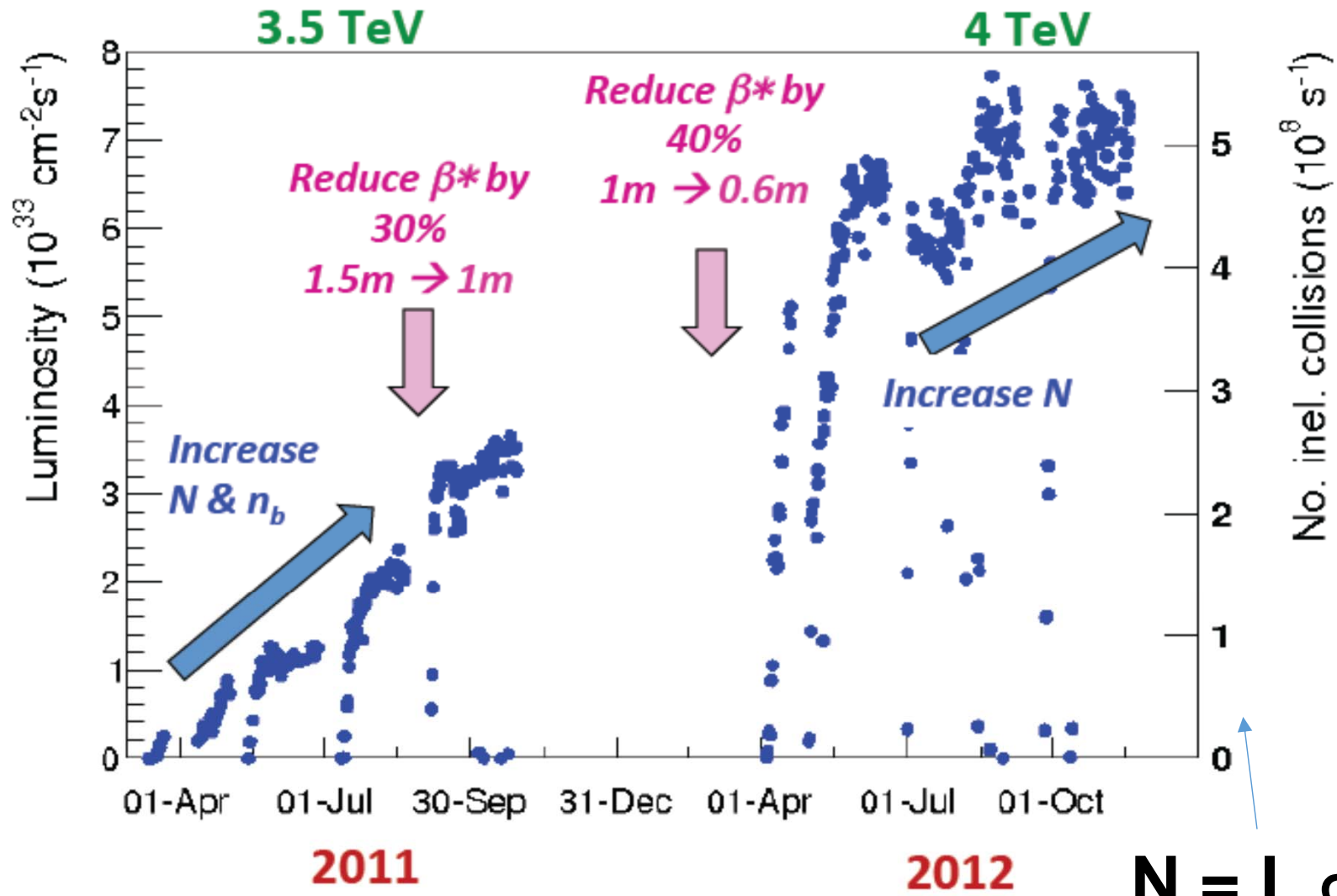
The LHC accelerator

Performance du LHC (2010-2013)

LHC Run I Timeline



Performance du LHC



$$N = L \sigma dt$$

Le LHC en Janvier 2015

Première phase données LHC arrêtée en Janvier 2013 :

- Maintenance cryogénique
- Mais surtout consolidation de toutes les soudures dipôles (incident 2008)
+ protection supplémentaires pour montée en Energie en 2015 (→13 TeV)
- 8 secteurs refroidis, dont deux testés jusqu'à 6.5 TeV (20 quenches et 7 quenches)

Premières collisions prévues Mai 2015

Fonctionnement 2015-2019, nouvel arrêt avant augmentation de la luminosité par un facteur 10 (>2023)

Et déjà réflexion sur le prochain accélérateur au CERN : collisionneur de 80-100km : 100 TeV en pp, 350 GeV en e+e-

Mais aussi collisionneur linéaire au Japon : 2 x 15 km , e+e-, 500 GeV

Injection dans le LHC

LHC Filling from the LHC Injector Chain

