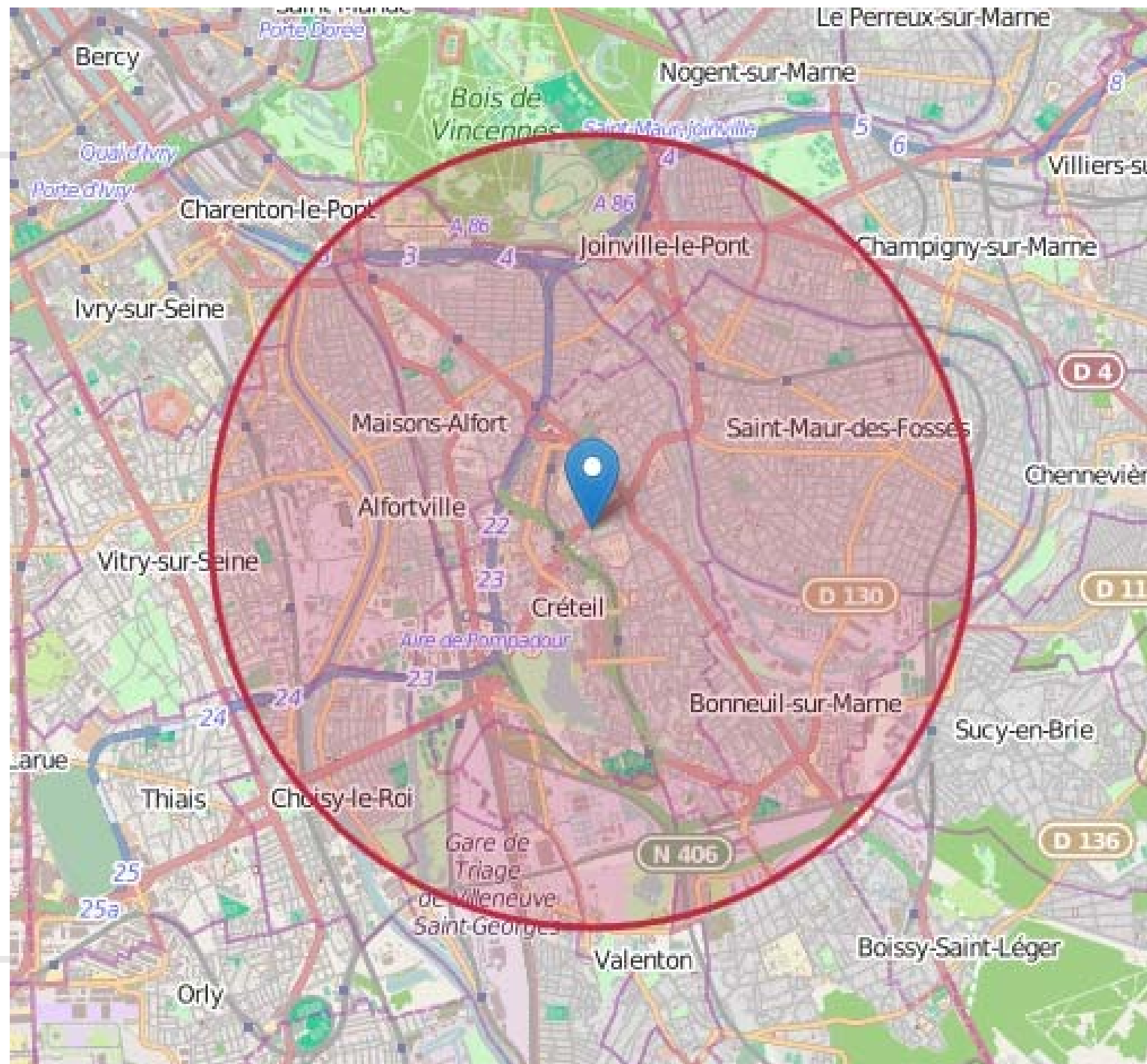


# The Large Hadron Collider : LHC





# Sommaire

- 1- Histoire du projet  
Pourquoi un [Collisionneur de protons](#) ?
- 2- Éléments clefs du LHC
- 3- Fonctionnement du LHC (2010-2017)



# Le LHC: un quart de siècle de travail

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

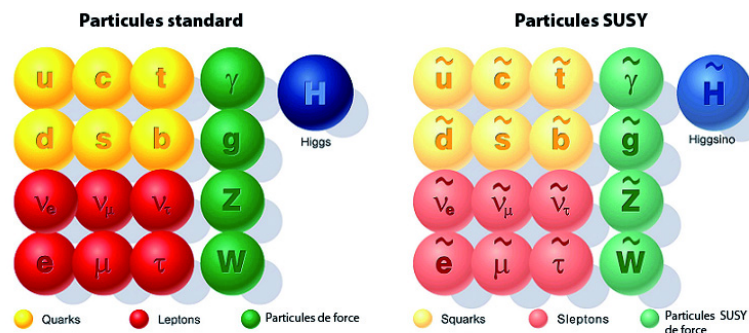
**Raison première du LHC :**

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)

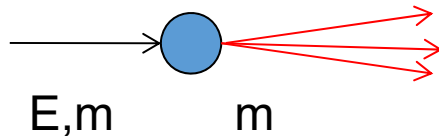


# Pourquoi un collisionneur ?

---

→ Seule solution pour des collisions à haute énergie

## Cible fixe

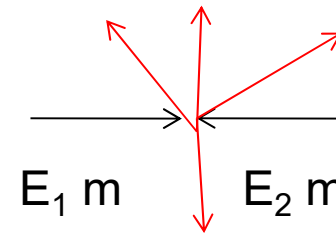


$$\sqrt{s} = [2(mE+m^2)]^{1/2}$$

Varie comme  $\sqrt{E}$

Pour avoir 14 TeV dans le centre de masse :  
E faisceau  $\sim 98$  TeV !

## Collisionneur



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

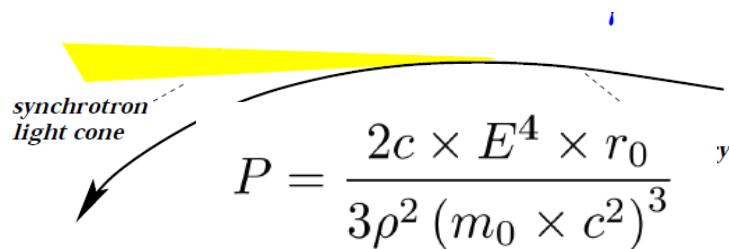
Varie comme E

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)



The diagram shows a particle's path in a circular accelerator. A yellow shaded area represents the synchrotron light cone, which is a narrow cone of light emitted by the particle as it moves. The formula for the power loss  $P$  is given as:

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

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<sup>ème</sup> 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 dans l'état initial 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 :  $\sim$  qqs.  $10^8$  Joule (x 1200 paquets)

comme un camion de 100 T à 120 km/h ou  $\sim$ 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  $\mu$ 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

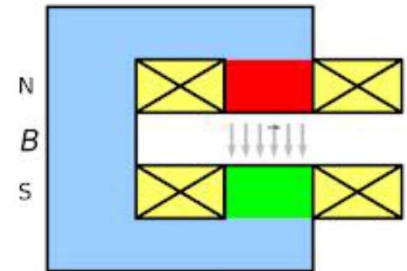


# Éléments clefs du LHC : dipôles

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

Pour guider les particules sur leur trajectoire

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



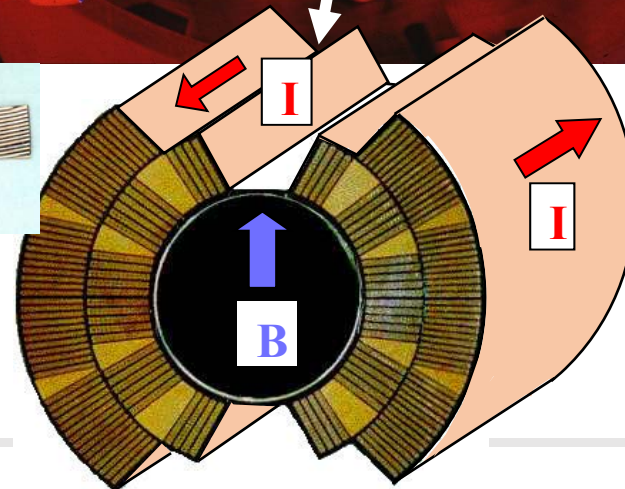
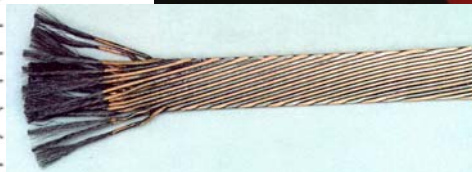
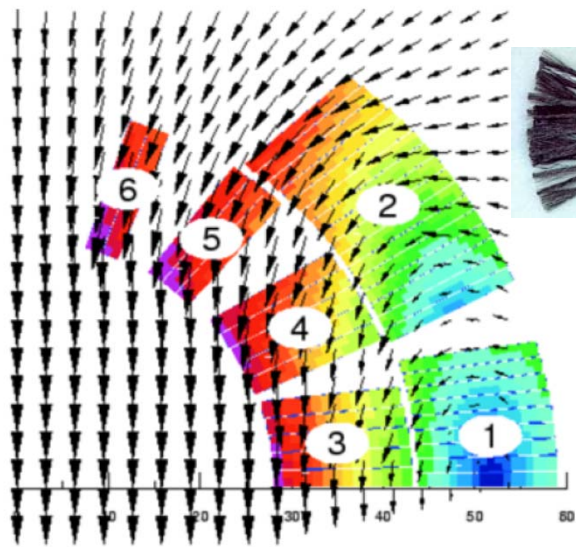
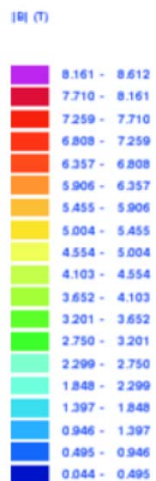
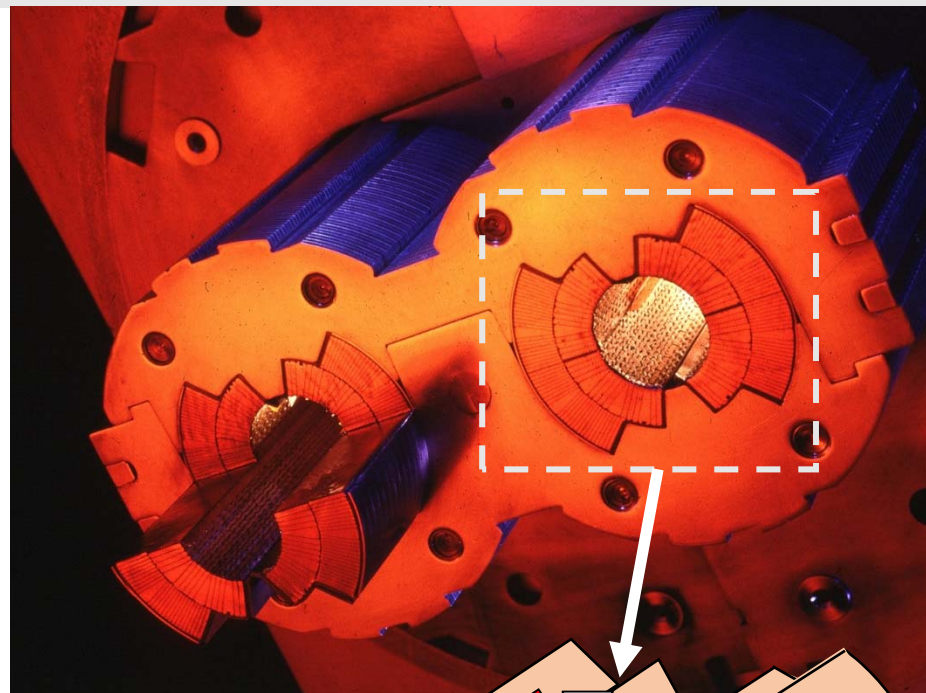
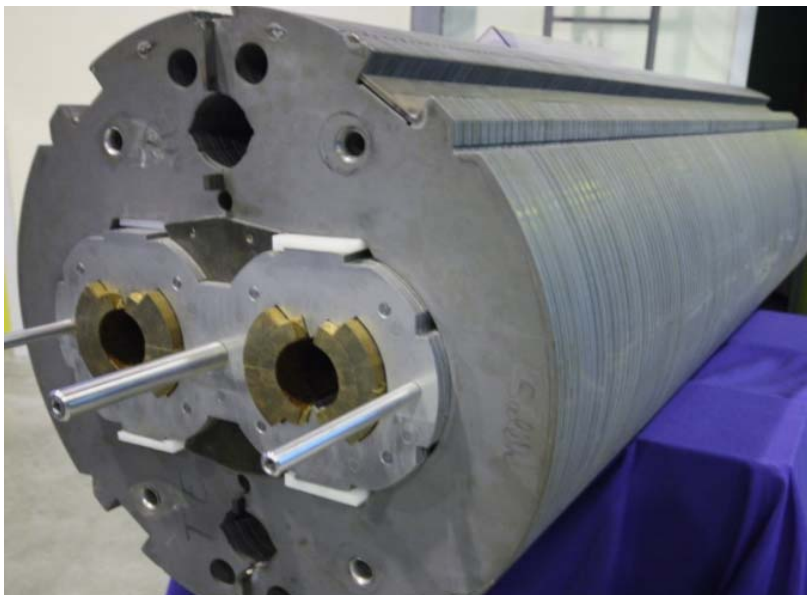
$$\frac{1}{\rho[m]} \approx 0.3 \frac{B[T]}{p[GeV/c]} \xrightarrow{\text{LHC 7 TeV, 8.3 T}} \frac{1}{2,8 \text{ km}} = 0.3 \frac{8.3}{7000}$$

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)

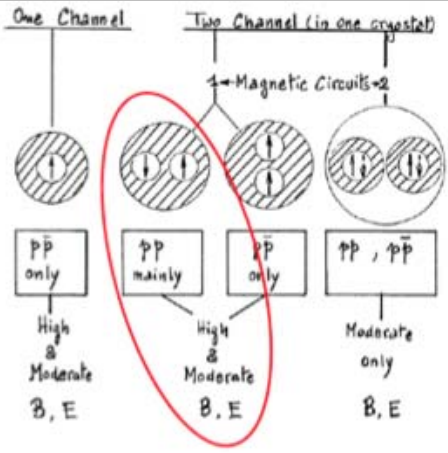
Proton dans chaque faisceau en sens inverse → besoin de deux champs opposés !

# Éléments clefs du LHC : dipôles (1)



1200 t/7600 km câbles supra (Nb/Ti)

ECFA-CERN workshop



June 1994  
first full scale prototype dipole



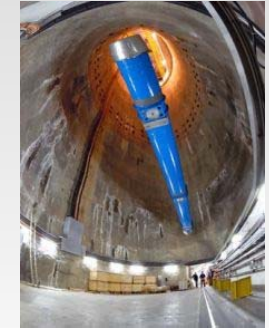
1994 project approved by council (1-in-2)

SSC cancelled

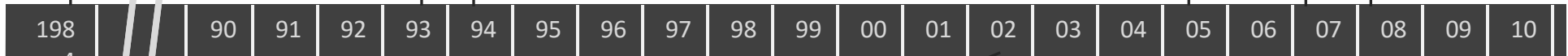
June 2007 First sector cold



April 2008  
Last dipole down



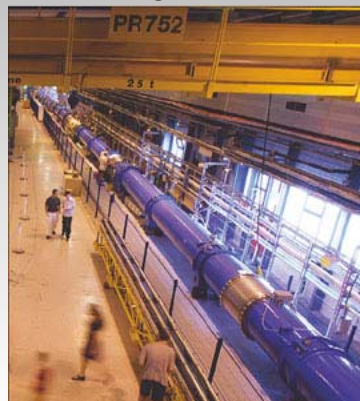
Main contracts signed



First set of twin 1 m prototypes  
Over 9 T



2002 String 2

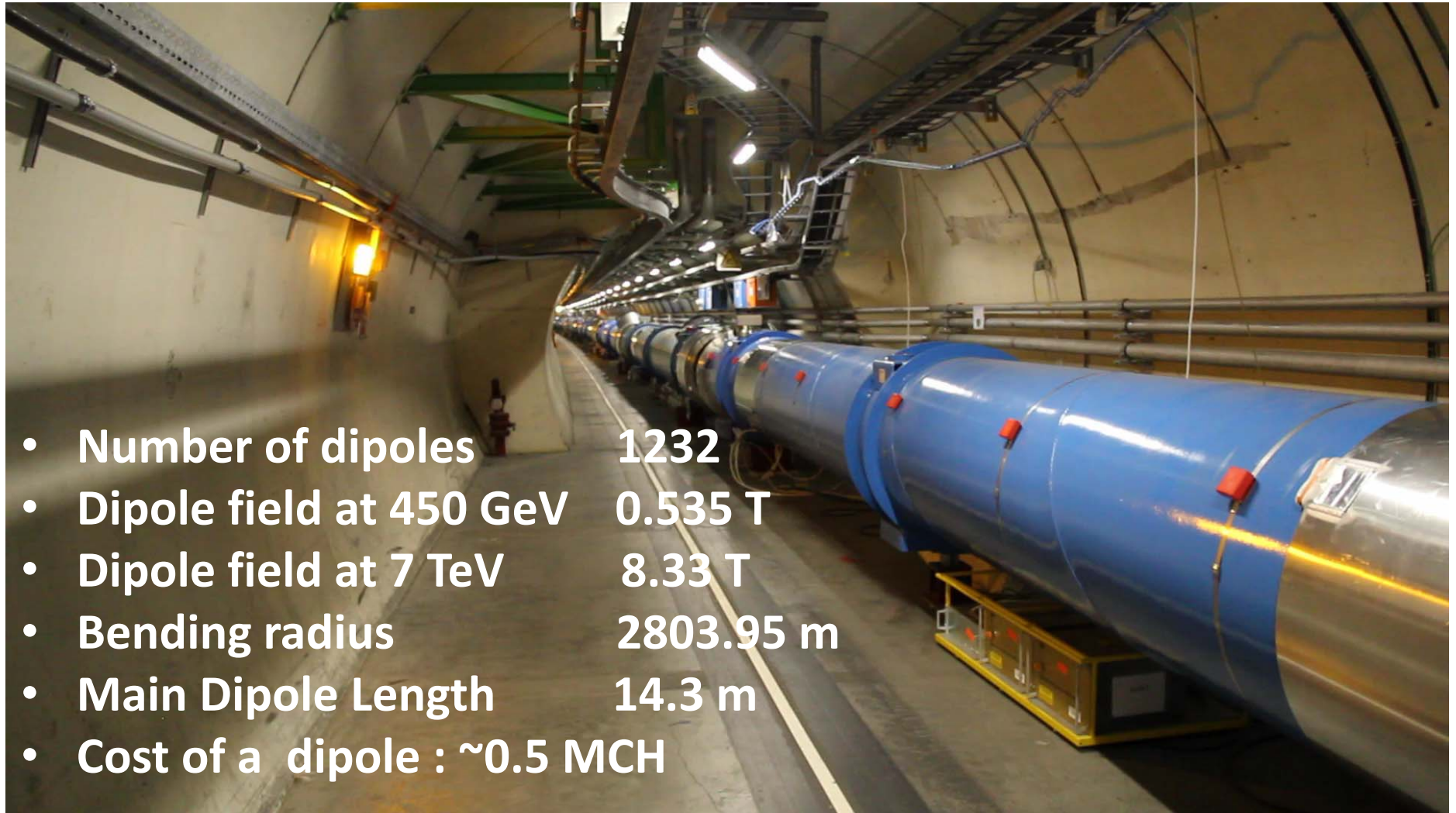


November 2006  
1232 delivered



September 19, 2008

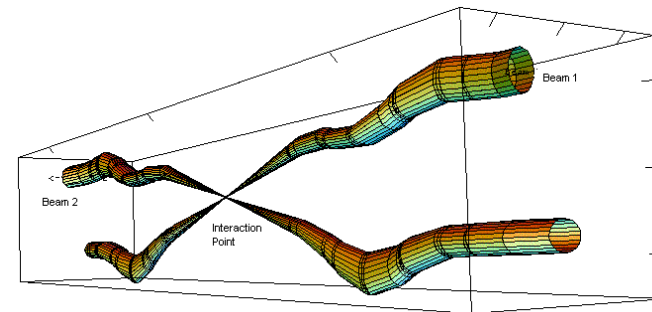
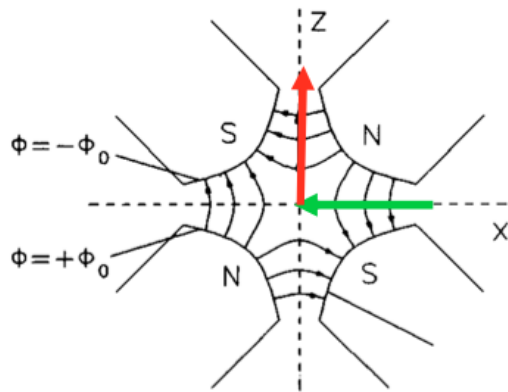
# Eléments clefs du LHC : dipôles (2)



- 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

# Eléments clés 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)

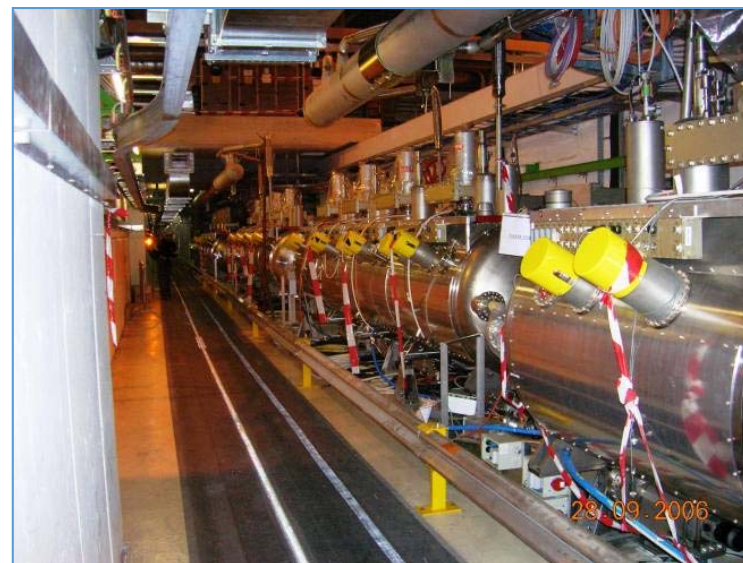
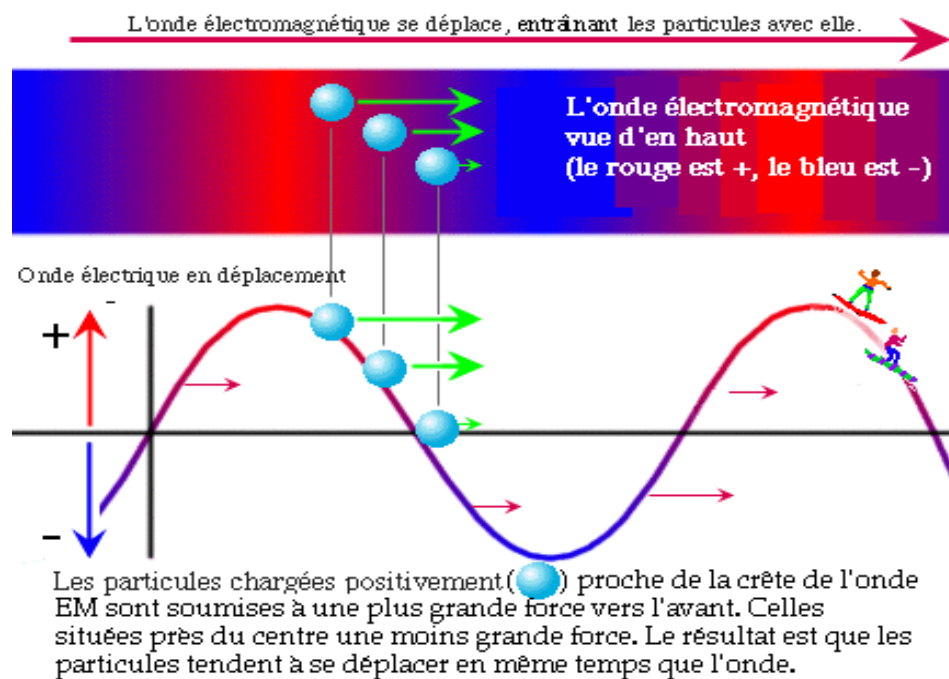


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision



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)

# Éléments clés du LHC : cryogénie





# Le LHC en fonctionnement

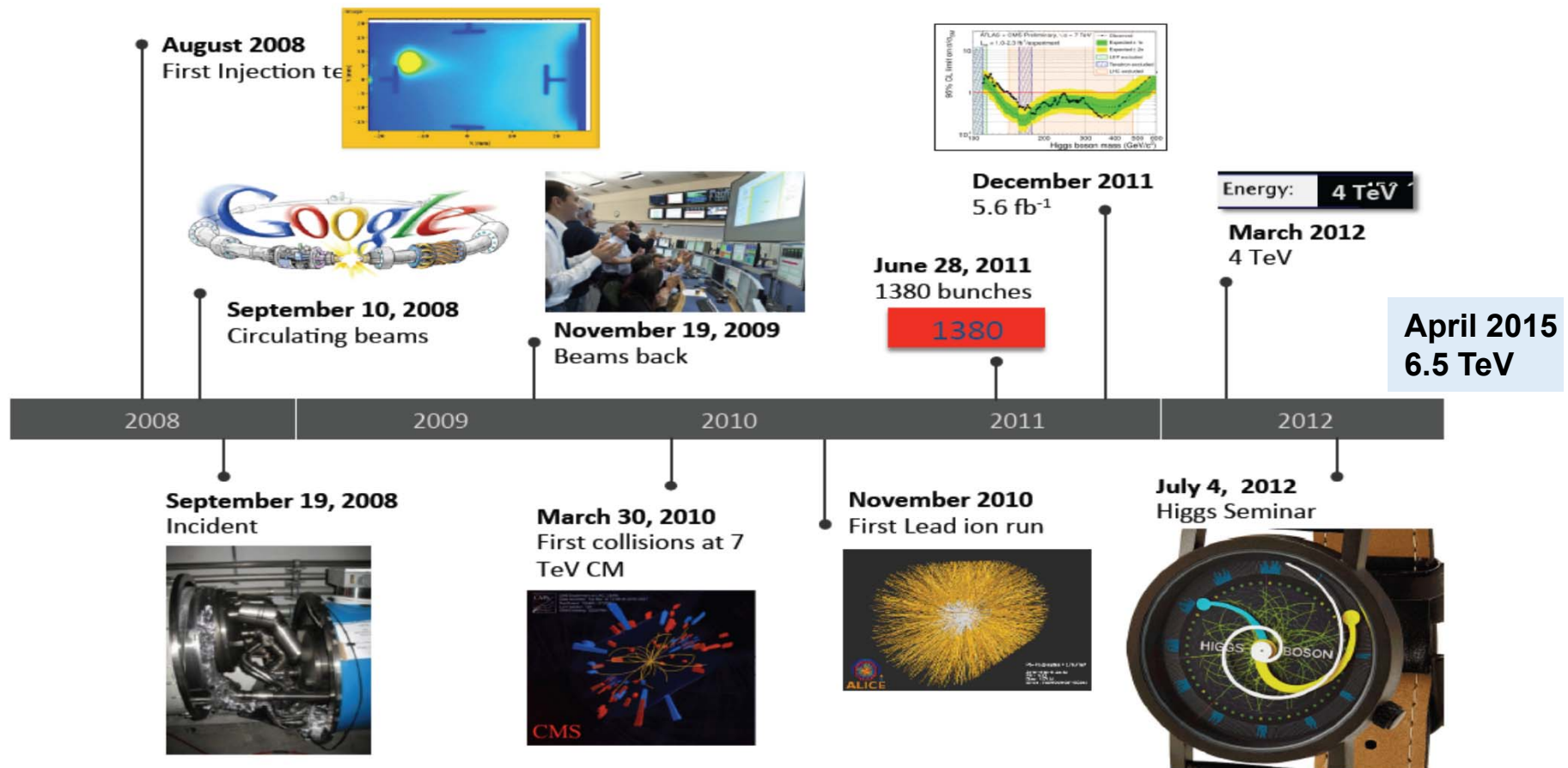
---

**The LHC accelerator**

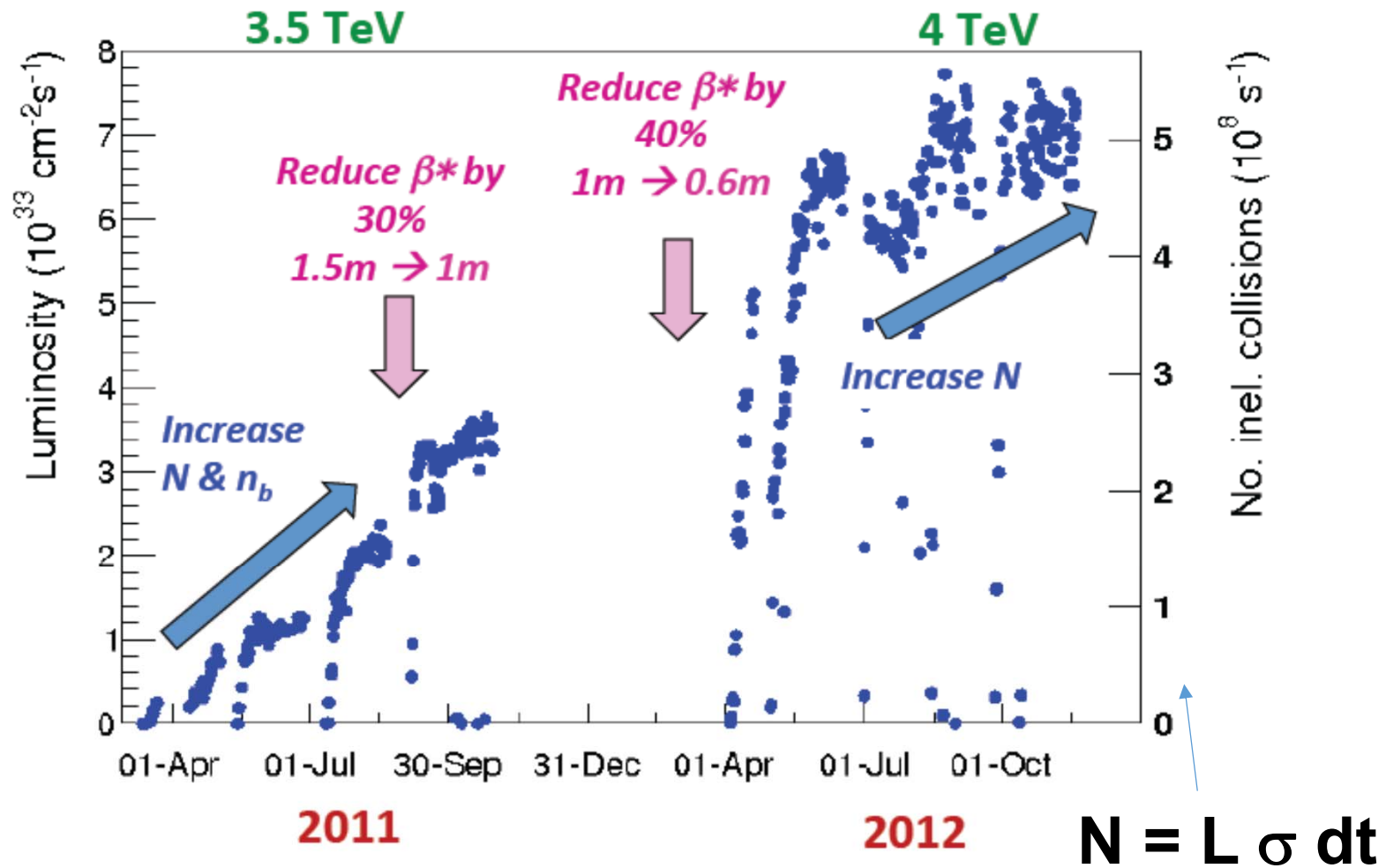
---

# Performance du LHC (2010-2015)

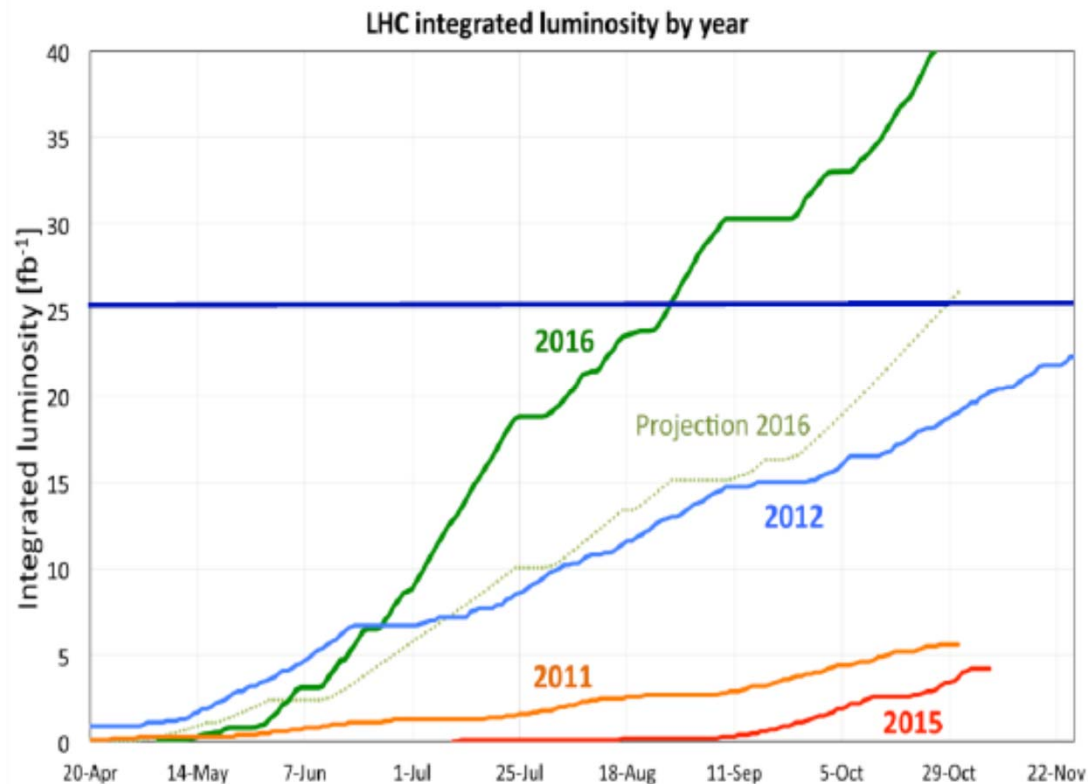
## LHC Run I Timeline



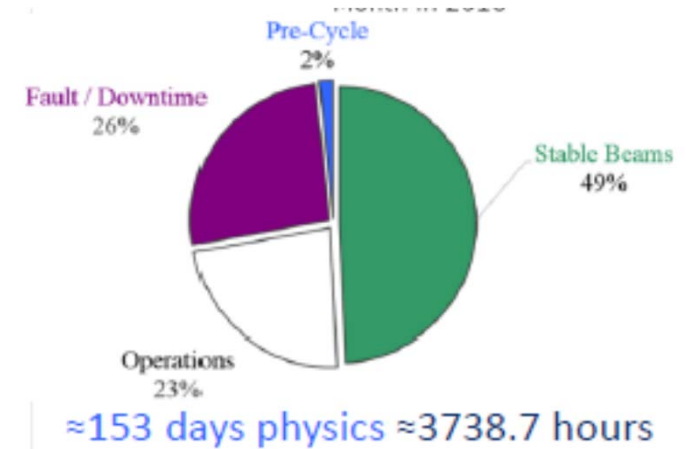
# Performance du LHC



# Performance du LHC



**2011+2012 : 25 fb<sup>-1</sup>**  
~ 10<sup>15</sup> interactions  
**2016 > 40 fb<sup>-1</sup>**



Amélioration continue des performances :

- Plus de protons
- Plus de paquets
- Taille plus petite au point d'interaction...
- « Duty cycle »

$$N = L \sigma$$

# LHC 2017 et après !

2016→2018 : prise de données @ 13 TeV et  $L = 2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (100 fb<sup>-1</sup>)

2019-2020 : amélioration LHC et détecteurs (déclenchement)

2020-2023 : 14 (?) TeV @  $2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (→ 300 fb<sup>-1</sup>)

2023-2025 : modification majeures des détecteurs.  
Certains détecteurs ne fonctionneront plus (radiations)  
ou ont des cellules trop grandes (taux d'occupation)  
Electronique de lecture obsolète

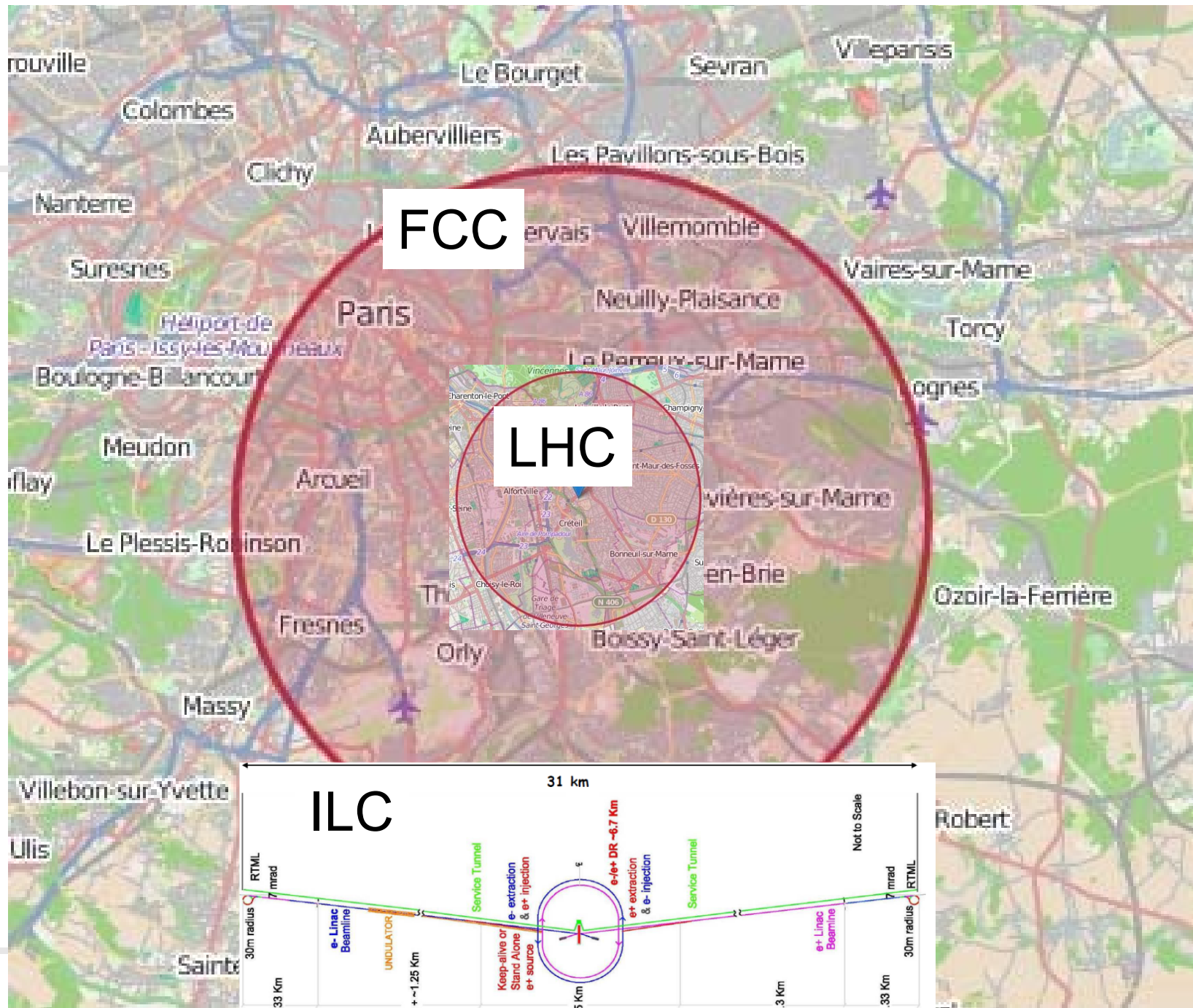
2026-2033 : 14 TeV @  $5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (→ 4000 fb<sup>-1</sup>)

---

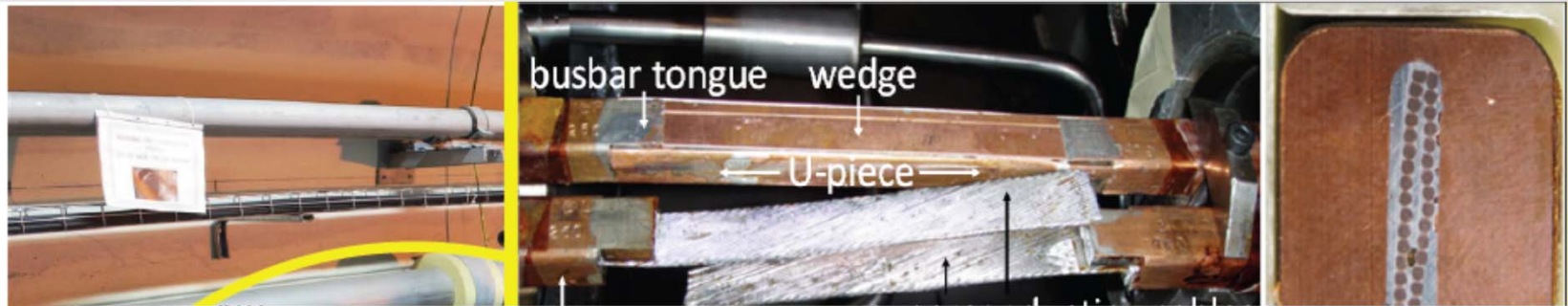
Mais aussi en physique des particules :

- Usine à B (Belle II) au Japon (à partir 2017)
- Un futur collisionneur e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> (Linéaire ILC Japon, circulaire CERN/Chine)
- Une augmentation de l'énergie du LHC : x2 (aimants de 16 T)
- et/ou un futur collisionneur de protons à 100 TeV (100 km)

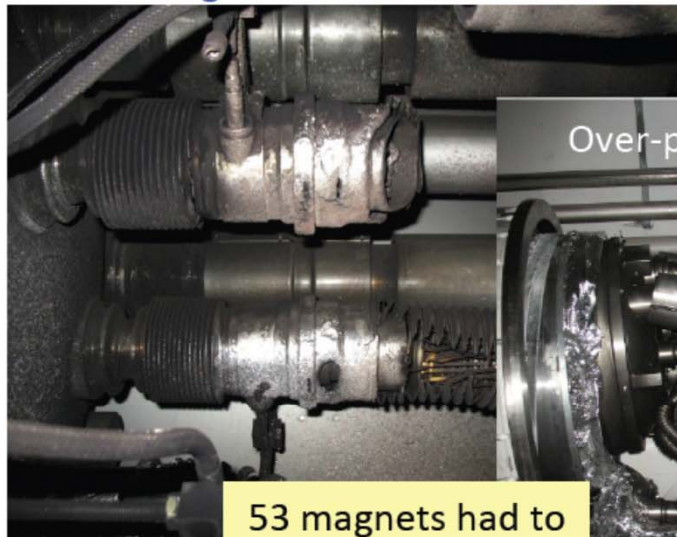
.....



# Interlude: Incident 2008



Arcing in the interconnection



53 magnets had to be repaired



Magnet displacement

Résistance de qqs centaines de  $n\Omega$  dans les soudures suffisante ( $RI^2$  avec 8000A)



- **Le machine la plus grande au monde 26659 m** et le circuit le plus rapide de la planète : **99.9999991%** 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 m<sup>3</sup>** (Tube à Vide/Isolation) ~ Cathédrale

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



# Injection dans le LHC

## LHC Filling from the LHC Injector Chain

