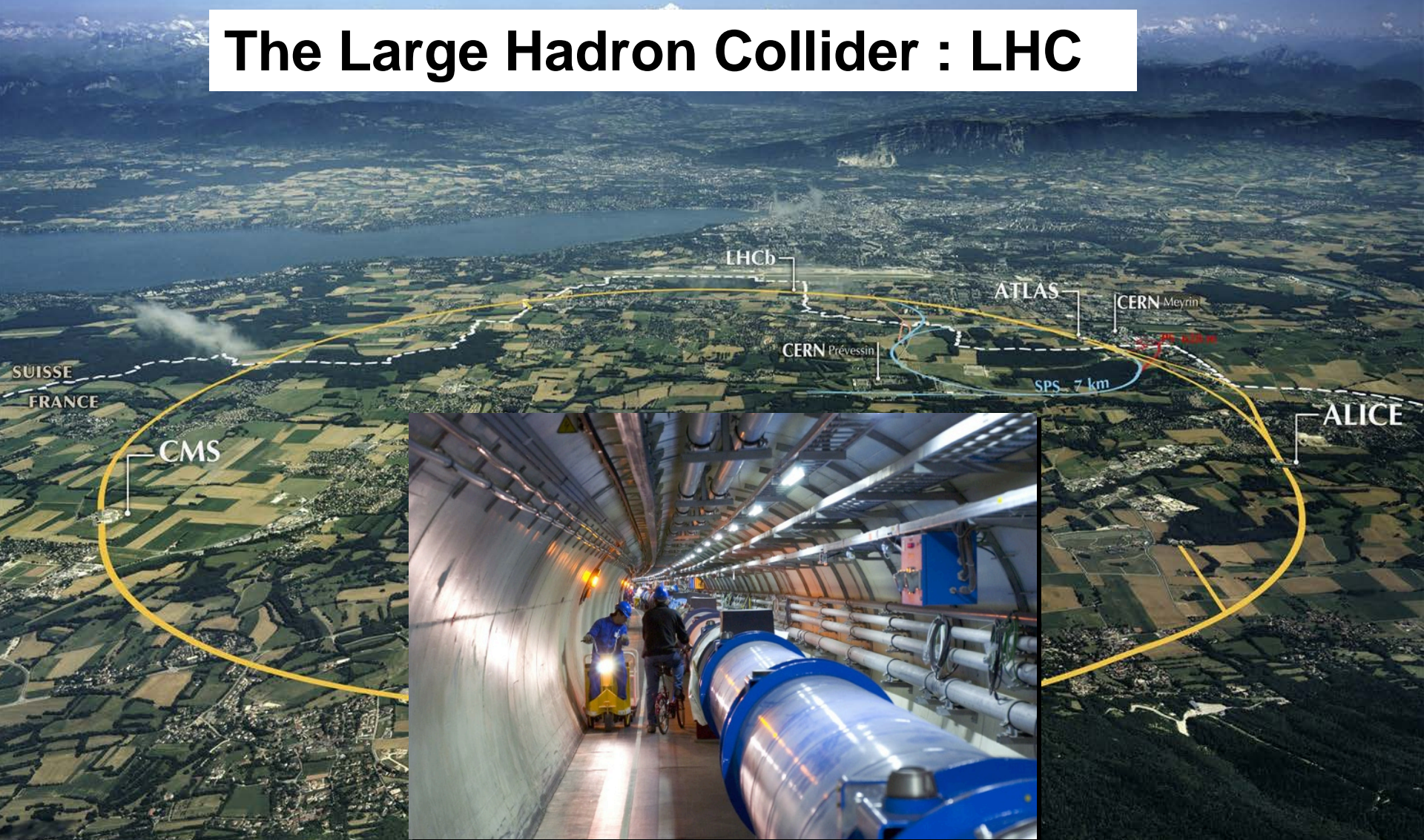
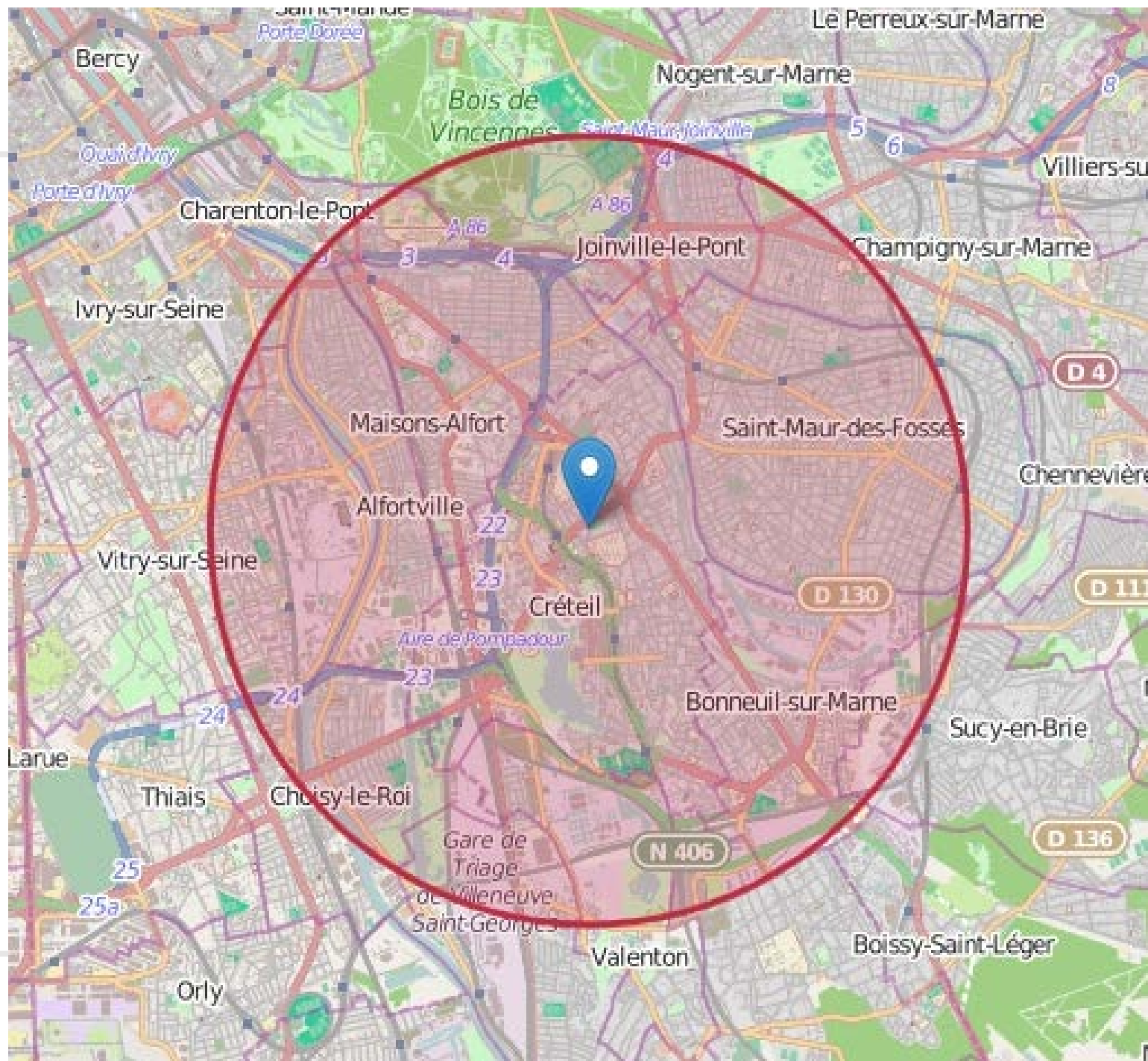


The Large Hadron Collider : LHC



L. Serin LAL /Orsay
N. Arnaud p/o

serin@lal.in2p3.fr 16/01/18



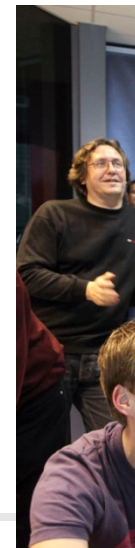
Sommaire

- 1- Histoire du projet
Pourquoi un **Collisionneur** de **protons** ?
- 2- Eléments clefs du LHC
- 3- Fonctionnement du LHC (2010-2017)



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

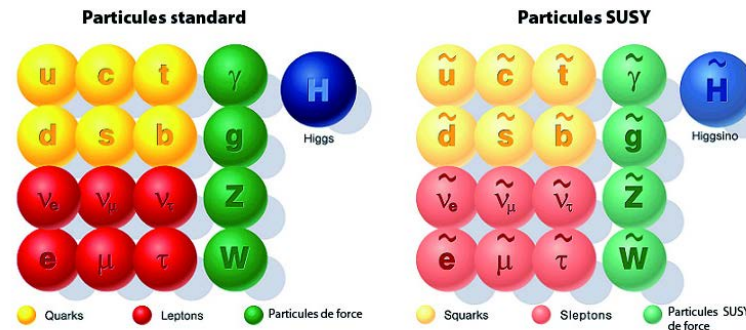
Raison première du LHC :

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** :

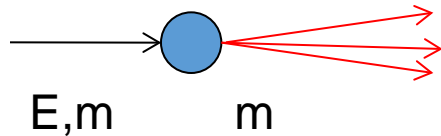
- Recherche de nouvelle physique directe (ATLAS +CMS) ou indirecte (LHCb) → **matière noire**
- Violation de CP (LHCb) → **asymétrie matière - antimatiere**
- Etude du plasma quark gluon (ALICE)



Pourquoi un collisionneur ?

→ Seule solution pour des collisions à haute énergie

Cible fixe

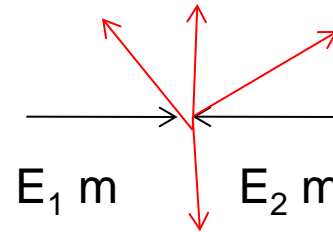


$$\sqrt{s} = [2(mE + m^2)]^{1/2}$$

Varie comme \sqrt{E}

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

Collisionneur



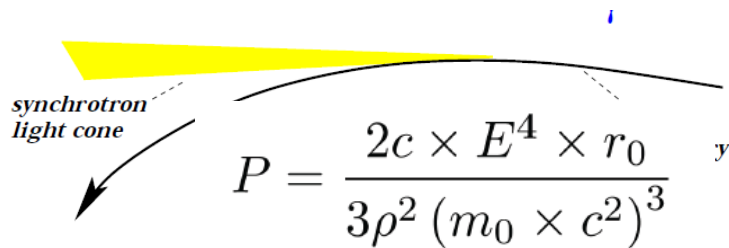
$$\sqrt{s} = (E_1 + E_2) = 2E_{\text{beam}}$$

Varie comme E

E=7 TeV → 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 path (solid line) curving upwards. A dashed line represents the light cone, forming a cone shape. A yellow shaded area above the path represents the synchrotron light cone. An arrow points from the text 'synchrotron light cone' to the dashed line.

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

$$e^- \quad W(\text{MeV}) = 8.85 \times 10^{-5} \times E^4(\text{GeV})/\rho^2(\text{km}) \quad \approx 2 \text{ GeV} \quad (\text{LEP})$$

$$p \quad W(\text{keV}) = 7.8 \times 10^{-3} \times E^4(\text{TeV})/\rho^2(\text{km}) \quad \approx 6 \text{ keV} \quad (\text{LHC})$$

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 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



10 GJ \cong 55 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

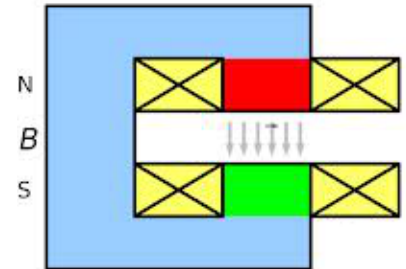


Éléments clefs du LHC : dipôles

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

Pour guider les particules sur leur trajectoire

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



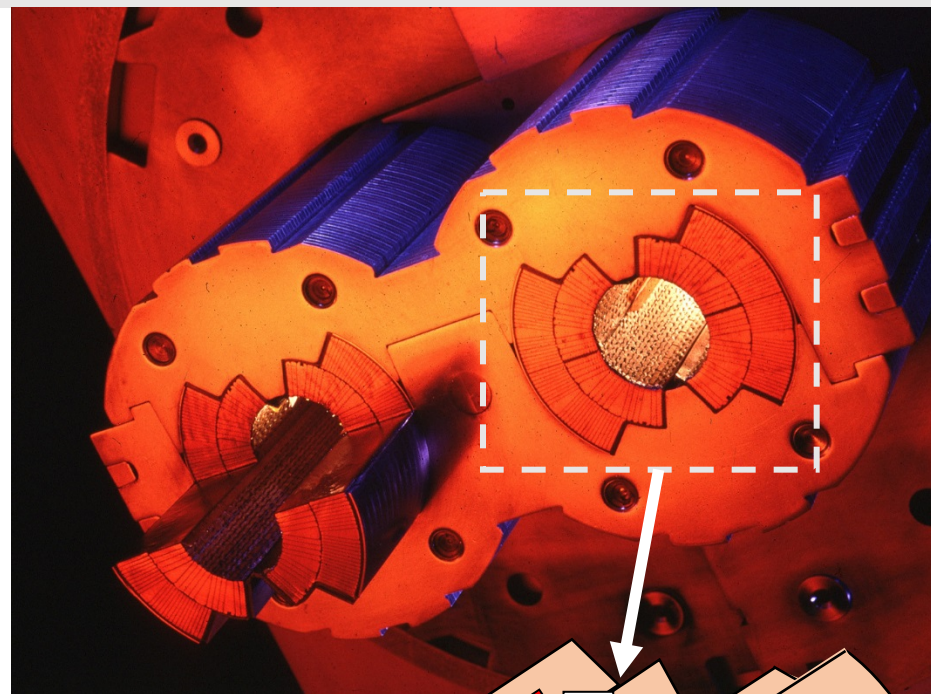
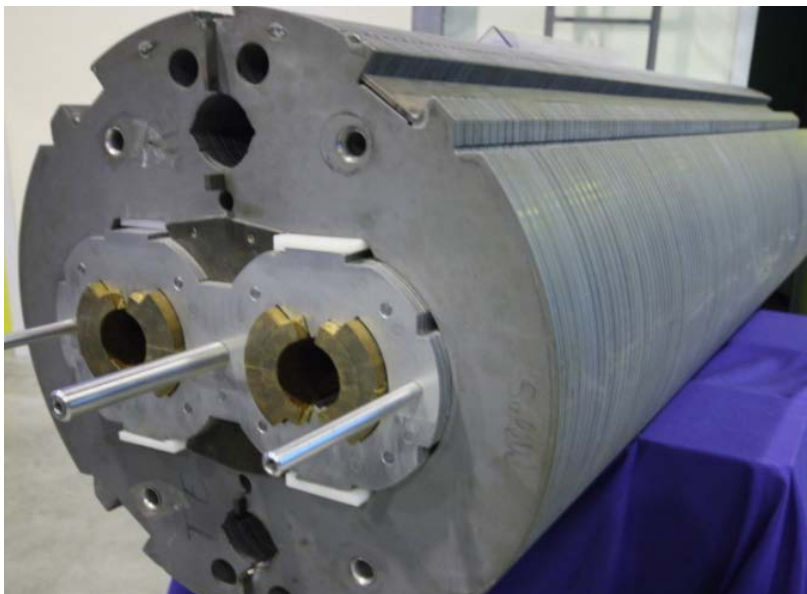
$$\frac{1}{\rho[m]} \approx 0.3 \frac{B[T]}{p[GeV/c]} \xrightarrow{\text{LHC 7 TeV, 8.3 T}} \frac{1}{2,8 \text{ km}} = 0.3 \frac{8.3}{7000}$$

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

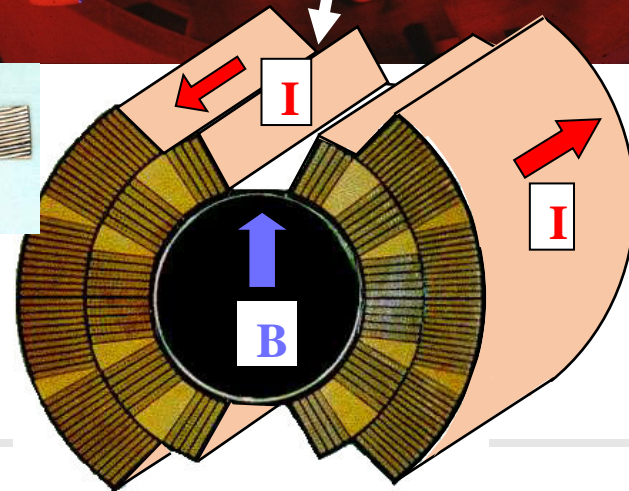
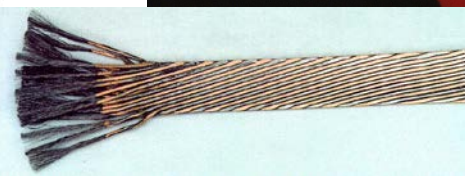
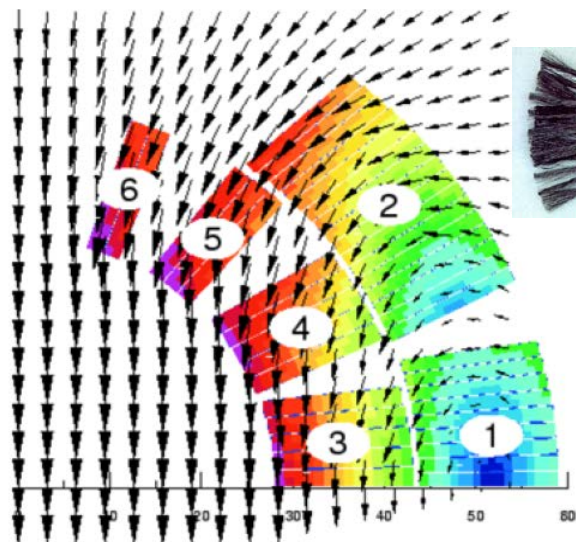
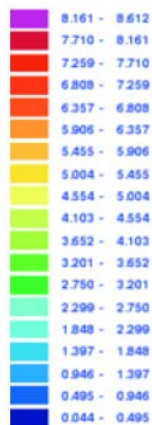
Pour atteindre 8.3 T, nécessité d'utiliser des aimants supraconducteurs cryogénique (He liquide ~1.8 K)

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

Eléments clefs du LHC : dipôles (1)



B (T)

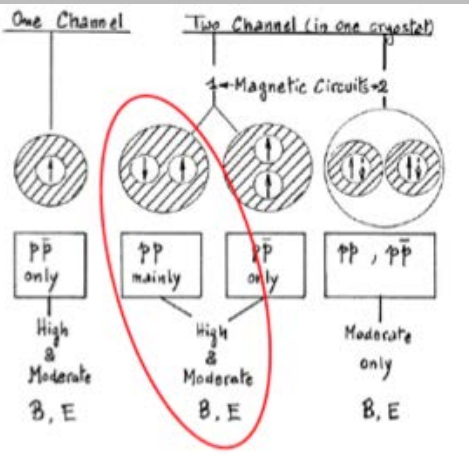


1200 t/7600 km câbles supra (Nb/Ti)

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

198 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10

First set of twin 1 m prototypes
Over 9 T



2002 String 2

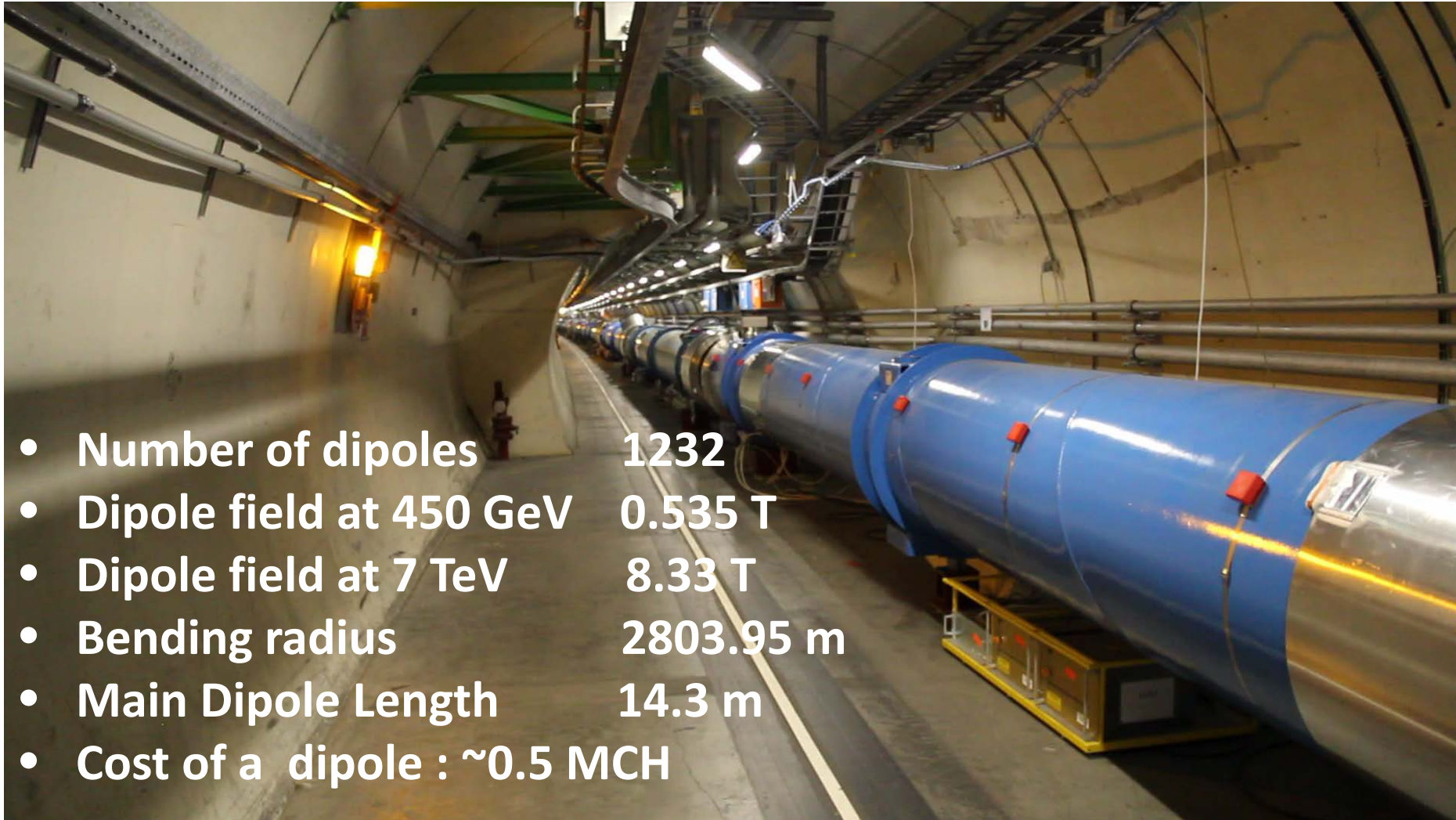


November 2006
1232 delivered



September 19, 2008
12

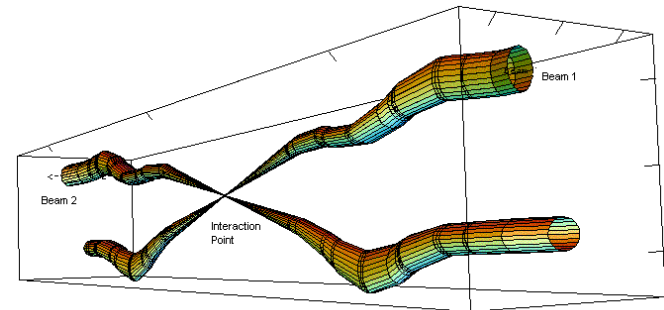
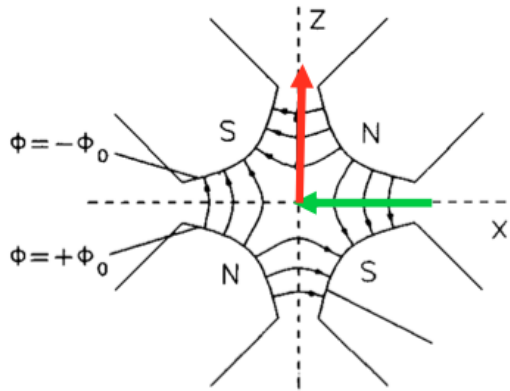
Eléments clefs du LHC : dipôles (2)



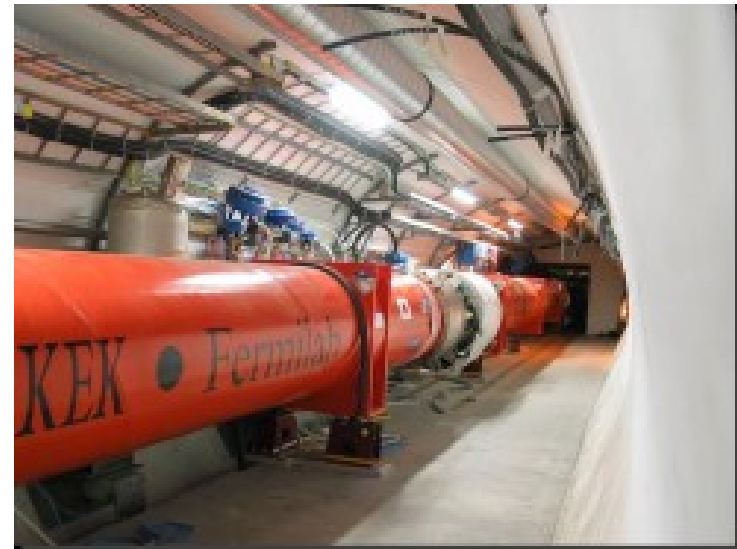
- Number of dipoles 1232
- Dipole field at 450 GeV 0.535 T
- Dipole field at 7 TeV 8.33 T
- Bending radius 2803.95 m
- Main Dipole Length 14.3 m
- Cost of a dipole : ~0.5 MCH

Éléments 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)*

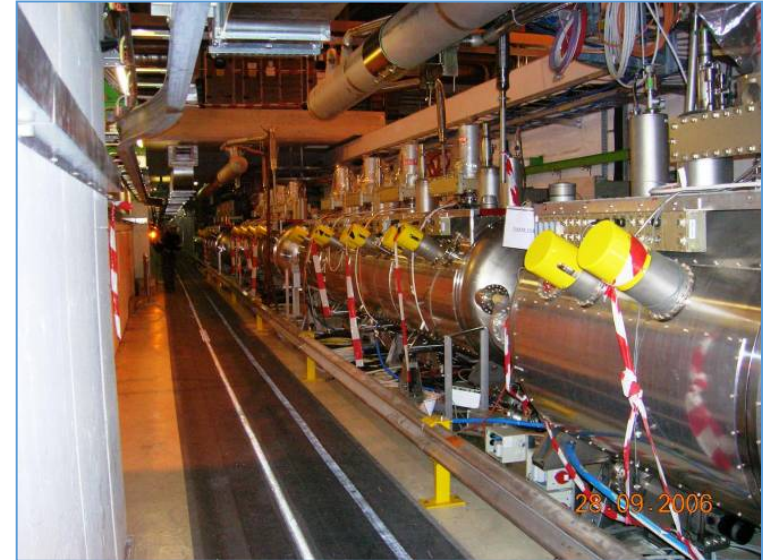
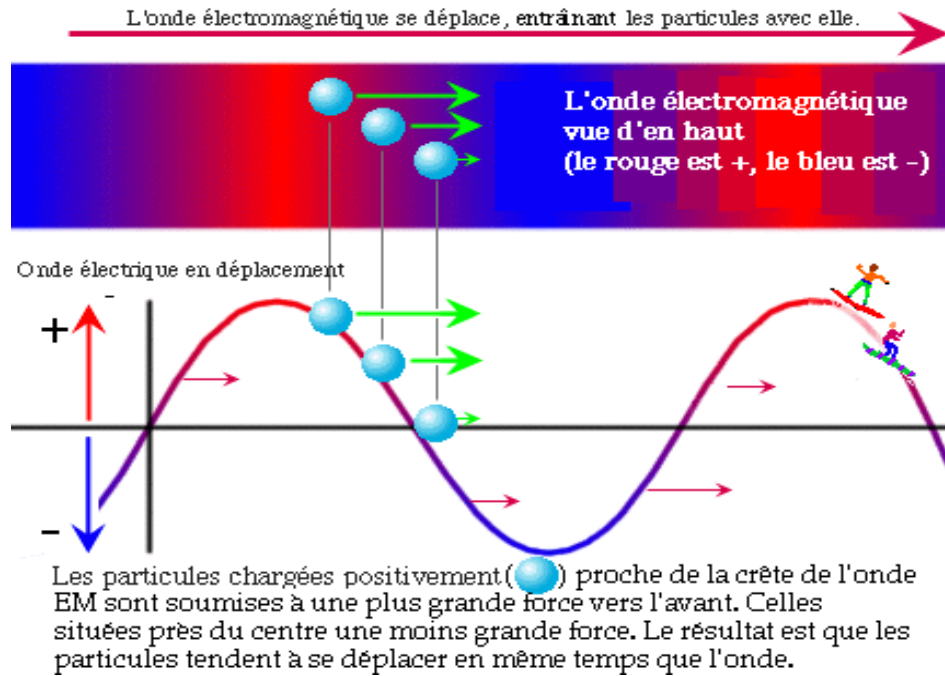


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision



Un total de 9300 aimants !

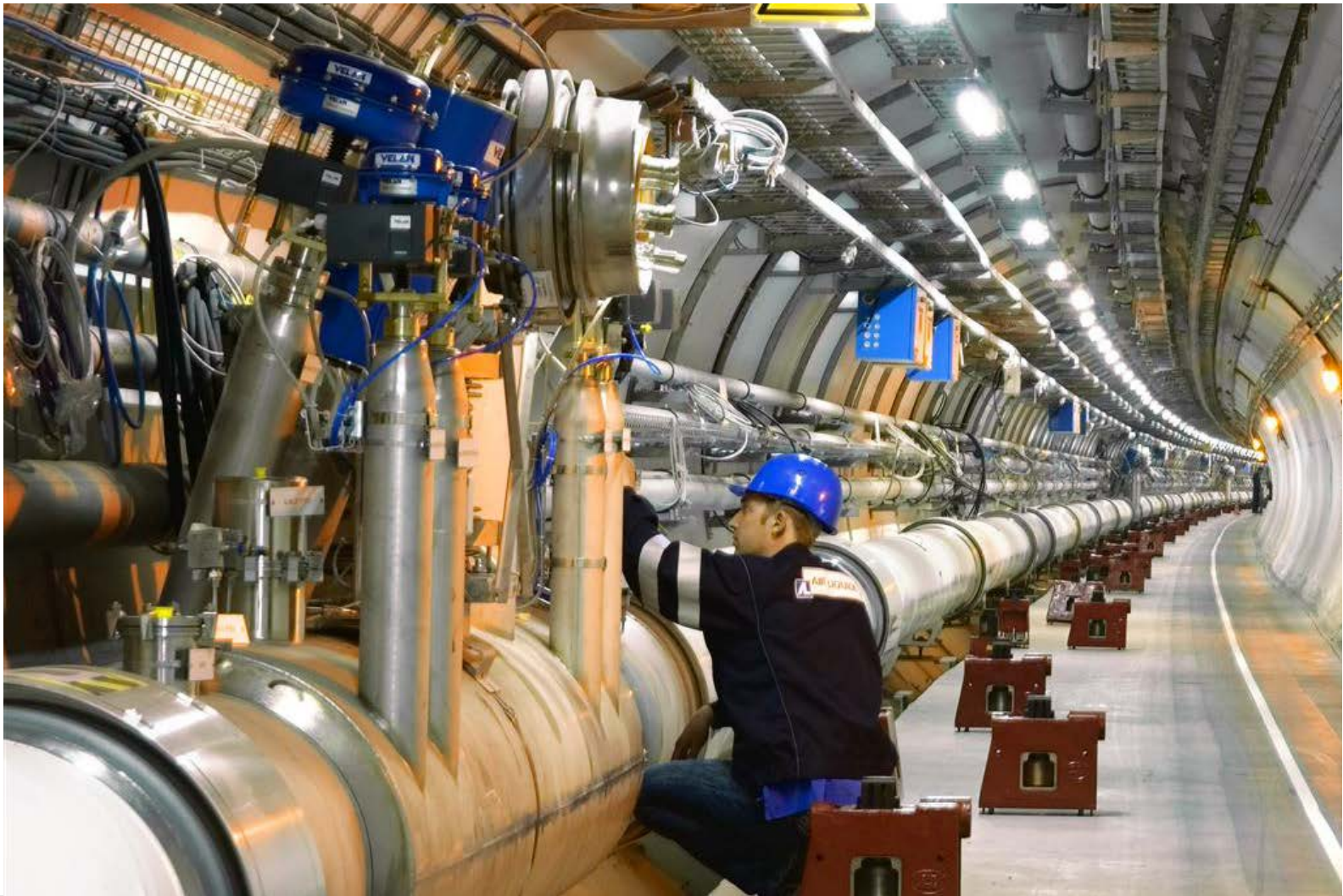
Éléments clefs du LHC : cavité RF



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

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

Eléments clefs du LHC : cryogénie



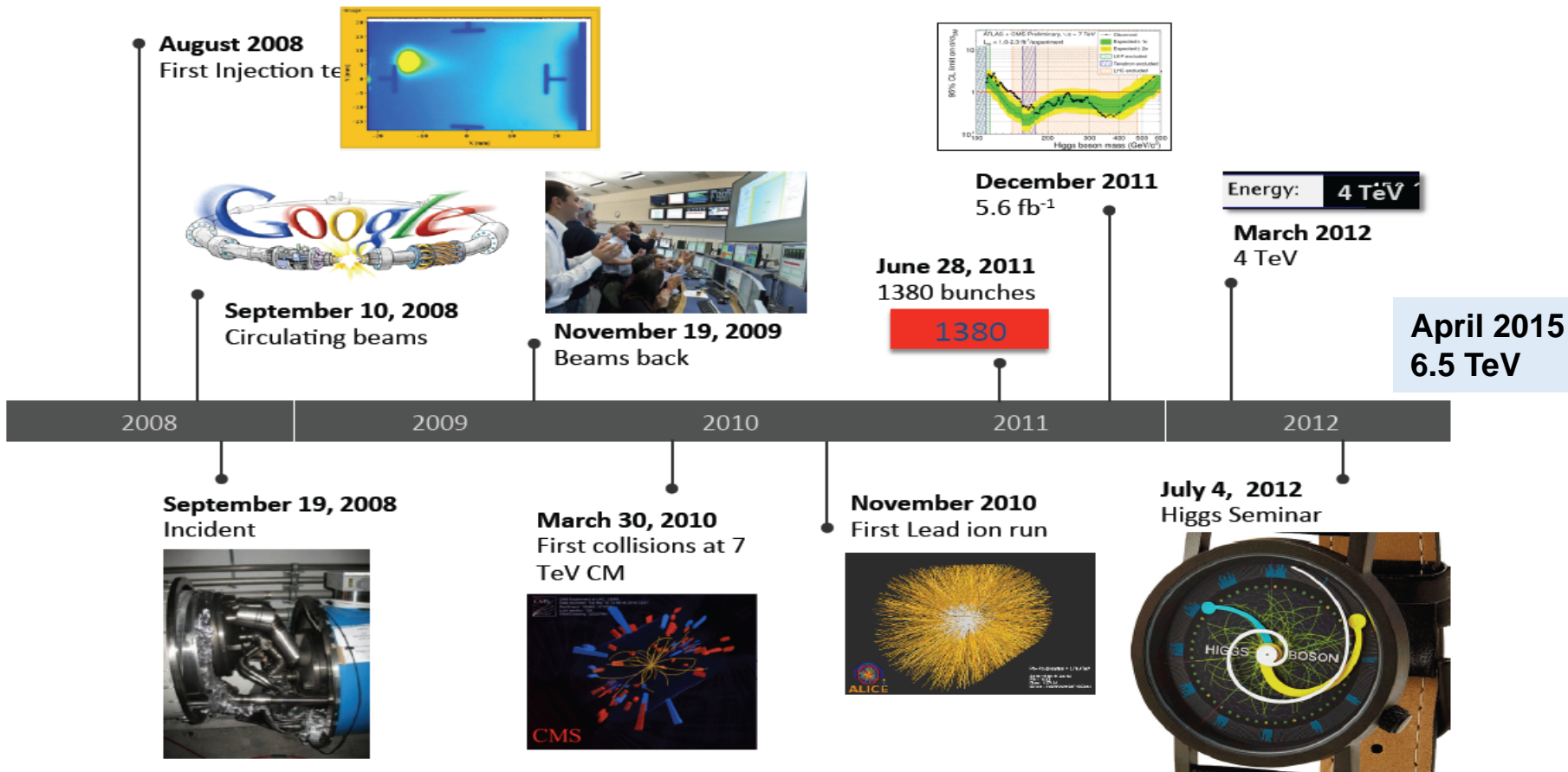
Le LHC en fonctionnement

The LHC accelerator

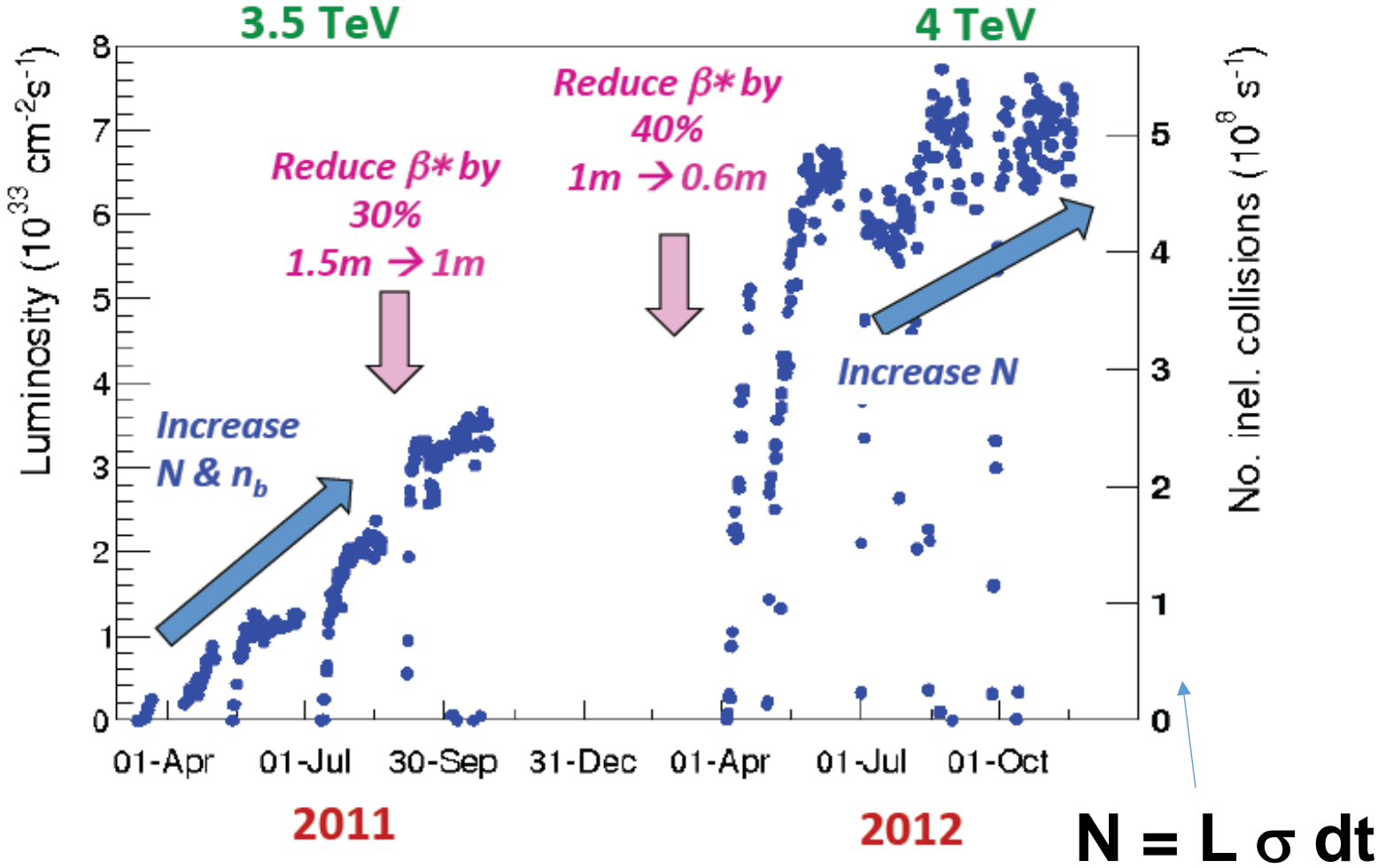


Performance du LHC (2010-2015)

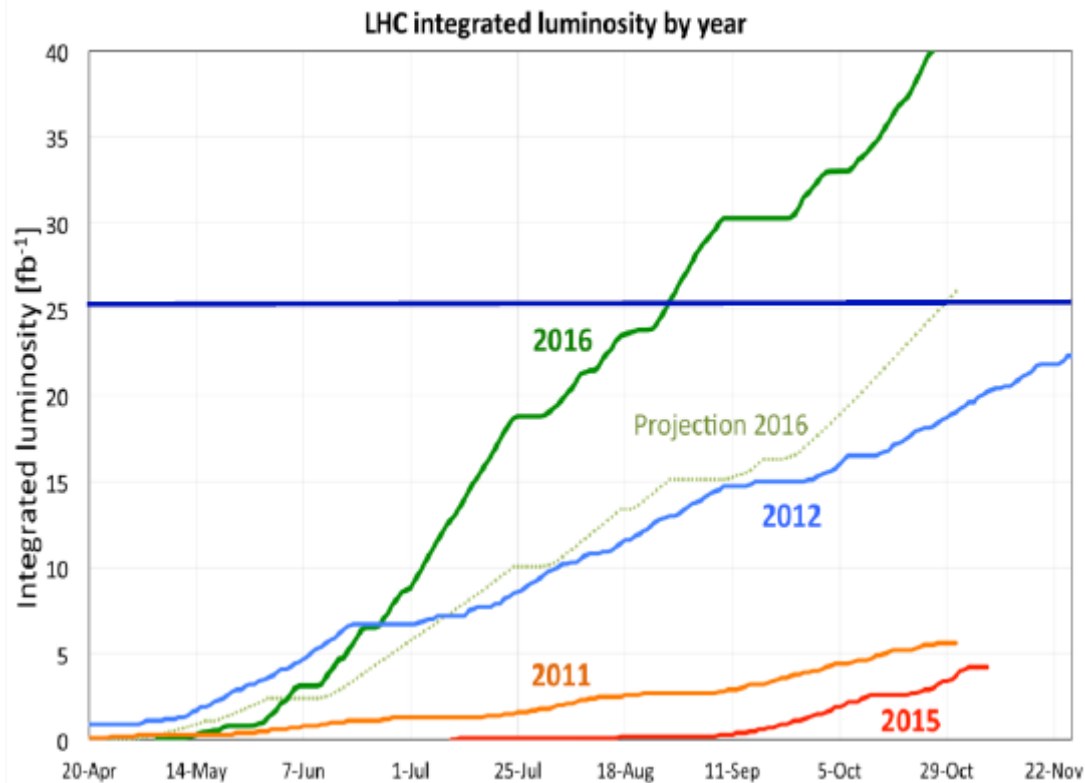
LHC Run I Timeline



Performance du LHC



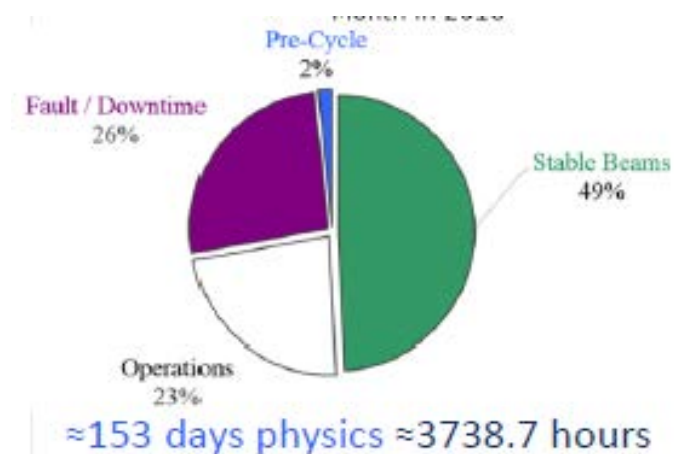
Performance du LHC



2011+2012 : 25 fb⁻¹

$\sim 10^{15}$ interactions

2016 > 40 fb⁻¹



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⁻¹)

2019-2020 : amélioration LHC et détecteurs (déclenchement)

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

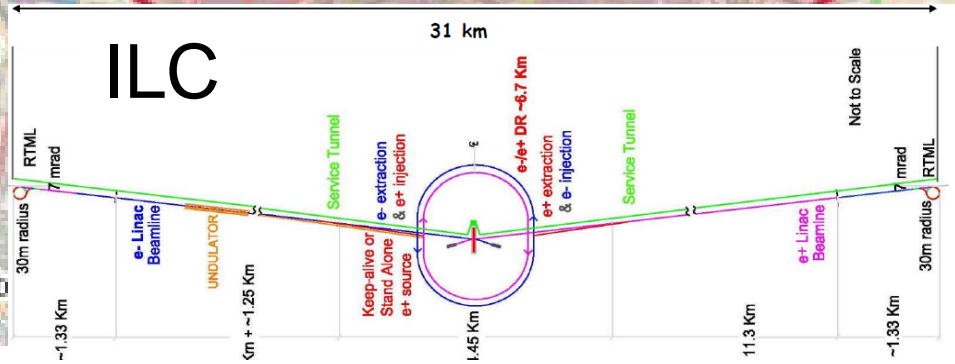
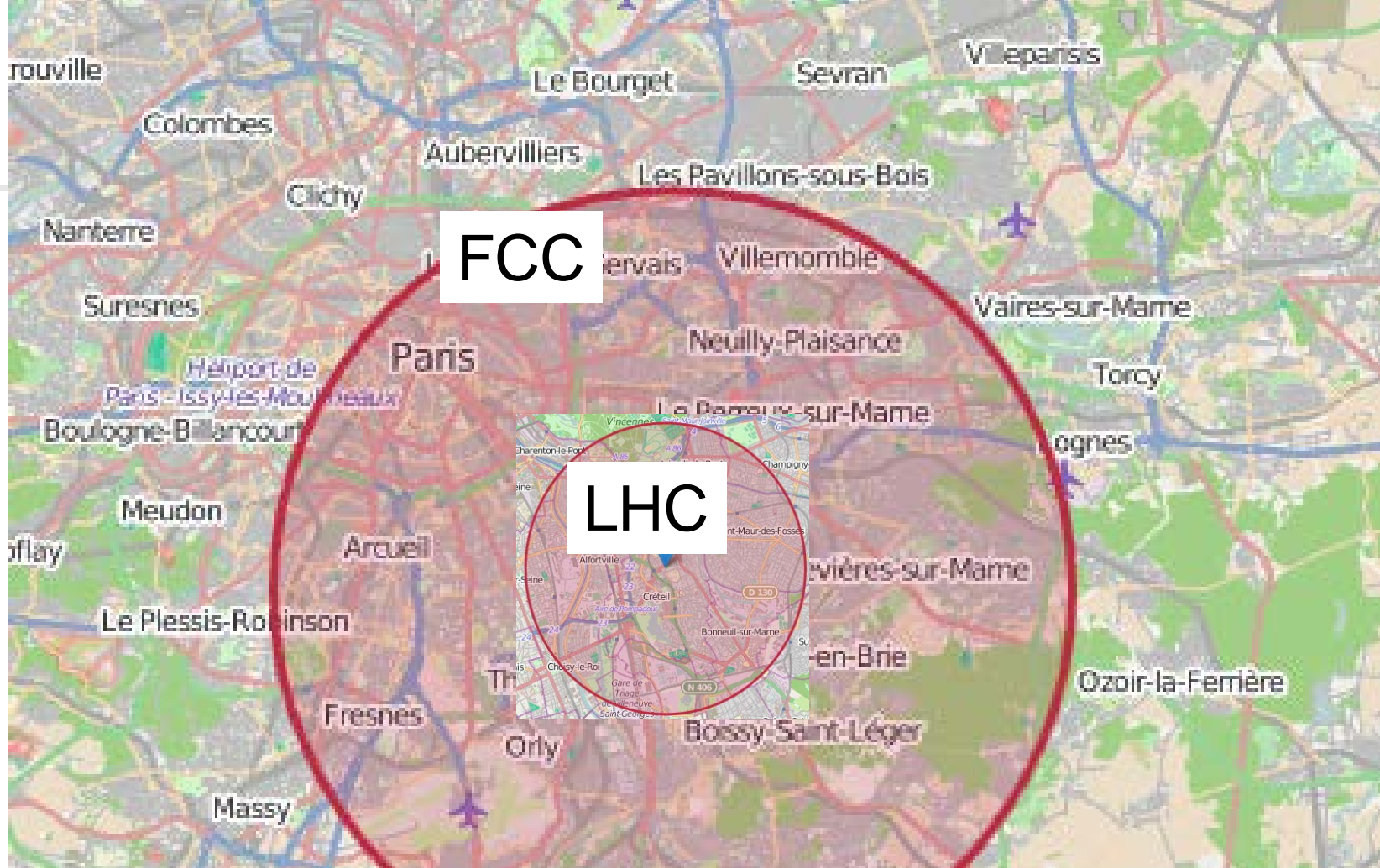
2023-2025 : modification majeures des détecteurs.
Certains détecteurs ne fonctionneront plus (radiations)
ou ont des cellules trop grandes (taux d'occupation)
Electronique de lecture obsolète

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

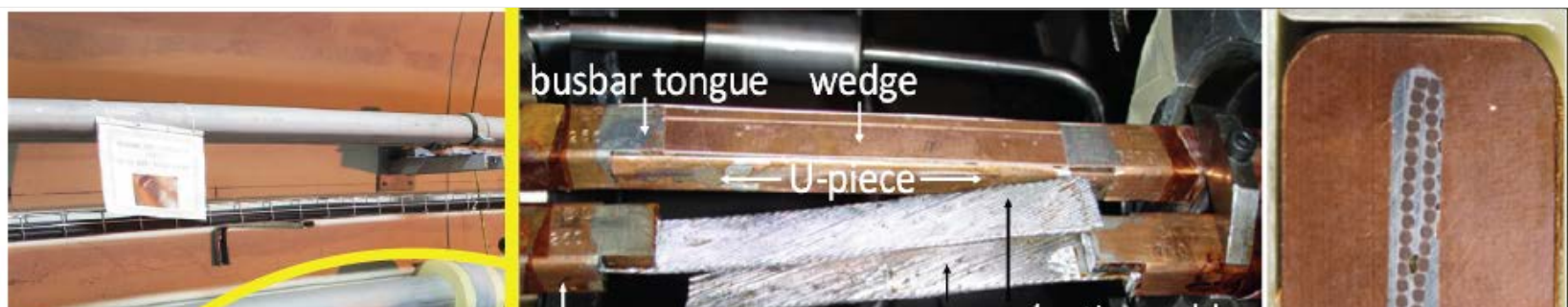
Mais aussi en physique des particules :

- Usine à B (Belle II) au Japon (à partir 2017)
- Un futur collisionneur e+e- (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)

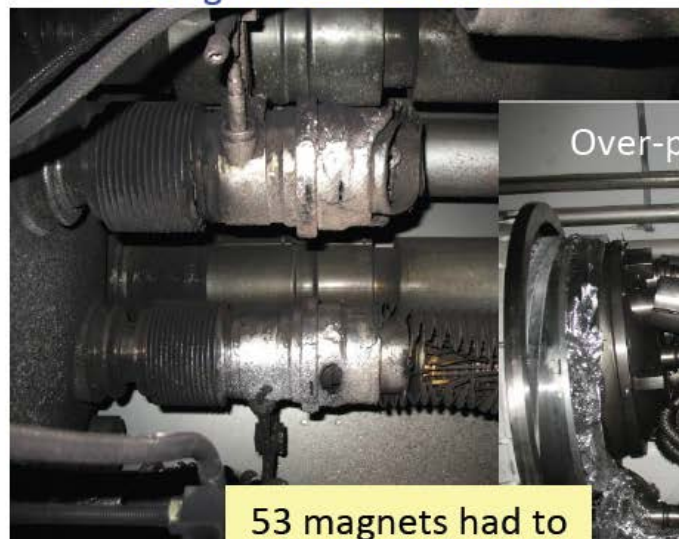
.....



Interlude: Incident 2008



Arcing in the interconnection



53 magnets had to be repaired



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



Le LHC

- **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 m³** (Tube à Vide/Isolation) ~ Cathédrale

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

