

Participation à la construction du LHC

Alex C. Mueller

Retired Directeur de Recherche CNRS

ACM Consult GmbH

caveat emptor

- Task assigned to me by the organisers: Rapide présentation des défis et de la structure du LHC. Historique et durée de la construction et qq problèmes. Contributions de notre région à la construction (IPNO, CEA). Puis présenter en français en restant très simple et pédagogique mais avec des transparents en anglais!
- Thus I should report on the accelerator layout and the technical challenges of the LHC, further on the actual construction with the focus of the CERN-CEA-CNRS collaboration, the whole easy to understand and pedagogically presented in french language while slides to be in english!
- **A real challenge!**
- The 13 minutes constraint means that the material is highly selected and many relevant things will be skipped. I am the only responsible for the selected material and the associated shortcomings. I have used [only] material from my personal copies of slides shown within the CERN-CEA-CNRS collaboration, that material is in french only. Where feasible I translated, but some transparencies use french by necessity.
- My presentation covers the time until September 2007 when the collaboration agreement CERN-France for the LHC construction was finished!
- Note that an additional exceptional contribution from CEA and CNRS to CERN was consecutively solicited by CERN and agreed upon. Starting in July 2009 it was also very successful and addressed a number of items making life easier for LHC operation.

Rational for the building the LHC

$$\text{Energy of a synchrotron: } W [\text{MeV}] = 300 Q B_m \rho [\text{Tm}]$$

Q : charge (in units), important factor for heavy ions, else = 1

ρ : radius of the accelerator, $\rho = 2804$ m pour le tunnel LEP/LHC

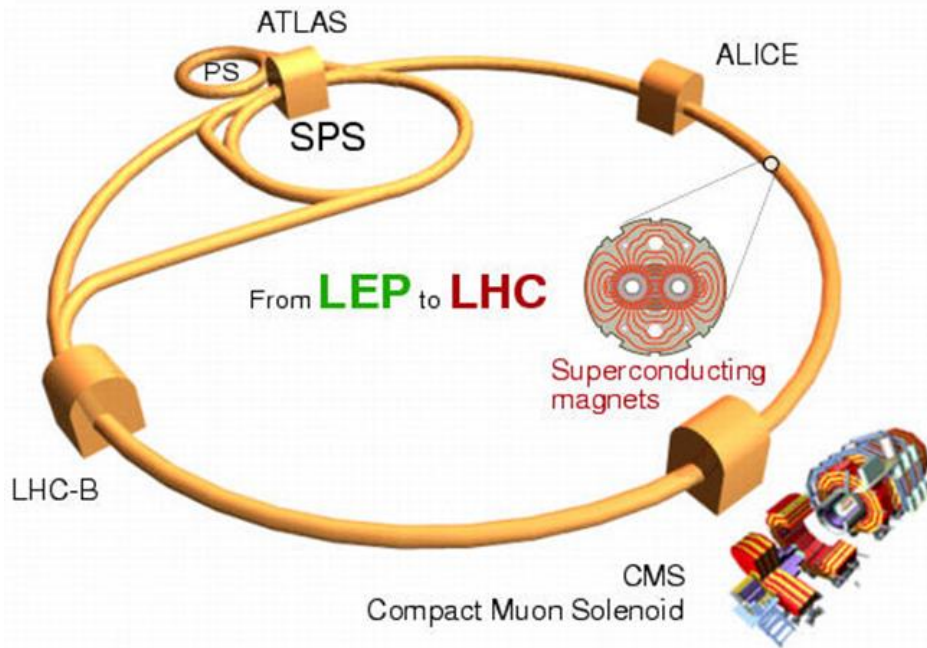
B_m : averaged magnetic bending field over the circumference

- More energy than LEP needed for Higgs-search (e.g. introductory talk)
- LEP can not further boosted in energy, limited by the synchrotron radiation radiated in a circular machine
- Synchrotron radiation is 10^{13} times lower for protons than for electrons
- LHC thus aimed at 2×7 TeV protons which means that the individual bending magnets should in the 8 - 9 Tesla region
- That energy just deemed to be the feasible limit (after an extreme R&D effort).

Lay-out of the LHC

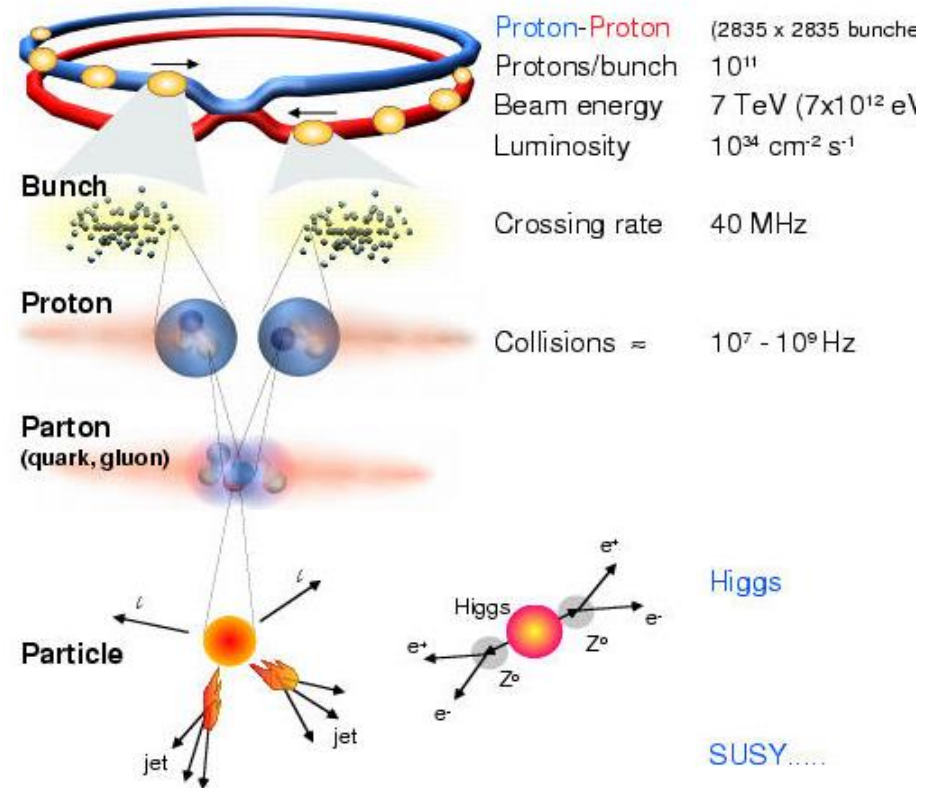
(transparencies from a CMS workshop in the nineties)

The Large Hadron Collider (LHC)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	e+ e-	200 GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
LHC	p p	14 TeV	10^{34}
	Pb Pb	1312 TeV	10^{27}

Collisions at LHC



Selection of 1 in 10,000,000,000,000

The technological challenge of the LHC

- The specifications of many systems were beyond the state of the art
- Extensive and long-lasting R &D programmes had to be performed with partners: research labs and industry



- **1232 high-field bending magnets of 8.3 T (bending 0,6 mm/m)**
- **The largest number of superconducting magnets ever installed, with a total of 37 kT of cold mass**
- **The largest cryogenic installation ever made, requiring 1.8 K technology, i.e. 150 T of superfluid He-II, extreme-size He-liquifier, precision thermometry**
- **Ultra-high vacuum for the beams, 10^{-13} atm, = ten times less than on the moon**
- **Very large electrical currents to be controlled with extreme precision**
- **A ultra-reliable machine protection system (stored energy)**

The challenge of the stored energy

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

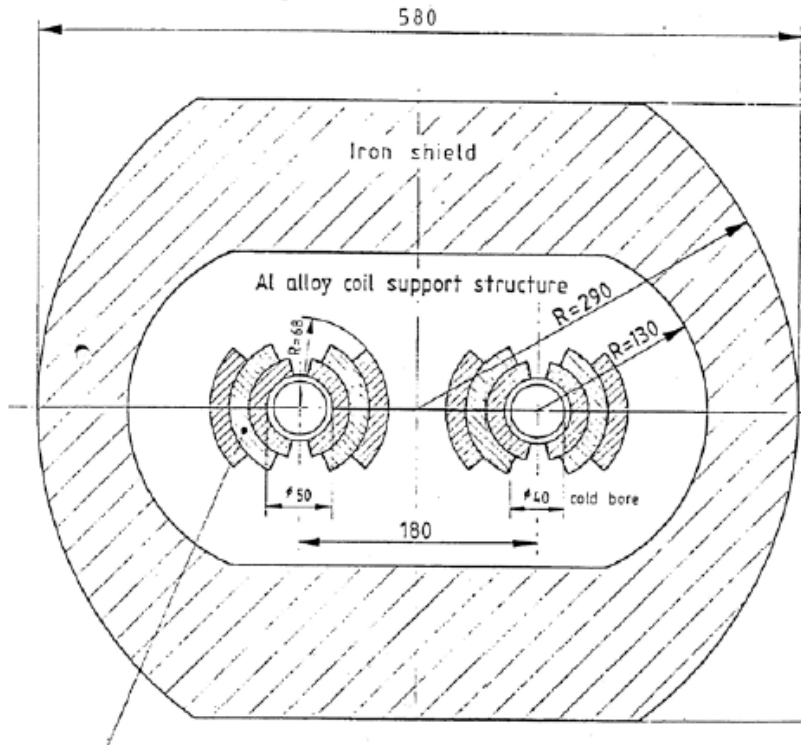
Puissance électrique mondiale installée $\cong 3.8$ TW

90 kg de TNT par faisceau



Basic conception of the bending magnets

Conception « two-in-one »



3 (or 4) layer windings

Fig. 10 Twin bore (2 in 1) magnet, cross-section type A

$$B_0 = 10 \text{ T}$$
$$J_{av} = 300 \text{ A mm}^{-2}$$

- As early as the mid-eighties, such drawings were shown at different workshops

Remarks the pre-construction R&D

- Given the experience of CEA (TORE-SUPRA) the implication of CEA has been a must:

8 Accords d'exécution: 1988-1994

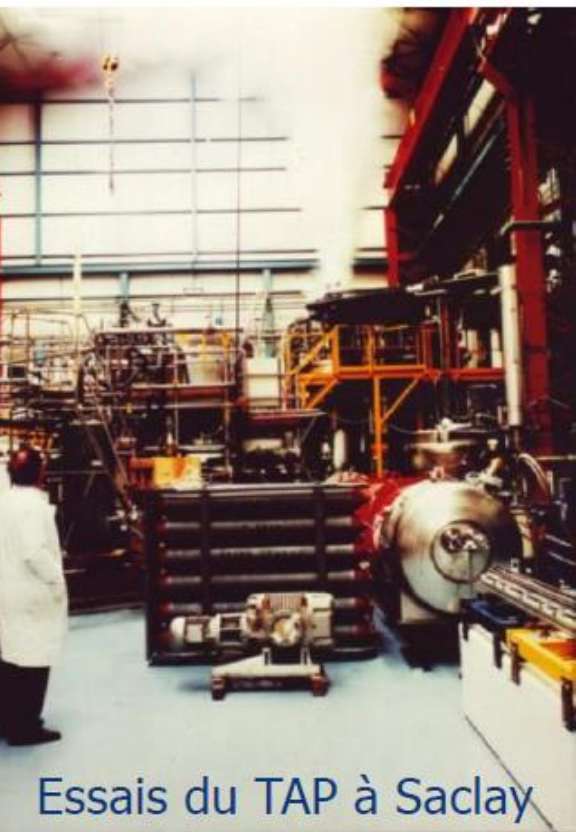
l'hélium II, réfrigération à 1.8 K, quadrupoles et stations d'essais

- Octobre 1988: Accord d'exécution No.1
 - Station d'essais et test d'aimants modèles
 - Thermique du conducteur
 - Station d'essai 1,8 K avec compresseur froid
 - Fabrication de cavités 1.5 GHz
- Octobre 1988: Accord d'exécution No.2
 - Modification bancs d'essais
 - Mesures de modèles et prototype d'aimant
- Novembre 1989: Accord d'exécution No.3
 - Etude des quadrupoles principaux du LHC
 - Construction d'un prototype
- Novembre 1989: Accord d'exécution No.4
 - Thermo-hydraulique de l'hélium II pressurisé en circulation forcée
- Mars 1992: Accord d'exécution No.5
 - Essais complets du dipole TAP
 - Thermique des conducteurs
 - Construction d'un second prototype de quadrupole et essais
- Mars 1992: Accord d'exécution No.6
 - Thermo-hydraulique de l'hélium II saturé en circulation
- Décembre 1993: Projet d'Accord d'Exécution No.7 (non signé)
 - Quadrupole nouveaux paramètres
- Juillet 1994: Accord d'exécution No.8
 - Réfrigération 1,8 K de forte puissance

Le TAP, l'ancêtre des dipôles LHC

TAP CRYOMAGNET PARAMETERS

Superconductor	NbTi/copper cable	T
Nominal field	7.5	A
Nominal current	8625	MJ
Stored energy	4.06	mm
Coil inner diameter	75	m
Magnet outer diameter	0.58	m
Magnet length	9.15	m
Cryostat diameter	1.02	m
Cryostat length	10.33	m
Temperature levels	80, 4.5, 1.8	K
Cold mass	15000	kg
LHe capacity	390	l
LN2 capacity	40	l



Essais du TAP à Saclay

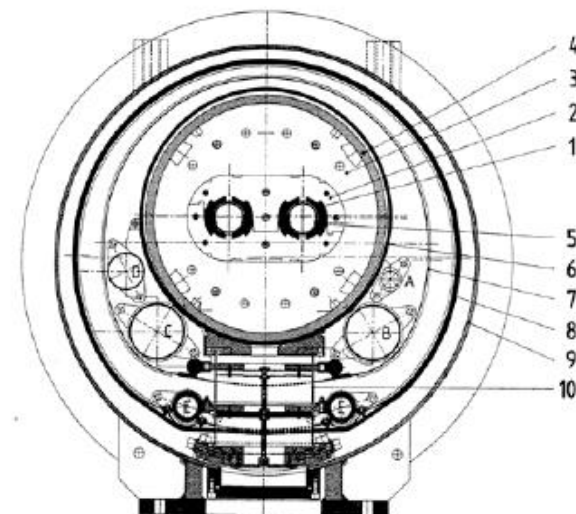


Figure 1 Transverse cross-section of the cryomagnet

- | | |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1: HERA-type superconducting coils | 6: helium vessel |
| 2: collars | 7: radiation screen |
| 3: magnetic circuit | 8: superinsulated LN2 screen |
| 4: shrinking cylinder | 9: vacuum vessel |
| 5: cold bore tube | 10: support post |

A & B: 1.8 K helium pipes
 C & D: 4.5 K helium pipes
 E: liquid nitrogen pipes

CEA-DSM-SBT Grenoble

EXPERIMENTS ON TWO PHASE SUPERFLUID HELIUM FLOW

Cooling of LHC superconducting magnets

METHOD FOR COOLING LHC MAGNETS

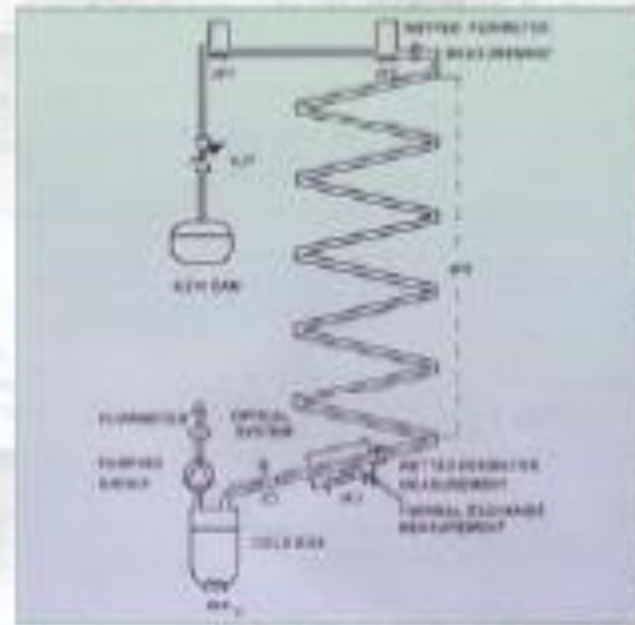
- High magnetic field+ NbTi +long distances+high heat loads on the magnets (0.7 W/m)
- Cooling by two phase forced flow HeII under 2K.

AIM OF EXPERIMENT

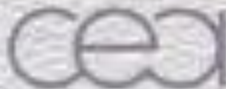
- Hydraulic behaviour of the system ?
- Thermal capacity of the system ?
- Quantitative informations for circuit design.
- Key components qualification.



Helium vessel 40 mm diameter, 10 m long, 1.25 MPa.



Schematic of two phase flow experiment.



DEPARTEMENT DE RECHERCHE FONDAMENTALE SUR LA MATIERE CONDENSEE

DSM

SERVICE DES BASSES TEMPERATURES
12, AVENUE DES MARTYRS + 38054 GRENOBLE CEDEX 9

Political decisions

- December 1994 CERN Council approves the construction of LHC, taking into account the voluntary additional contributions of Switzerland and France "for the acceleration of the construction"
- In April 1995 France proposes the of CEA and CNRS implying an effort of about 200 man*years, accepted by CERN DG in May 1995
- This gives rise to consecutive technical elaboration meetings in 1995 and early 1996
- Signature in February 1996 of the "protocole d'accord" between CERN, CEA and CNRS

The 4 collaboration contracts signed between CERN CEA and CNRS

Février 1996: **Protocole de collaboration CERN-CEA-CNRS pour la construction du LHC**

Signé par Ch. Llewellyn Smith pour le CERN, G. Aubert et C. Détraz pour le CNRS et l'IN2P3, Y. d'Escatha et C. Cesarsky pour le CEA et la DSM, **en présence des ministres F. Bayrou et F. d'Aubert**

«Pour répondre aux défis technologiques considérables, notamment dans le domaine des aimants supraconducteurs et de la cryogénie, le CERN le CEA et le CNRS expriment leur volonté de collaborer étroitement dans ces domaines en exploitant au mieux, dès la phase de conception et dans un esprit de partenariat, leur savoir faire et leur expérience propres»

Accord Technique d'exécution No.1 *Collaboration CERN-CEA pour les masses froides avec quadrupoles des sections droites courtes*

Accord Technique d'exécution No.2 *Collaboration CERN-CNRS pour les cryostats et l'assemblage des sections droites courtes*

Accord Technique d'exécution No.3 *Collaboration CERN-CNRS pour l'instrumentation cryogénique*

Accord Technique d'exécution No.4 *Collaboration CERN-CEA pour la réfrigération à 1,8 K*

Collaboration Agreement 1 on the cold masses of the quadrupoles (CEA-DSM-Saclay)

MQ Outcrop
MQT Tuning quadrupole
MQS Skew quadrupole

MQ (F,D) Main quadrupole

MSCB (A,B,C,D) Sextupole-dipole corrector

Total needed in arcs: 360

MQ cold masses in fabrication hall

Cold masses delivered to CERN: 358
MQ magnets fabricated: 408

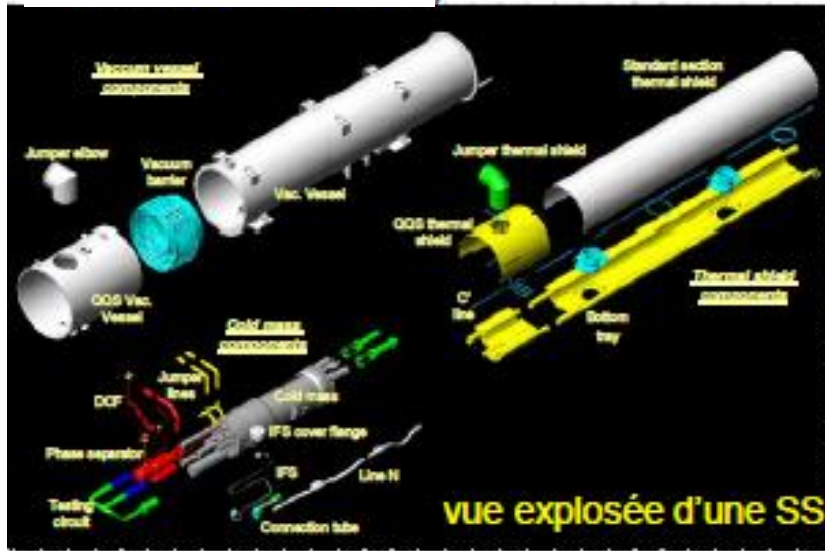
Dans l'usine

Assemblages des masses froides

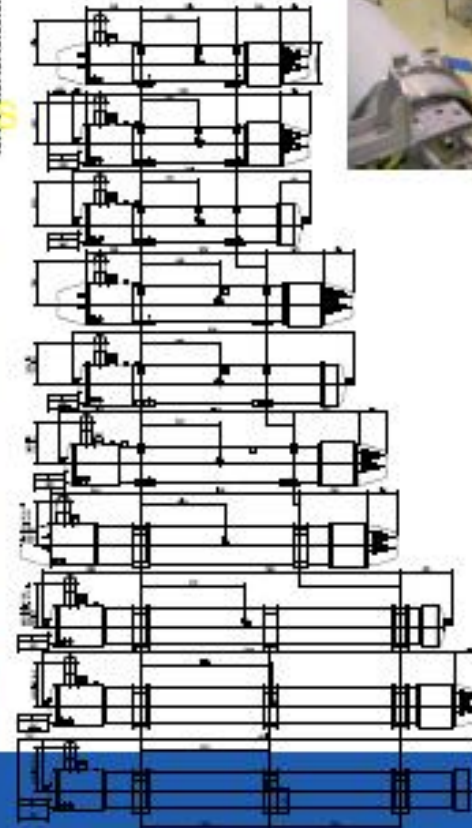
408 quadripôles et 360 masses froides
Fabriquées par ACCEL, en Allemagne



Collaboration Agreement 2 on the technical design and the tooling for the assembly of the SSS cryostats (CNRS - IN2P3 - IPN Orsay)



- 474 SSS
- 137 variantes

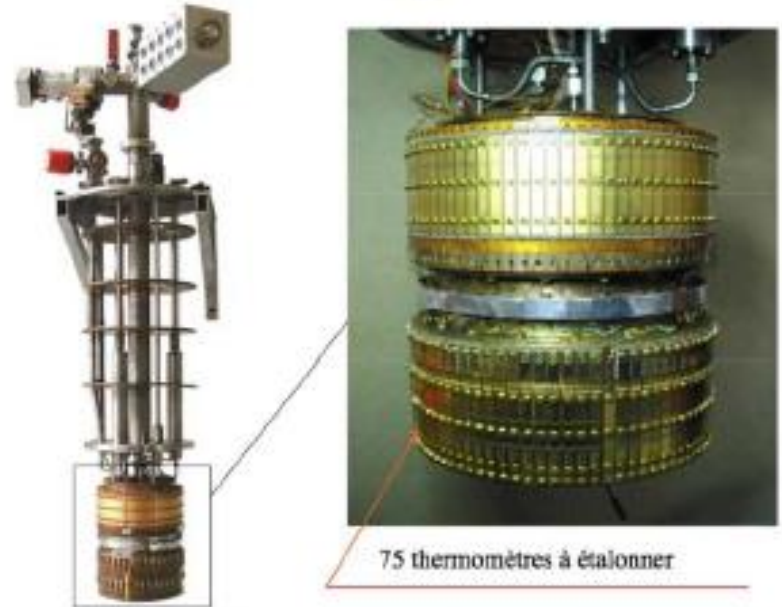


Collaboration Agreement 3 on the calibration of 6849 thermometers for the LHC cryogenic system (CNRS - IN2P3 - IPN Orsay)

Vue d'ensemble de la station



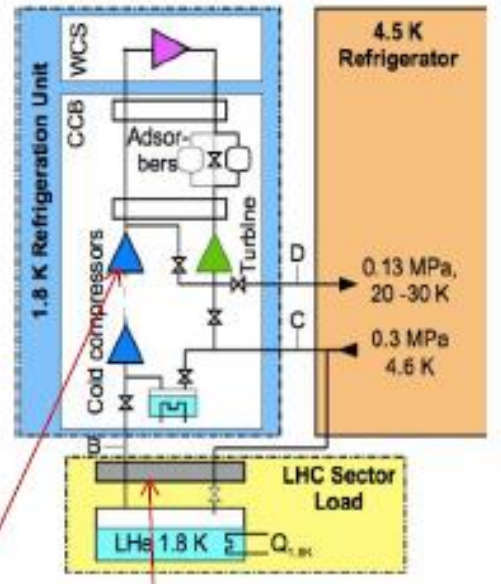
Insert, étalonnage sous vide



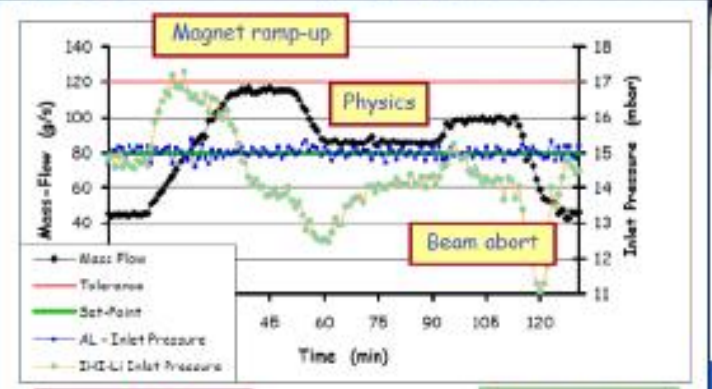
Thermomètres étalonnés

	2000 Pré-airie	2001	2002	2003	2004	2005	2006
LT (Long Thermometer)	309	738	1274	406	558	536	1
ST (Short Thermometer)		297	1202	913	324	18	15
Nude		6	72	37	103	49	0
Total	309	1041	2548	1356	985	603	16

Collaboration Agreement 4 for the construction of the LHC 1.8 K refrigeration units (CEA – DSM – SBT Grenoble)



Cycle de référence



IMI - Linde : ± 2.2 mbar ...

Air Liquide : ± 0.3 mbar !



The CSP (contract follow-up) : a most important tool for a clear and common understanding

CERN/AT/PhL/ed
19 septembre 2006

Comité de Suivi du Protocole No. 26
Collaboration CERN-CEA-CNRS pour la construction du LHC

CERN, 19 septembre 2006

Participants :

CERN : Giorgio Brianti, Juan Casas-Cubillos, Serge Claudet, Wolfgang Erdt,
Gérard Ferlin, Maksim Gandel, Philippe Lebrun, Vittorio Parma,
Romeo Perin, Alain Poncet, Peter Rohmig, Karl Schirm, Laurent Tavian,
Theodor Tortschanoff, Carlo Wyss

CEA : Gabriele Fioni, Gérard Claudet, Alain Girard, Danièle Imbault,
François Millet, Marc Peyrot, Jean-Michel Rifflet, Fabrice Simon

CNRS/IN2P3 : Jean-Baptiste Bergot, Daniel Gardes, Tomas Junquera, Philippe Lavocat,
Franck Lutton, Alex Mueller, Michel Spiro, Jean-Pierre Thermeau,
Daniel Vincent

Excusés : Robert Aymar, Philippe Brossier, Yves Caristan, Antoine Dael,
François Dupont, Jean-Pierre Gourber, Marcel Lieuvin, Pascal Roussel,
Peter Seyfert

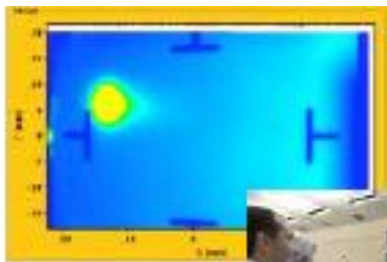
Final "closing" meeting

1. Bienvenue

Ph. Lebrun souhaite la bienvenue aux participants de cette 26^{ me} et ultime réunion du
Comité de Suivi du Protocole (CSP) CERN-CEA-CNRS pour la construction du LHC.

Timeline from the (end of) construction to the Higgs-boson

Août 2008
Premier test d'injection



3.5 TeV

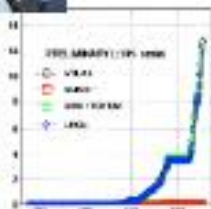


2.0e33, 2.0 fb
1380 paquets

4 July, 2012
Annonce du Higgs



29 Novembre
2009
Le faisceau est de retour



10 Septembre 2008
Premiers faisceaux circulants

28 Juin 2011
1380 paquets

1380

6 Juin 2012
6.8e33

Avril 2010
248 paquets
Squeeze à 3.5 m

14 Octobre
2010
1e32

2008

2009

2010

2011

2012

19 Septembre
2008

Incident sur une interconnexion
600 MJ d'énergie stockée dans un secteur du LHC

30 Mars 2010
Premières collisions à 3.5 TeV



Novembre 2010
lons



18 Juin 2012
6.6 fb⁻¹
ATLAS & CMS



In lieu of a conclusion: a summary transparency on the collaboration France – LHC by F. Bordry shortly after the Higgs discovery

La France et le CERN autour du LHC: *histoire d'un succès*

- Une R&D en amont, dès la phase initiale de conception
- Volonté de travailler ensemble à des objectifs communs, dans un esprit de partenariat
- Compétences spécifiques dans les domaines techniques de la collaboration
- Cadre d'ensemble applicable à tous mais respectant la flexibilité nécessaire aux diversités « culturelles » et aux évolutions
- Suivi rigoureux: Comité de Suivi de Protocole (CSP) périodiques, réunions d'Accords, compte rendus détaillés, revues de projet, actions, ressources
- Adaptabilité à un environnement changeant, dans le respect de l'esprit du Protocole

Une opportunité pour l'industrie française d'être en alerte et de se préparer aux appels d'offres.