



# **Le CERN et le LHC: Leur place dans la recherche scientifique mondiale**

Robert Aymar

**Les Grandes Infrastructures scientifiques européennes**  
*La Société Royale des Sciences de Liège*  
*2 décembre 2008*

## Sommaire



- Le CERN: des installations au service de la communauté européenne des physiciens des particules, devenant un laboratoire « mondial ». 
- Le projet LHC: une progression unique et nécessaire pour la PHE - deux accélérateurs, quatre expériences et une grille de calcul mondiale.
- Projets du CERN pour la prochaine décennie – le S-LHC et le CLIC (Collisionneur linéaire  $e^+e^-$  de plusieurs TeV).



# Le CERN...

- Apporter des réponses aux questions sur l'Univers
- Repousser les frontières de la technologie
- Former les scientifiques de demain
- Rassembler les nations grâce à la science

Liège, 2 décembre 2008 3



L'existence du CERN est due à l'action de visionnaires notamment Pierre Auger, Eduardo Amaldi – soutenue par des éminents anciens du CERN Raoul Dautry, Lew Kowarski, Francis Perrin.

Ils ont conduit à de nombreux succès!

Il est de notre responsabilité de poursuivre et d'assurer au CERN un futur aussi respectable.



## Le CERN en chiffres

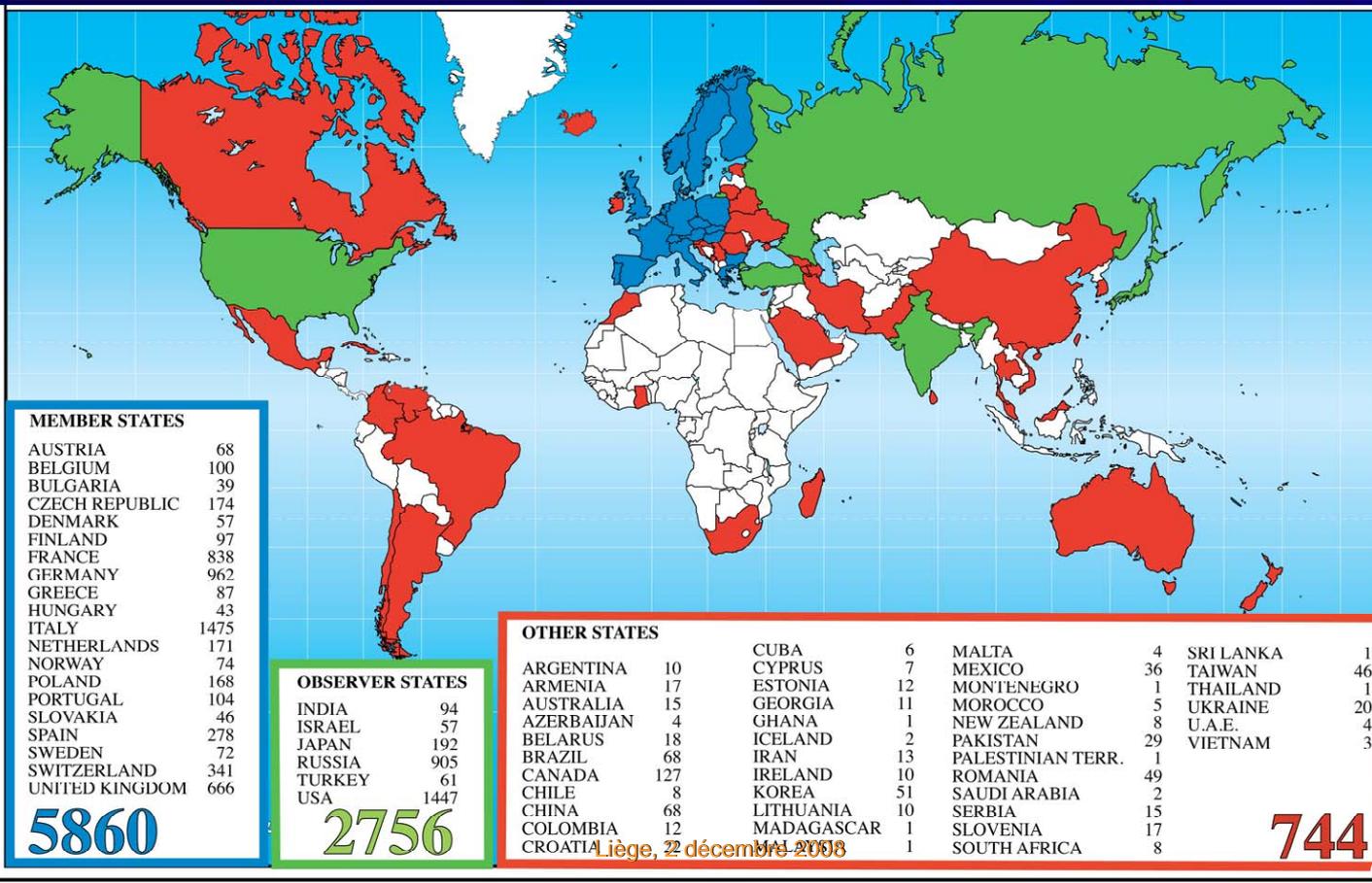
- 2329 titulaires\*
- 711 boursiers et attachés\*
- 9360 utilisateurs\*
- Budget (2007) 982 MCHF (610 MEuro)

\*15 juillet 2008

- **Etats membres:** Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.
- **Observateurs au Conseil:** Commission européenne, Etats-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Inde, Israël, Japon, Turquie et Unesco.

Liège, 2 décembre 2008 5

## Répartition des utilisateurs du CERN selon l'Etat hôte de leur institut au 15 juillet 2008



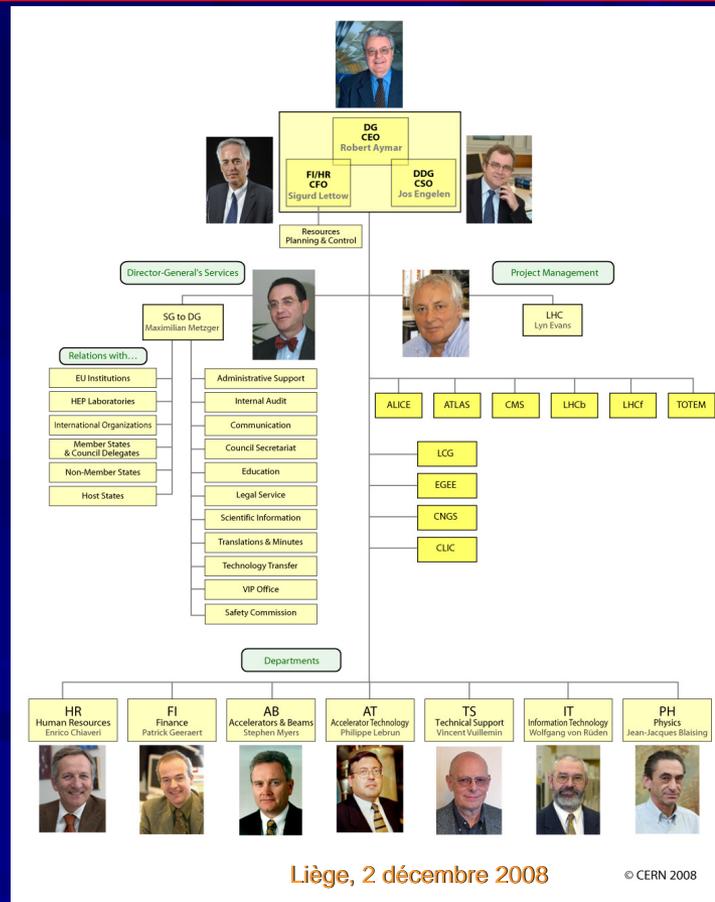


## **Le CERN à la première place mondiale de la physique des particules...**

**...il faut qu'il y reste !**



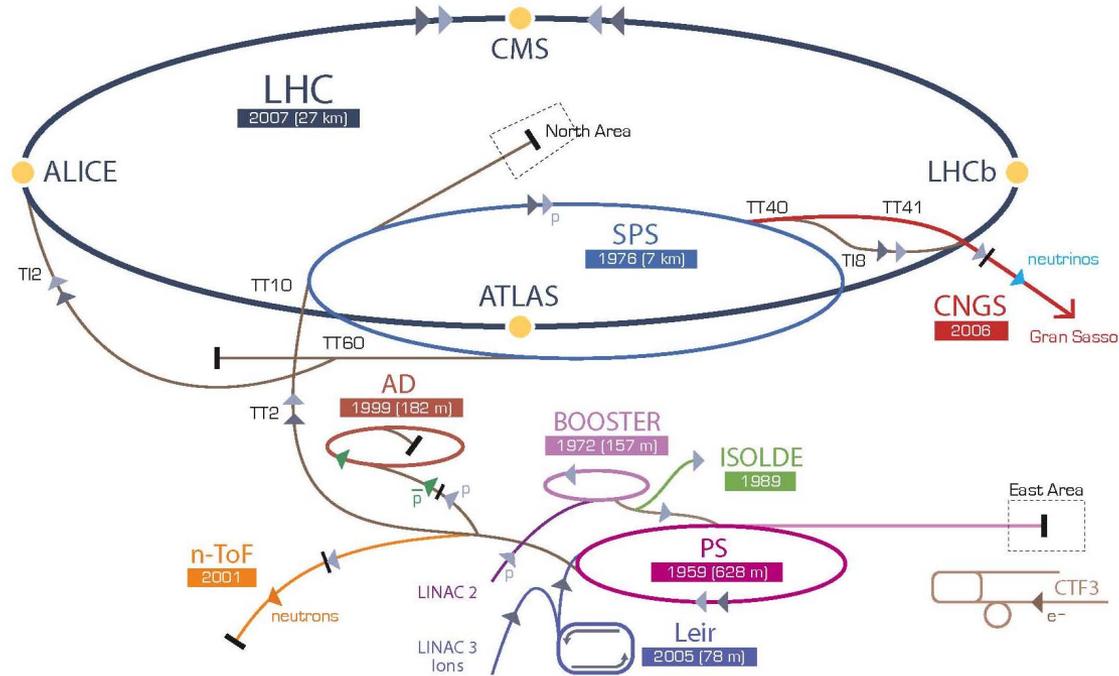
# Organigramme du CERN



Liège, 2 décembre 2008

© CERN 2008

# Le complexe d'accélérateurs du CERN (échelle non respectée)



▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶  $\bar{p}$  [antiproton] ↔ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Compact Neutrino Generator ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



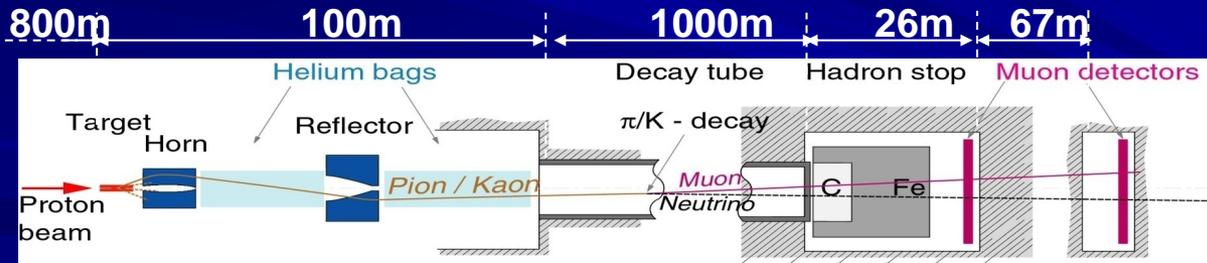
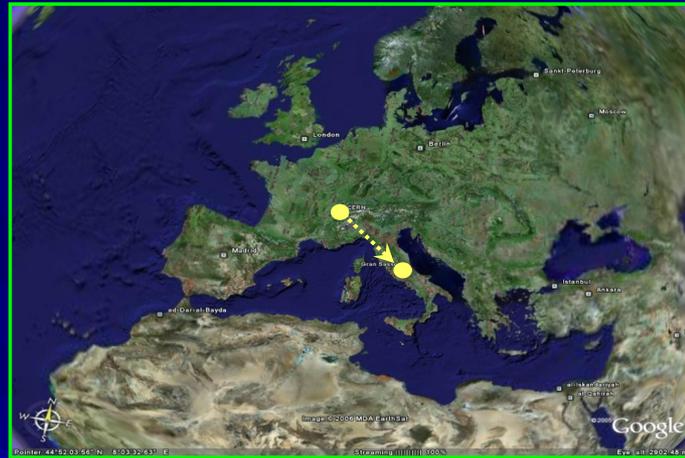
# CNGS - Neutrinos du CERN au Gran Sasso



Objectif pour la physique:  
recherche de l'oscillation

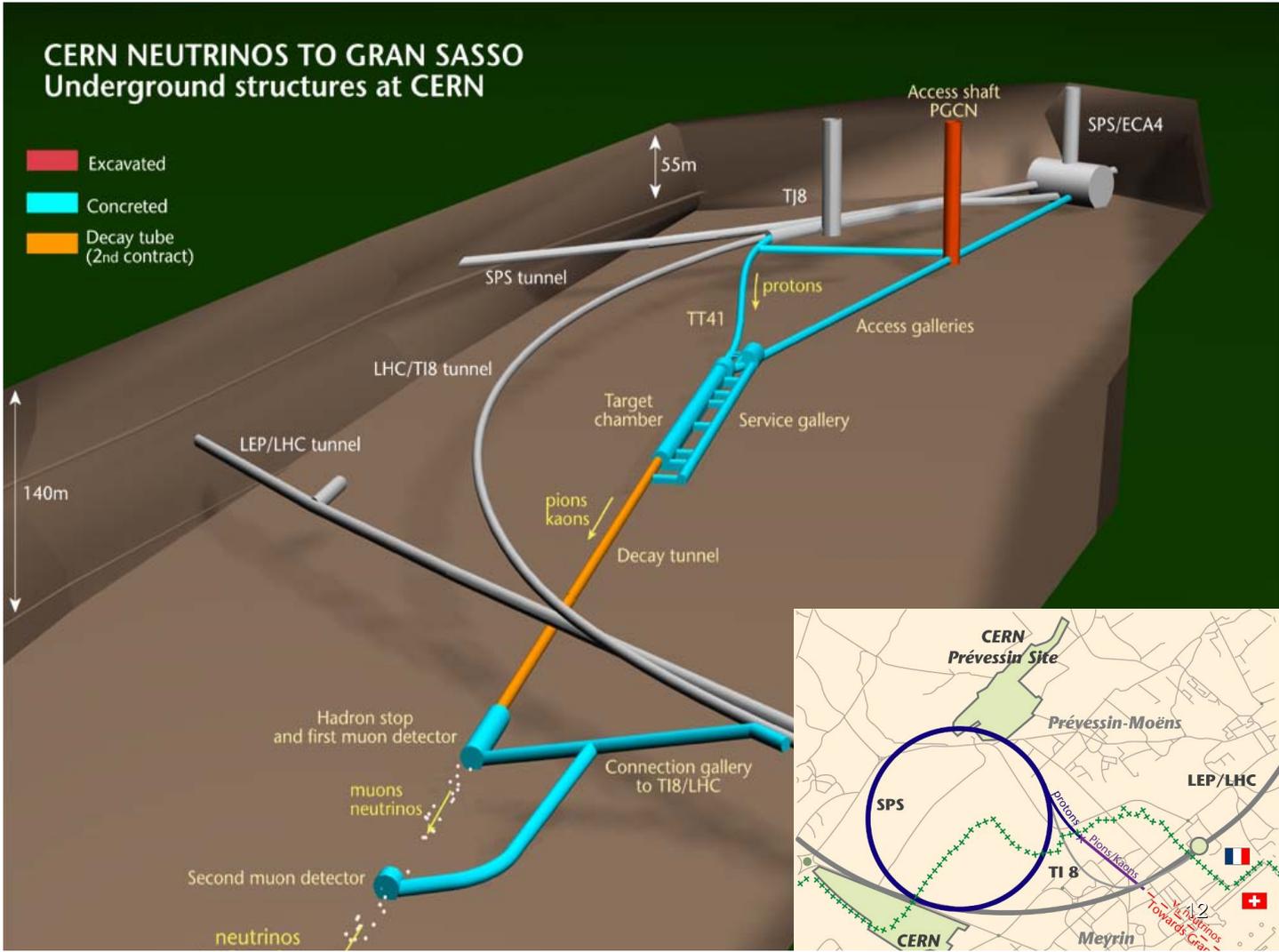
$$\nu_{\mu} - \nu_{\tau}$$

Mission du CERN:  
Produire un faisceau intense  
de  $\nu_{\mu}$  en direction du  
GranSasso



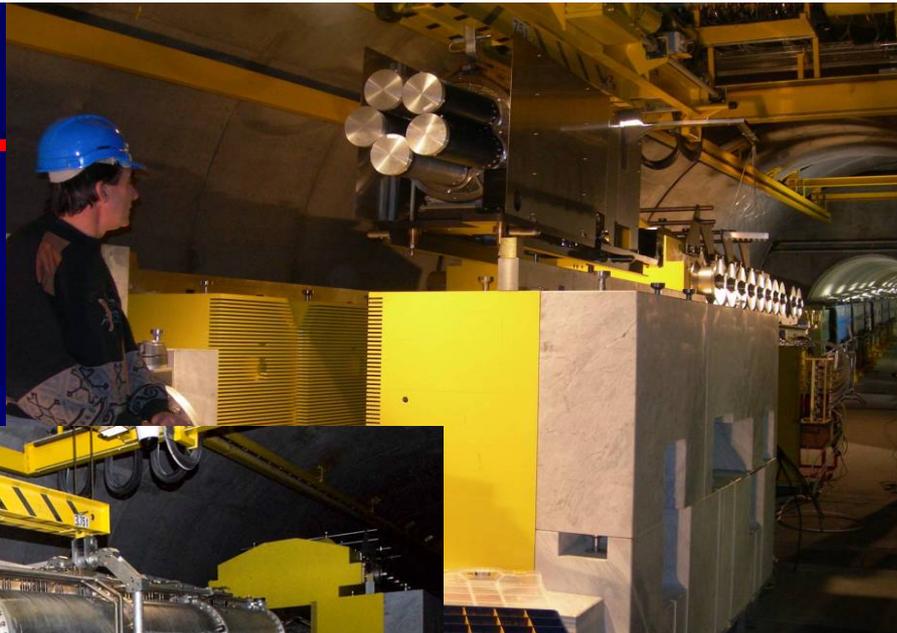
Liège, 2 décembre 2008

11



## Chambre des cibles de CNGS

Installation  
du chargeur de cible  
(4 cibles de réserve in situ)

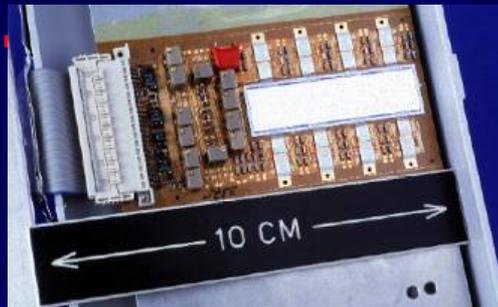


Installation  
de la corne  
(élément de focalisation)

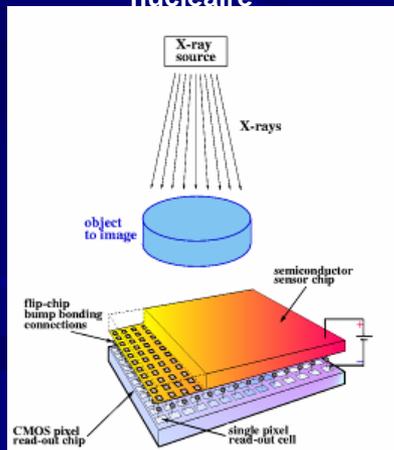
Liège, 2 décembre 2008

13

# Projets de transfert de technologie



Détecteur au silicium pour une caméra Compton utilisée en imagerie médicale nucléaire



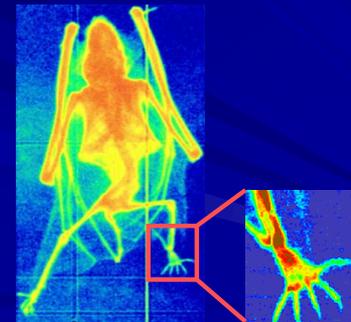
Medipix : Radiodiagnostic médical avec renforcement du contraste et réduction des doses



Réalisation de couches minces par évaporation ou pulvérisation



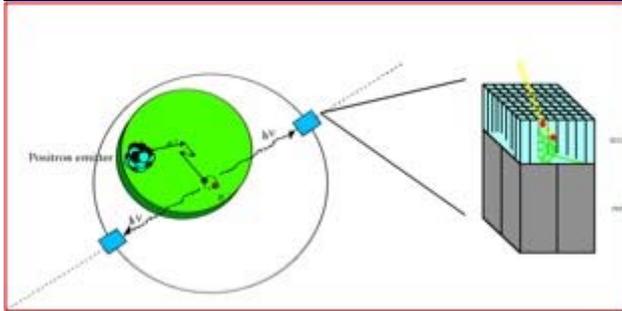
Production de radionucléides pour des applications médicales



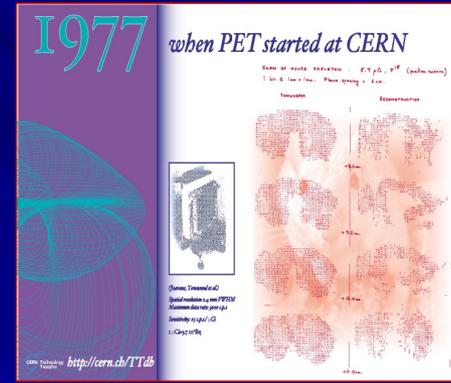
Radiographie d'une chauve-souris enregistrée au moyen d'un détecteur GEM

Liège, 2 décembre 2008

# La science au service de la santé : l'imagerie



...a inspiré la TEP



Détection de photons en calorimétrie

La TEP actuelle



Calorimètre de CMS

Liège, 2 décembre 2008



15

# Le CERN - Centre de formation

**Apprentices**      **Accelerator School**      **Doctoral Students**  
**Academic Training**      **Fellows**      **Physics School**  
**Exhibitions**      **CERN-Latin America School**      **Computing School**  
**Visits**      **Technical Students**  
**Outreach**      **Summer Students**      **Microcosm**  
**Technical Training**      **Science on Stage**      **Language Training**  
**Conferences**      **Teachers programmes**      **Communications Training**  
**Management Training**

Liège, 2 décembre 2008

16

## Rapprocher les nations



**« ...encourager les contacts et les échanges entre scientifiques... »**

Liège, 2 décembre 2008

# Sommaire



- Le CERN: des installations au service de la communauté européenne des physiciens des particules, devenant un laboratoire « mondial ».
- Le projet LHC: une progression unique et nécessaire pour la PHE - deux accélérateurs, quatre expériences et une grille de calcul mondiale. 
- Projets du CERN pour la prochaine décennie – le S-LHC et le CLIC (Collisionneur linéaire  $e^+e^-$  de plusieurs TeV).



# **Le LHC, une aventure mondiale**

**20 Etats membres  
6 Etats  
observateurs**

**Le LHC  
10 000  
scientifiques  
500 instituts  
85 nationalités**

CERN

## Le LHC = un collisionneur proton - proton

7 TeV + 7 TeV



Luminosité =  
 $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$



Objectifs principaux:

- Origine de la masse
- Nature de la matière noire
- Plasma primordial
- Matière c/ Antimatière

Les résultats du LHC  
détermineront le cours futur  
de la physique des hautes  
énergies

## L'accélérateur LHC : un demi-siècle de travaux



- Etudes préliminaires de conception 1984
- Premier modèle d'aimant 1988
- Définition du programme de R&D 1990
- Première approbation par le Conseil du CERN 1994
- Fabrication des aimants prototypes dans l'industrie 1996-1999
- Début du génie civil (cavernes) 1998
- Principaux contrats d'achat 1998-2001
- Début des préparatifs dans le tunnel 2003
- Installation des aimants dans le tunnel 2005-2007
- Essai fonctionnel du premier secteur du LHC 2007
- Exploitation pour la physique 2008-2025

Liège, 2 décembre 2008

21

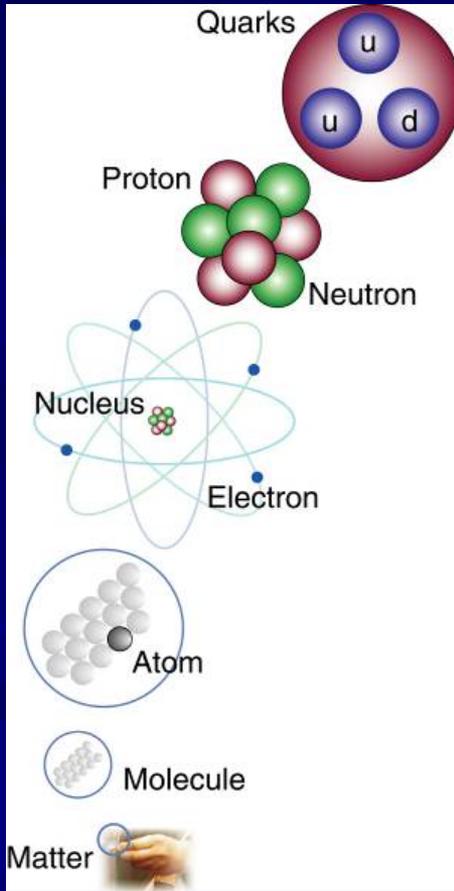


Dépenses LHC imputées au budget du CERN  
 en MCHF (arrondis) prix courants  
 (hors contributions spéciales en nature de 432 MCHF pour la machine)

Machine & Areas Construction	Total 1995- July 2008		
	Personnel	Materials	Total
Machine	841	2,870	3,711
Experimental areas	71	375	446
<b>Machine &amp; Areas Construction</b>	<b>912</b>	<b>3,245</b>	<b>4,157</b>
Machine R & D	72	66	138
Injectors, tests & pre-operation	240	445	685
<b>TOTAL Machine and Areas</b>	<b>1,224</b>	<b>3,756</b>	<b>4,980</b>
<b>CERN contribution to Detectors</b>			
ATLAS	298	129	427
CMS	272	128	400
ALICE	119	29	148
LHCb	76	20	96
TOTEM	6	2	8
Common items, others	56	5	61
<b>Detectors including R &amp; D</b>	<b>827</b>	<b>313</b>	<b>1,140</b>
Detectors: Tests & pre-operation	42	180	222
<b>TOTAL Detectors</b>	<b>869</b>	<b>493</b>	<b>1,362</b>
<b>CERN contribution to LHC Computing</b>	<b>85</b>	<b>83</b>	<b>168</b>
<b>GRAND TOTAL</b>	<b>2,178</b>	<b>4,332</b>	<b>6,510</b>



# Etude des particules élémentaires et des champs et de leurs interactions



	matter particles			gauge particles	
	1st gen.	2nd gen.	3rd gen.		
Q U A R K	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	Strong Force <i>g</i> ×8 Gluon	
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom	Electro-Magnetic Force <i>γ</i> photon	
L E P T O N	<i>ν<sub>e</sub></i> <i>e</i> neutrino	<i>ν<sub>μ</sub></i> <i>μ</i> neutrino	<i>ν<sub>τ</sub></i> <i>τ</i> neutrino	Weak Force <i>W</i> <sup>+</sup> <i>W</i> <sup>-</sup> <i>Z</i> <i>W</i> bosons <i>Z</i> boson	
	<i>e</i> electron	<i>μ</i> muon	<i>τ</i> tau		
scalar particle(s)				<i>H</i> ...	

**Elements of the Standard Model**

Liège, 2 décembre 2008

## La Supersymétrie



La Supersymétrie (SUSY) est une variante du MS qui en corrige certains défauts. Elle prédit un partenaire (de 100 GeV à quelques TeV) pour chaque particule du MS:

boson  $\leftrightarrow$  fermion

La plus légère de ces nouvelles particules, neutre et stable, est le suspect numéro 1 dans l'enquête sur la matière noire de l'Univers.

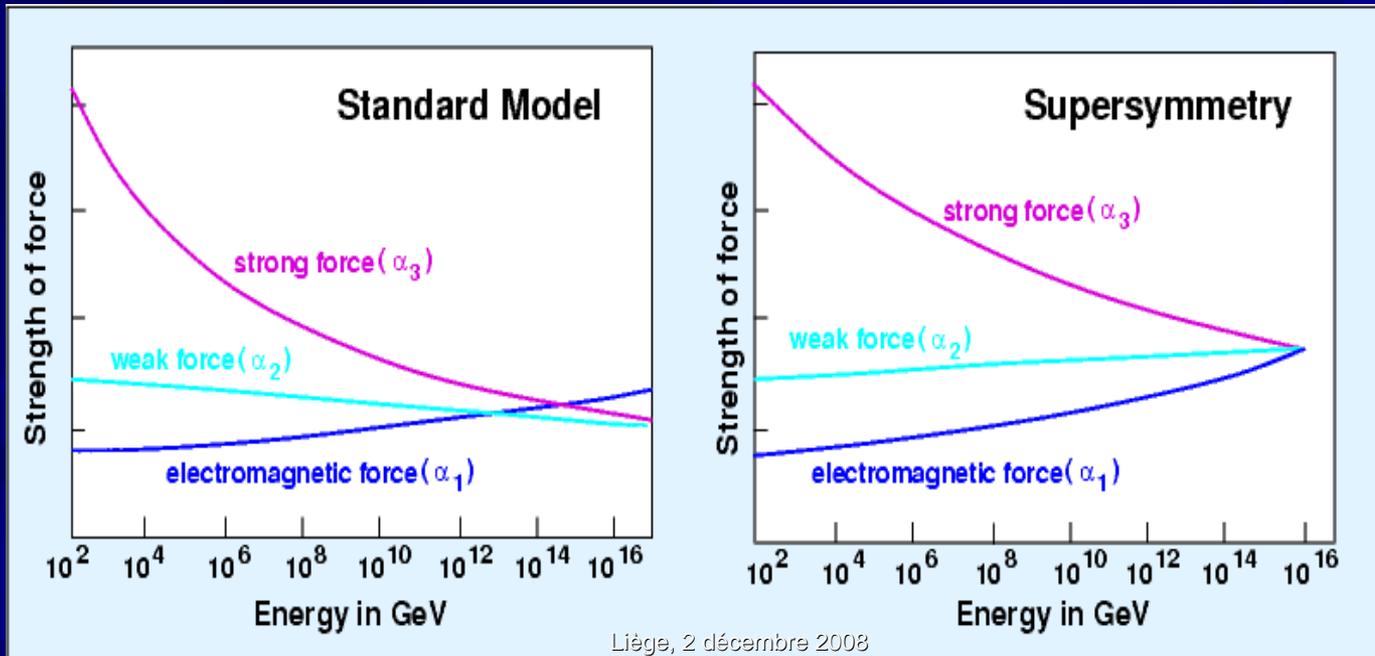
SUSY prédit plusieurs bosons de Higgs. Dans sa version minimale (MSSM), le plus léger pèse moins de 130 GeV.

Dans l'attente de la réponse du LHC (Tévatron ?), SUSY n'est encore qu'une hypothèse, mais qui fait figure de favorite.



# La Supersymétrie

Aucune information indirecte significative sur SUSY à partir des mesures électrofaibles de précision. Elle peut se cacher « derrière la porte » ou ne pas exister. Le meilleur indice reste la démonstration d'une convergence exacte des couplages de jauge dans le MSSM, grâce aux mesures ultra-précises effectuées au LEP.



Liège, 2 décembre 2008

25

## A l'échelle du téra-eV



### En résumé:

Nous pensons que quelque chose de nouveau devrait se produire autour de 1 TeV – nous devrions voir une preuve du mécanisme de Higgs ou mieux comprendre la brisure de symétrie électrofaible

Nous pourrions voir une preuve de la supersymétrie (donnant lieu à un secteur du Higgs plus grand). A noter que la supersymétrie apporte également une explication possible de la « matière noire »

Nous pourrions être surpris; je ne parlerai pas des « dimensions supplémentaires », dans ces théories l'échelle de Planck pourrait être beaucoup plus petite (de l'ordre de l'échelle du téra-eV)

**Une seule solution possible: explorer expérimentalement l'échelle du téra-eV**

**→ la mission obligatoire du LHC = un collisionneur de hadrons haute énergie et haute luminosité offrant une gamme très large d'énergies de collision, à même de faciliter les découvertes.**

# LHC Accelerator



Collisions of 7,000 GeV on 7,000 GeV protons  
(for reference: proton mass = 1 GeV)

Luminosity  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

(collision rate normalized to cross section)

**Innovations:** '2 in 1' superconducting 8.3 T dipoles  
focusing s.c. quadrupoles  
(operating temperature 1.9K = pressurized  
superfluid Helium)

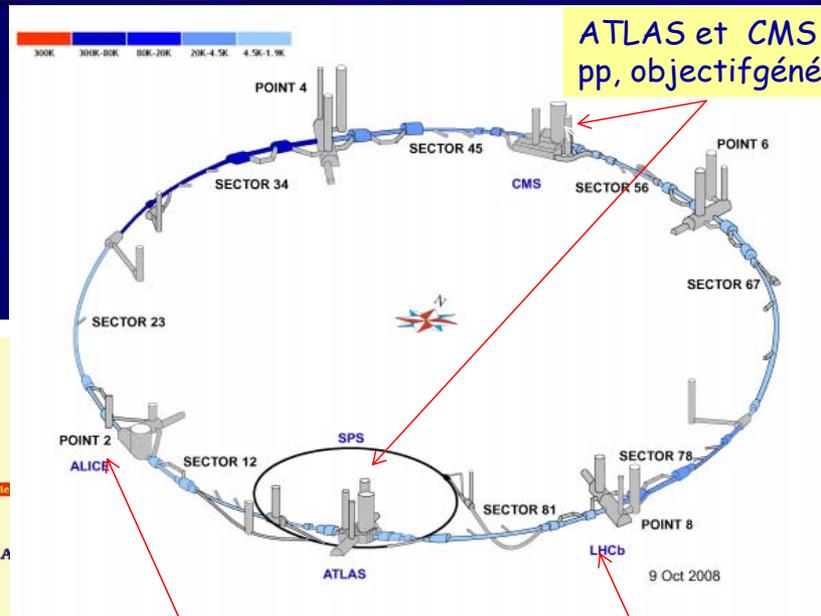
**Challenges:** collimation (350 MJ stored energy per beam, can melt 800 kg of copper) and furthermore the mere size of the system, e.g. more than 35,000 tonnes of 'cold mass', 27 km of cryogenic distribution line, etc.

# Grand collisionneur de hadrons (LHC)



<b>Injection Energy</b>	<b>0.45 TeV</b>
<b>Collision Energy</b>	<b>7 TeV</b>
<b>Dipole field at 7 TeV</b>	<b>8.33 T</b>
<b>Design Luminosity</b>	<b><math>10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}</math></b>
<b>Luminosity Lifetime</b>	<b>10 h</b>
<b>Protons per bunch</b>	<b><math>10^{11}</math></b>
<b>Bunches per beam</b>	<b>2808</b>
<b>Bunch spacing</b>	<b>25 ns</b>
<b>DC Beam Current</b>	<b>0.56 A</b>

- $\approx 1 \text{ GHz}$  interaction rate
- $\approx 23$  minimum bias interactions per bunch crossing (pile-up)
- **Extreme demands on detectors:**
  - high granularity
  - high data-taking rate
  - high radiation environment

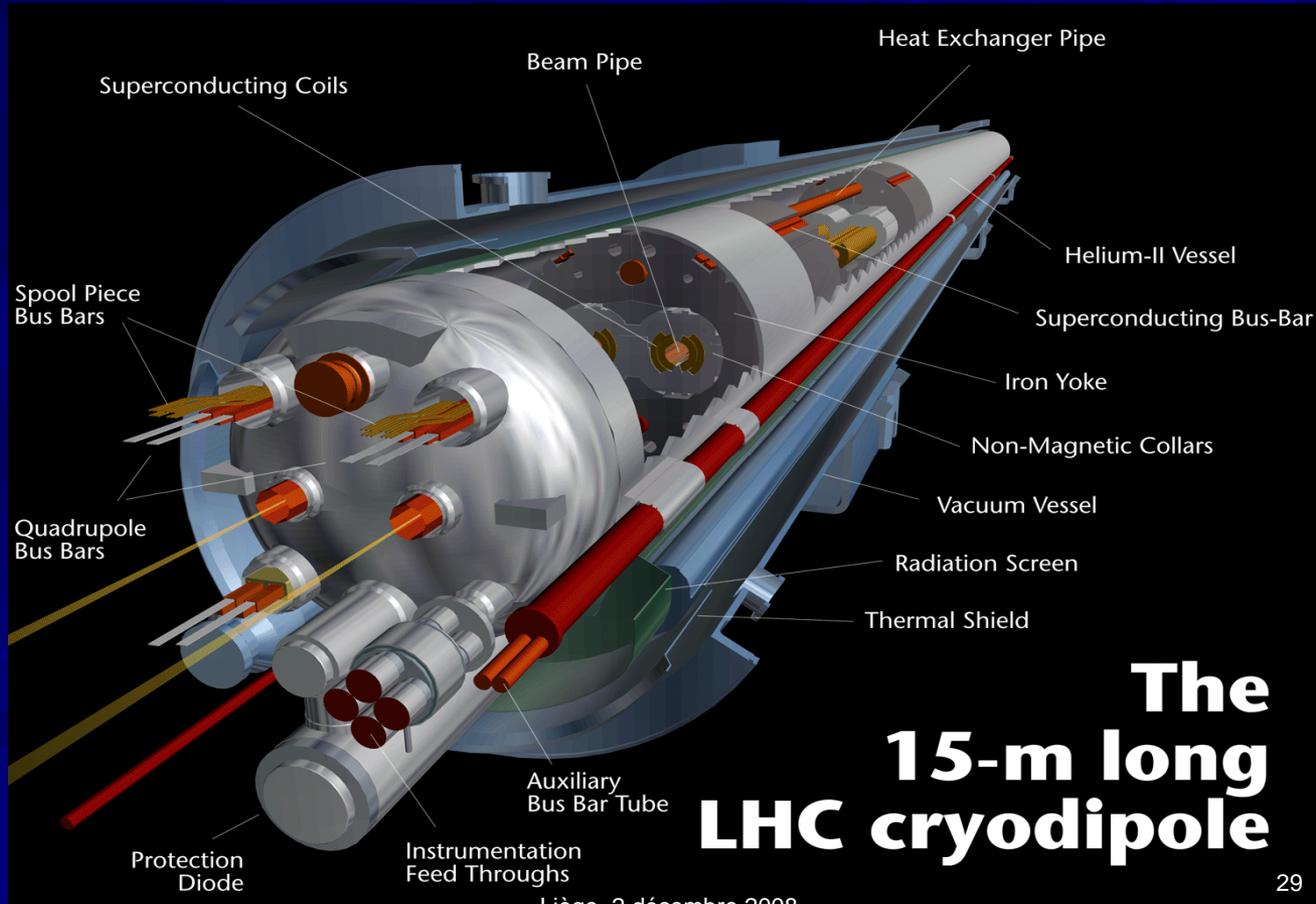


ATLAS et CMS :  
pp, objectif général

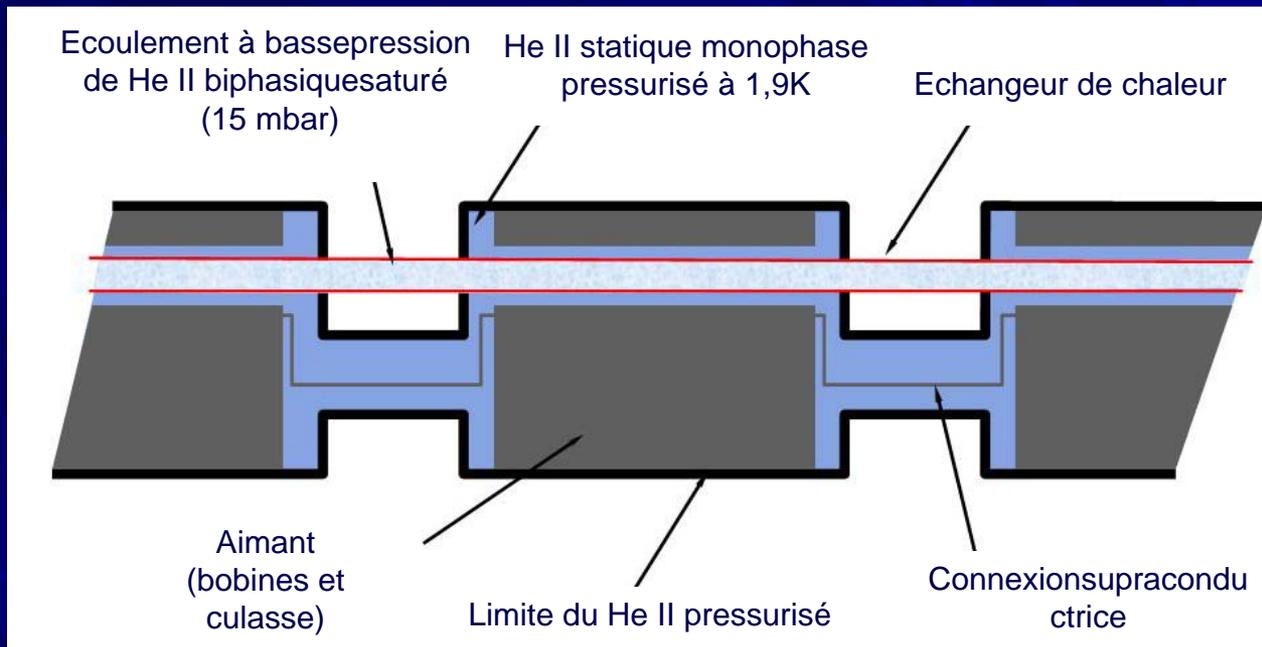
ALICE :  
ion-ion, p-ion

LHCb :  
pp, physique du B,  
violation de CP

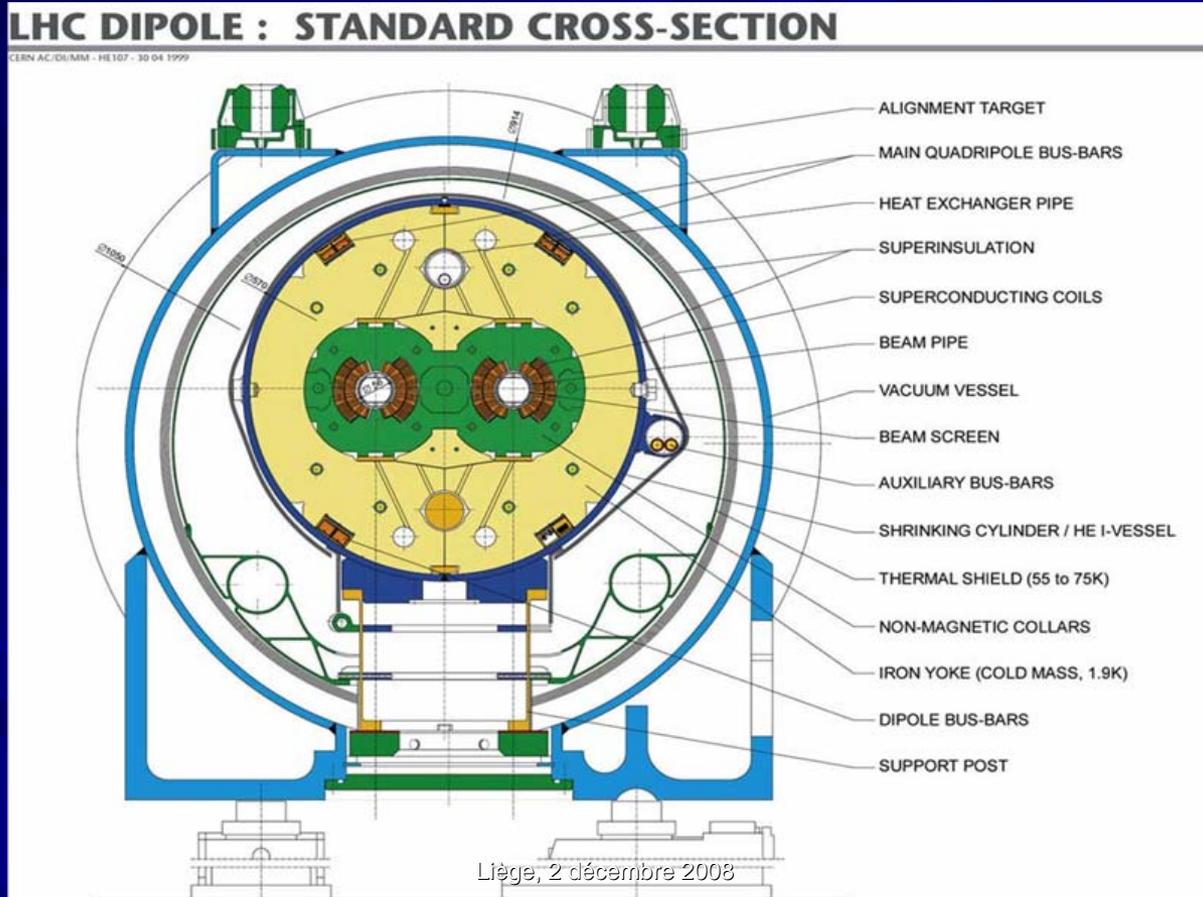
## Les Cryodipôles du LHC



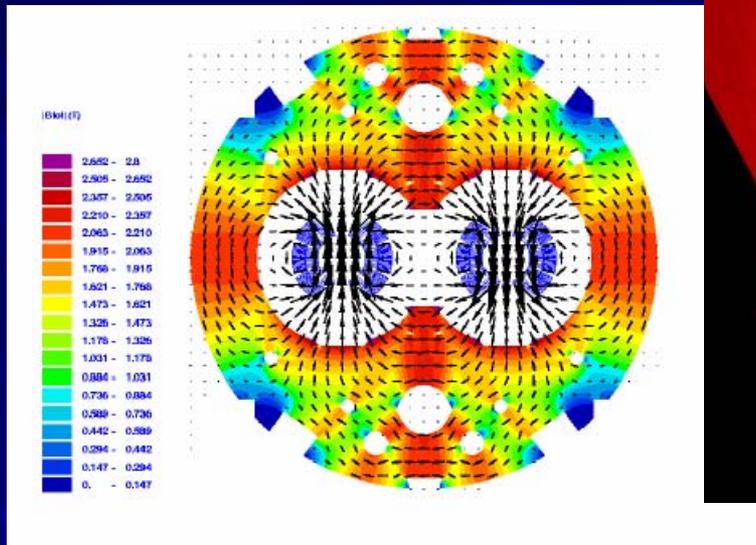
## Principe de refroidissement des aimants du LHC



## Schéma de la section droite d'un aimant dipôle du LHC avec la masse froide et la chambre à vide. Juin 1999



## Aimant dipôle du LHC : production industrielle et de précision



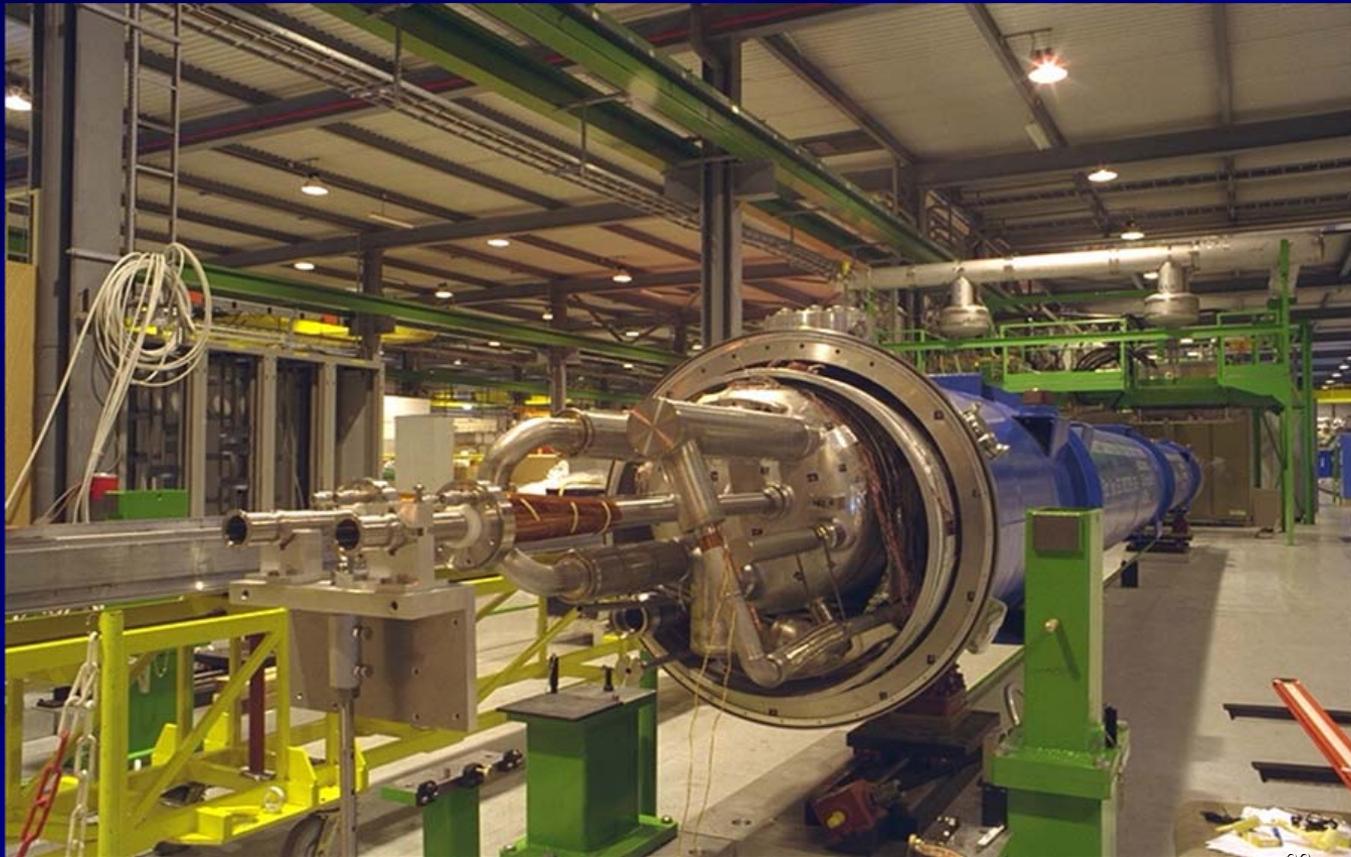
Précision du champ magnétique  $\sim 10^{-3}$

Homogénéité  $\sim 10^{-4}$

$\Rightarrow$

Précision des bobines supraconductrices  $< 0,05$  mm

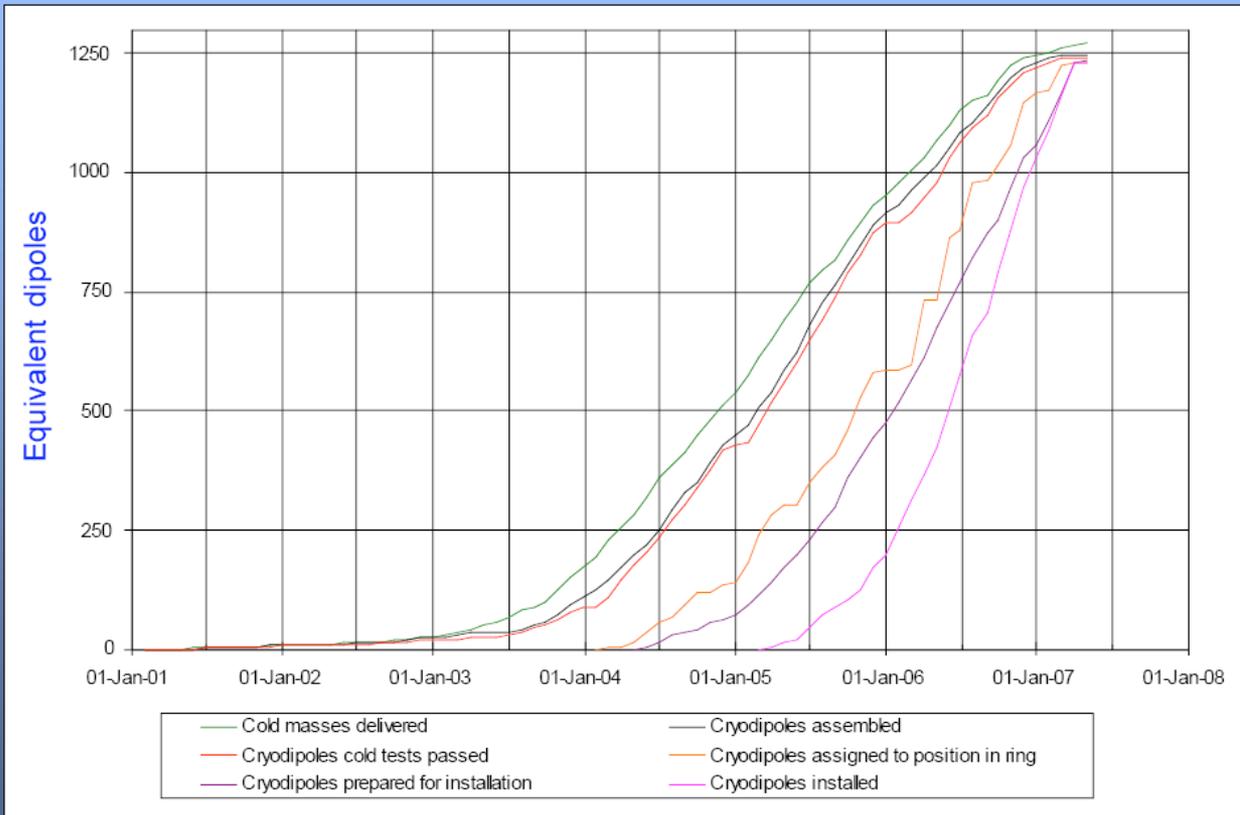
## Le premier dipôle de 15m dans le hall d'essai SM18 Mars 1998



Liège, 2 décembre 2008

33

# Cryodipôles du LHC - Tour d'horizon



Liège, 2 décembre 2008

34

## Assemblage des aimants au CERN



## Aimant – Assemblage et test des cryostats



Liège, 2 décembre 2008

36

## Descente du dernier aimant dipôle du LHC - Avril 2007



Le 26 avril, à 12 h, le dernier des 1746 aimants supraconducteurs est descendu dans le tunnel du LHC par un puits construit spécialement à cet effet.

Cet aimant dipôle, qui mesure 15 m de longueur, est l'un des 1232 dipôles positionnés le long des 27 km de circonférence du collisionneur.

Liège, 2 décembre 2008

37

# Transport souterrain



Liège, 2 décembre 2008

38

## Installation des aimants



Liège, 2 décembre 2008

39

## Interconnexion des aimants LHC dans le tunnel:

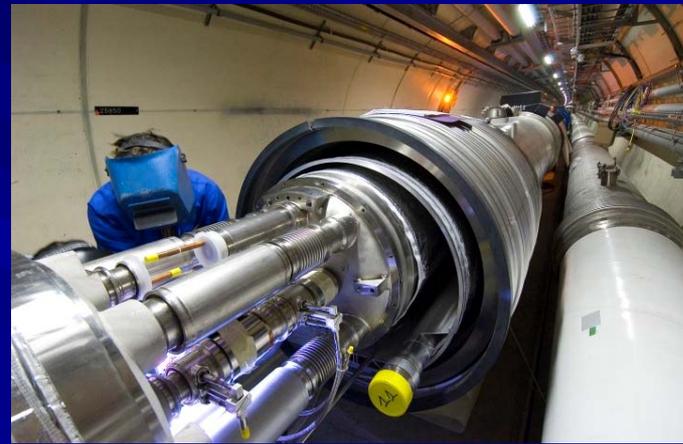


enjeux = logistique, efficacité et qualité

65 000 connexions  
électriques



40 000 soudures de conduites  
cryogéniques



1200 amenées de courant (600 A à 12 kA)  
utilisant des supraconducteurs HT<sub>C</sub>



Liège, 2 décembre 2008

41

## Installation des aimants

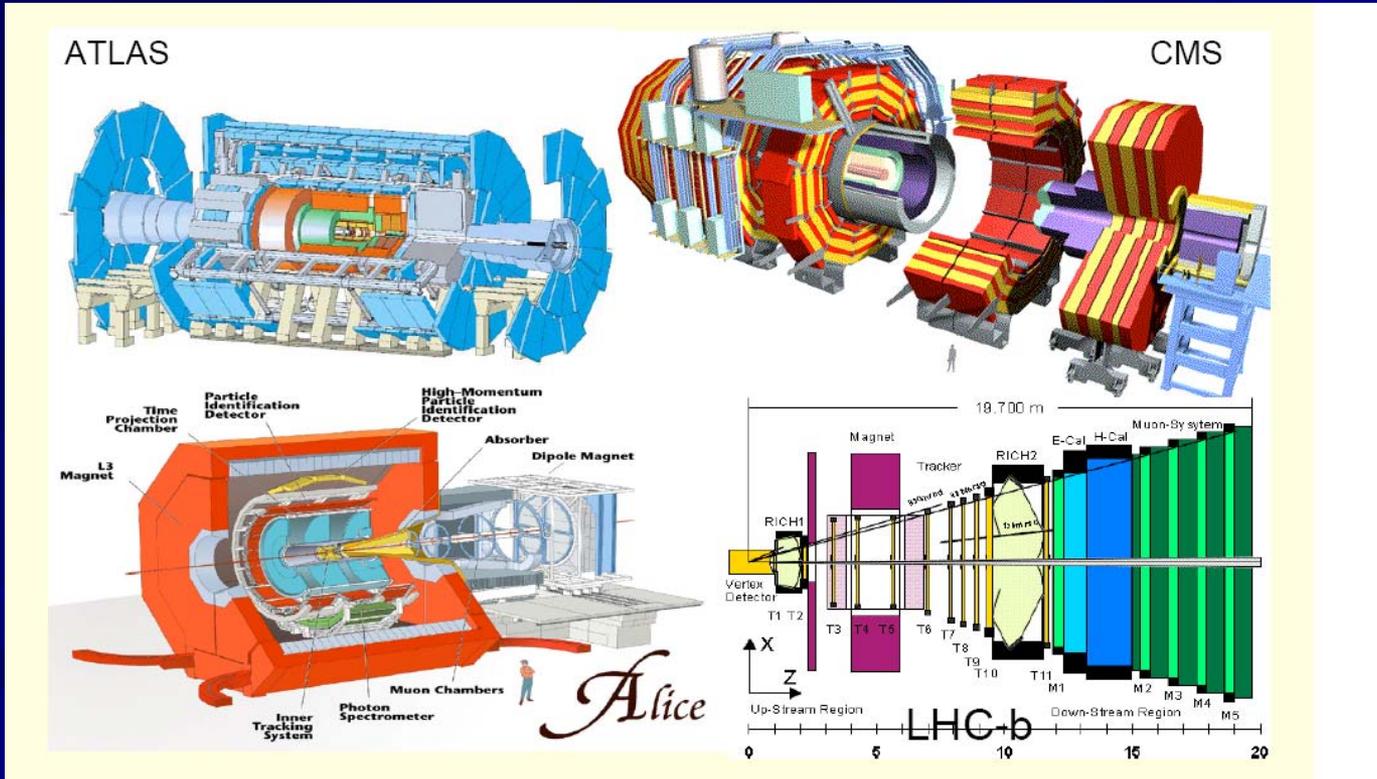


Liège, 2 décembre 2008

42



# Quatre expériences LHC

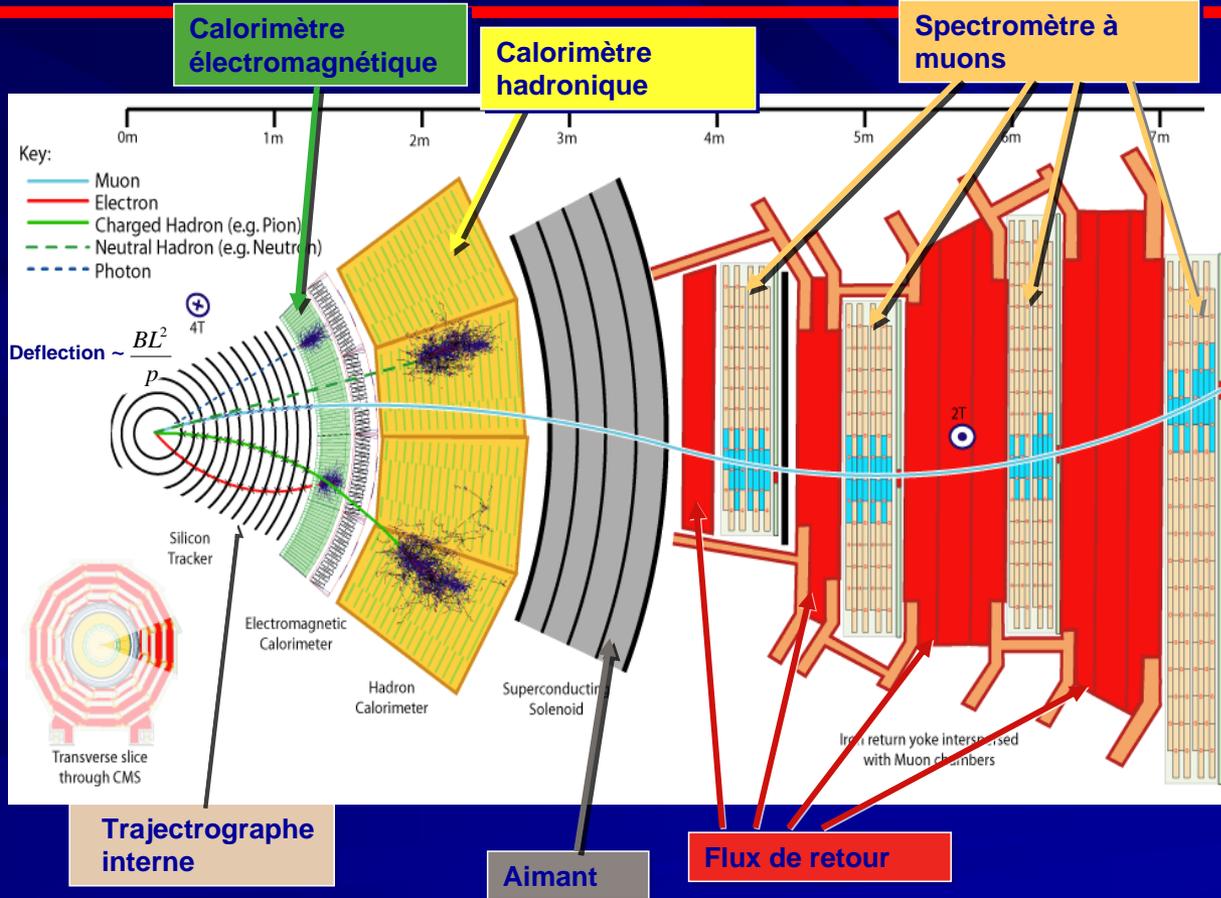


Liège, 2 décembre 2008

43

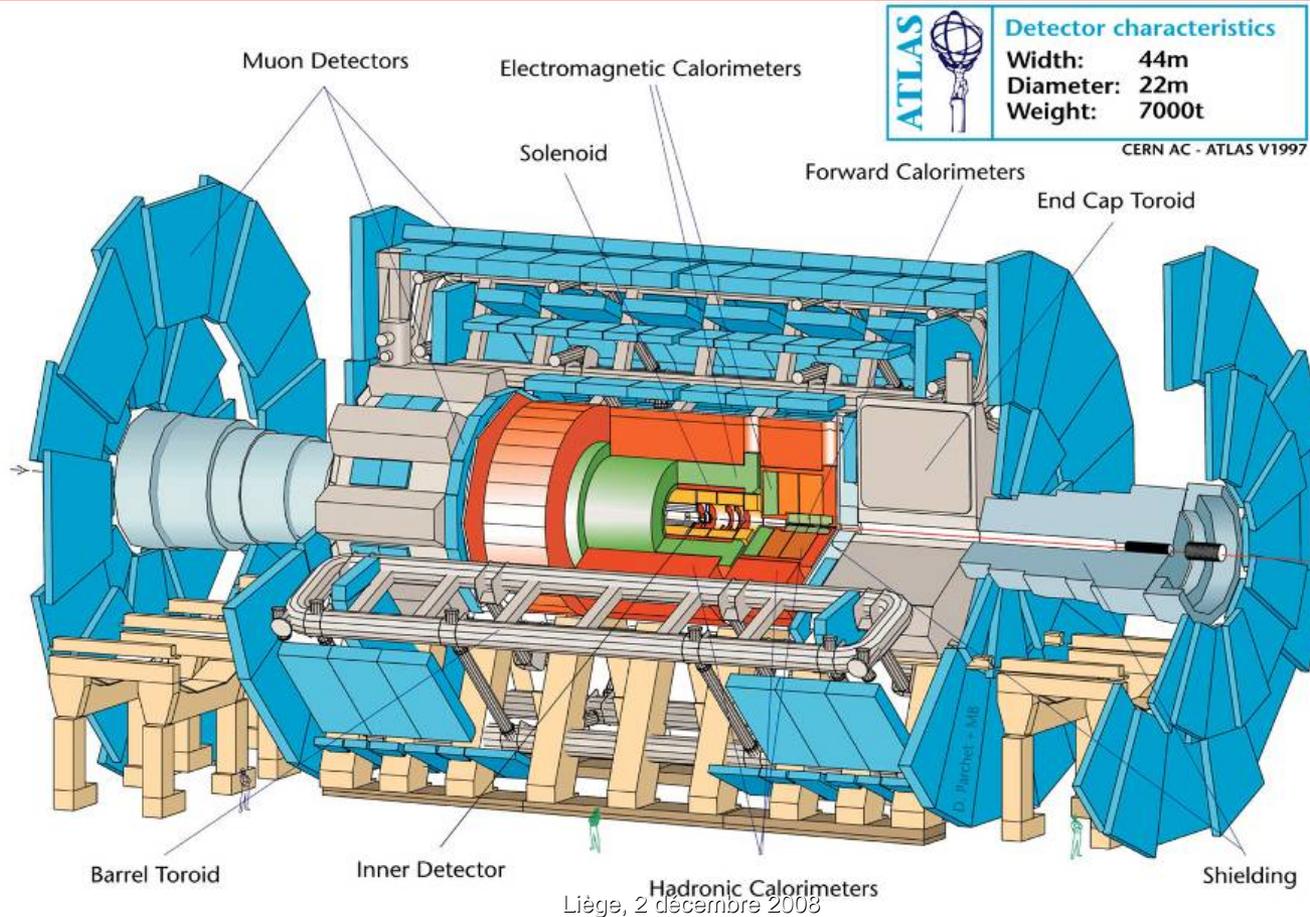


# Plus en détail (CMS)

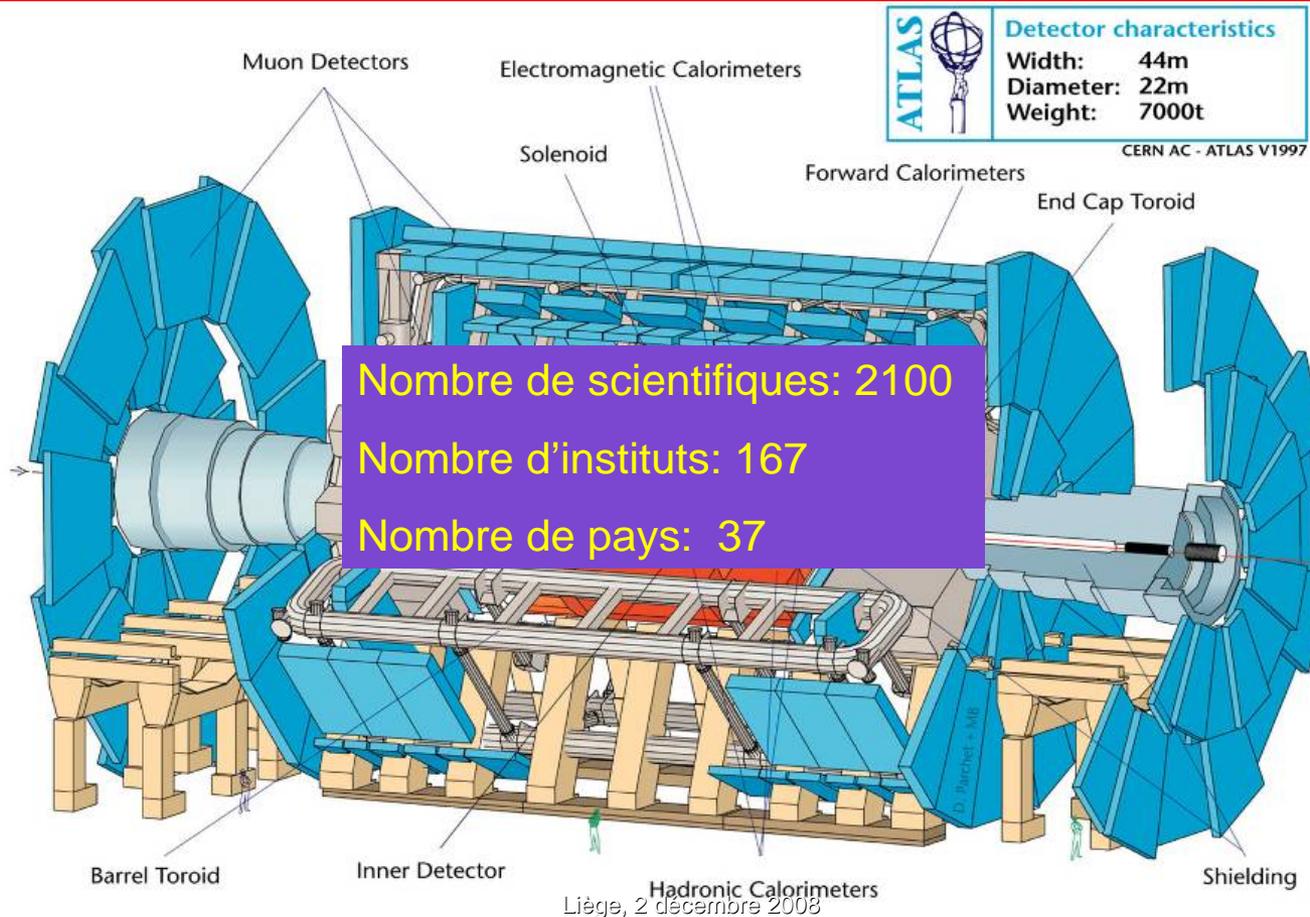


Liège, 2 décembre 2008

# ATLAS (porte-parole: Peter Jenni)



# ATLAS (porte-parole: Peter Jenni)



# Expériences menées au LHC



ATLAS, de l'intérieur à l'extérieur:

- **A l'intérieur de l'aimant 2 T:** pixels Si; microrubans Si; trajectographe à pailles (dans des milieux produisant un rayonnement de transition à  $\gamma$  élevé pour l'identification des électrons)
- **A l'extérieur:** calorimètres électromagnétiques et hadroniques (argon liquide/Pb; fer/scintillateur);
- **Système de 8 longues bobines** produisant un champ toroïdal (aimant sans culasse) et chambres à muons (à plaques résistives et à dérive)

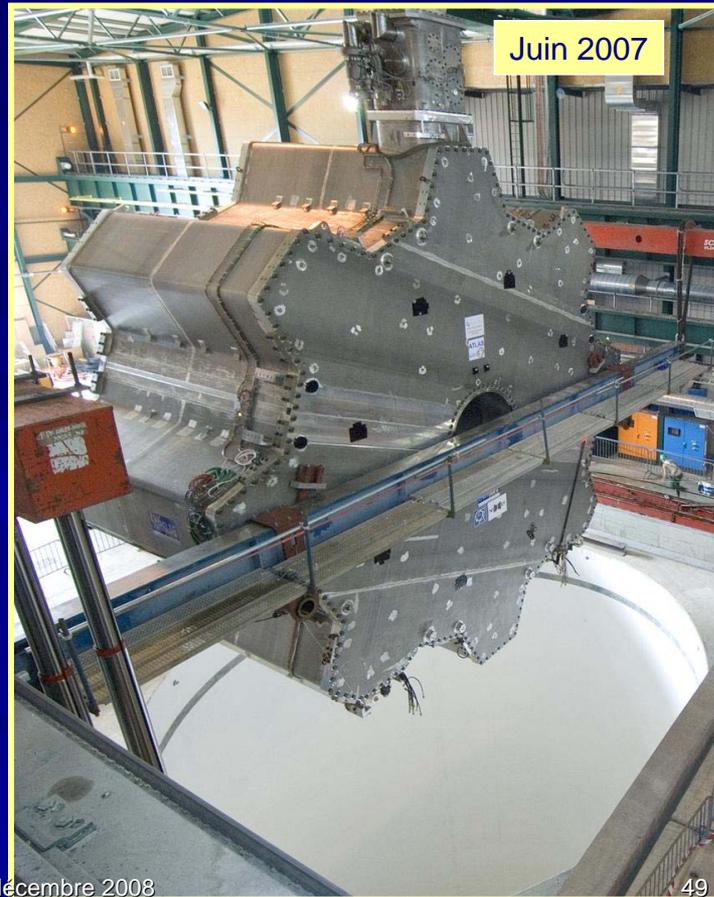


48

Liège, 2 décembre 2008

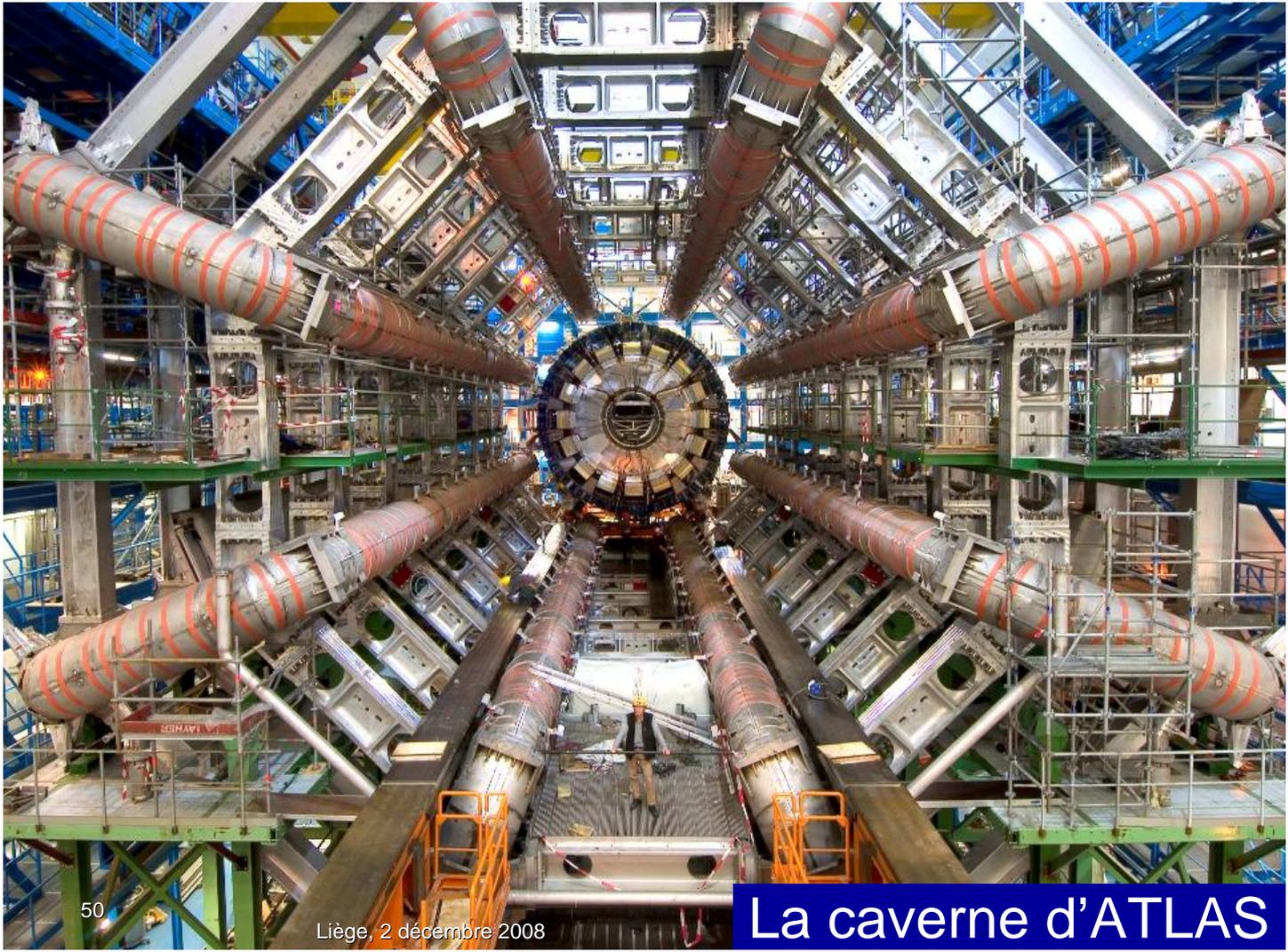
**La caverne d'ATLAS**

# ATLAS – Opérations spectaculaires



Liège, 2 décembre 2008

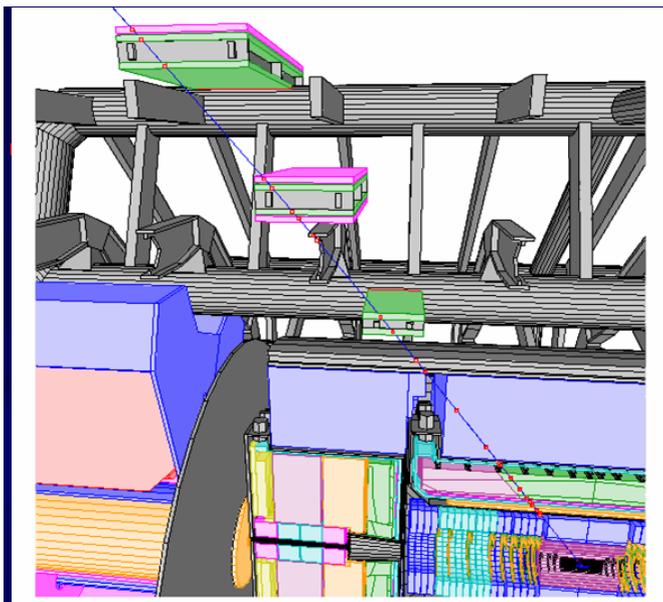
49



50

Liège, 2 décembre 2008

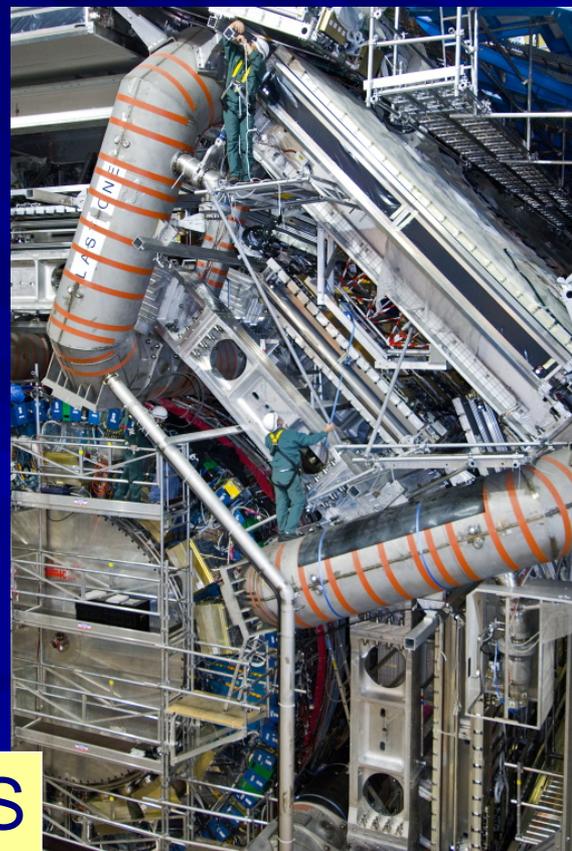
**La caverne d'ATLAS**

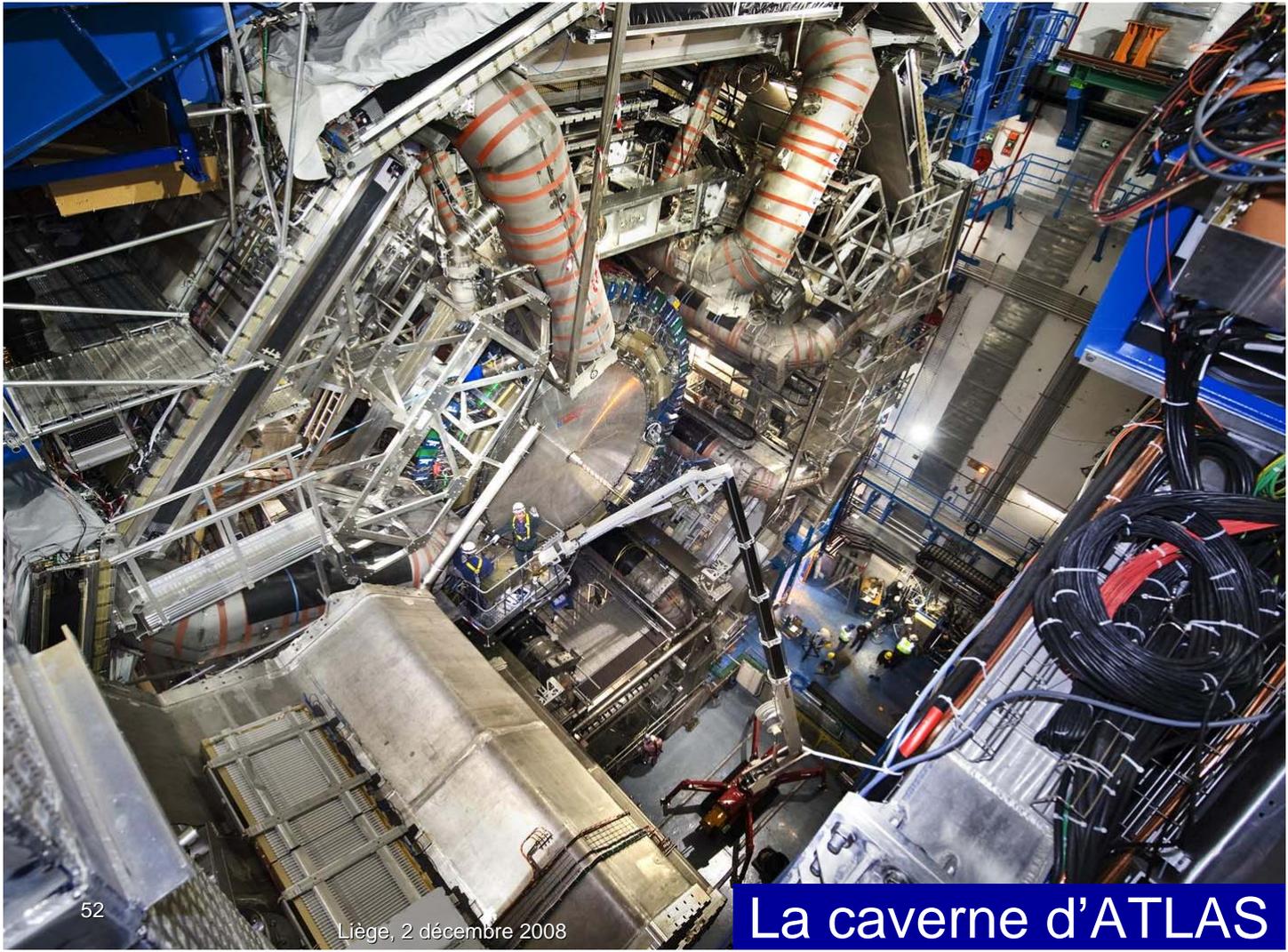


L'installation des chambres à muons du tonneau (~ 700 stations), commencée en décembre 2005, est à présent terminée.



**ATLAS**





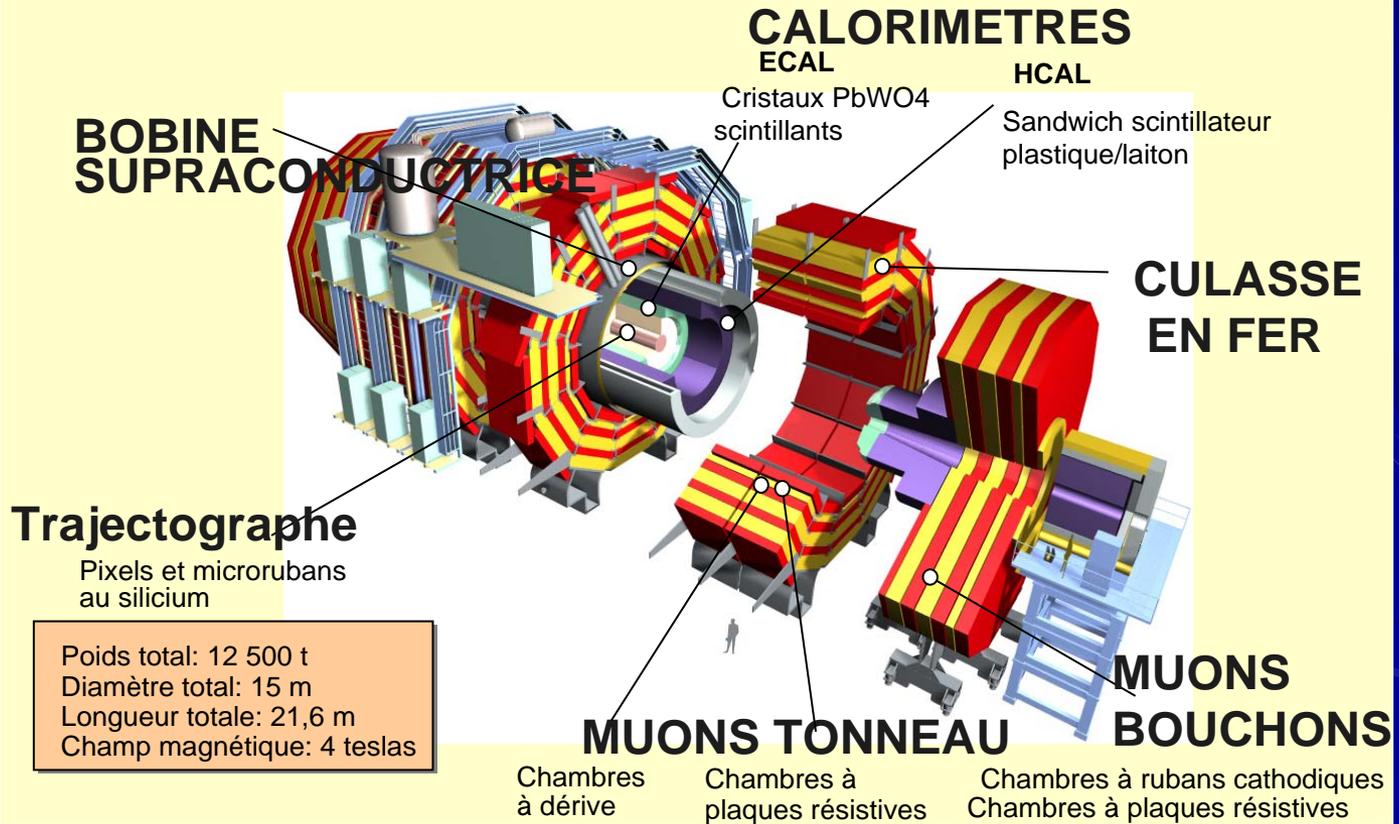
52

Liège, 2 décembre 2008

**La caverne d'ATLAS**



# Le détecteur CMS – Porte-parole: Jim Virdee

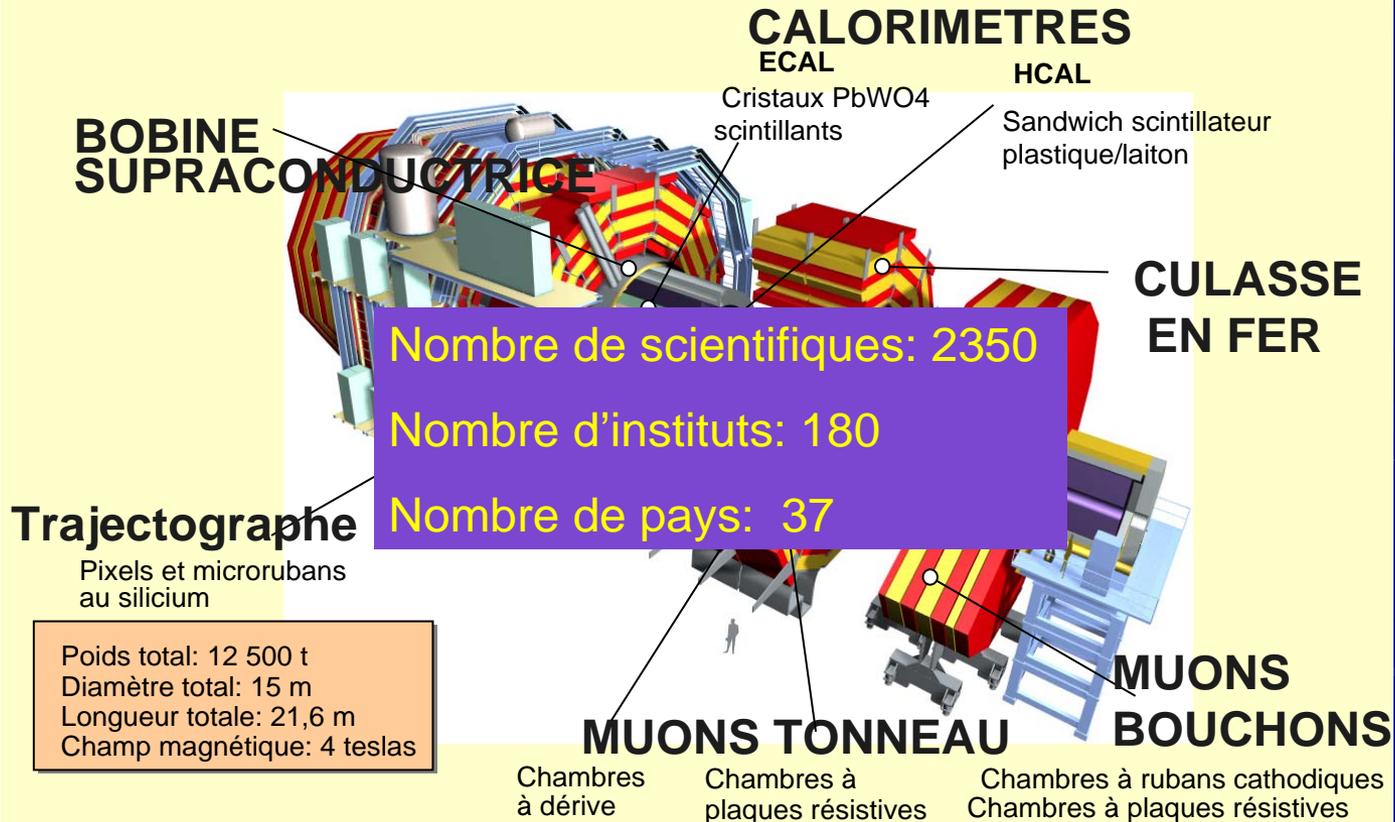


Liège, 2 décembre 2008

53



# Le détecteur CMS – Porte-parole: Jim Virdee



Liège, 2 décembre 2008

54

## Expériences menées au LHC

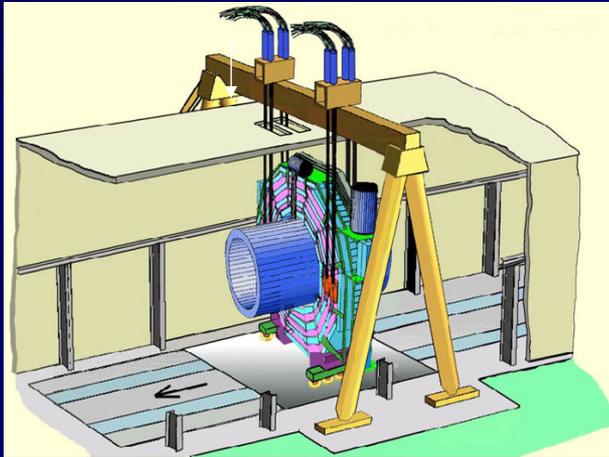


CMS est relativement compact et est construit autour d'un grand solénoïde central (ouverture de 6 m et champ de 4 T)

- **A l'intérieur:** pixels Si; microrubans Si; calorimètre électromagnétique (cristaux  $\text{PbWO}_4$ ); calorimètre hadronique (laiton/scintillateur)
- **A l'extérieur:** culasse de retour, équipée de chambres à muons (à plaques résistives et à dérive)

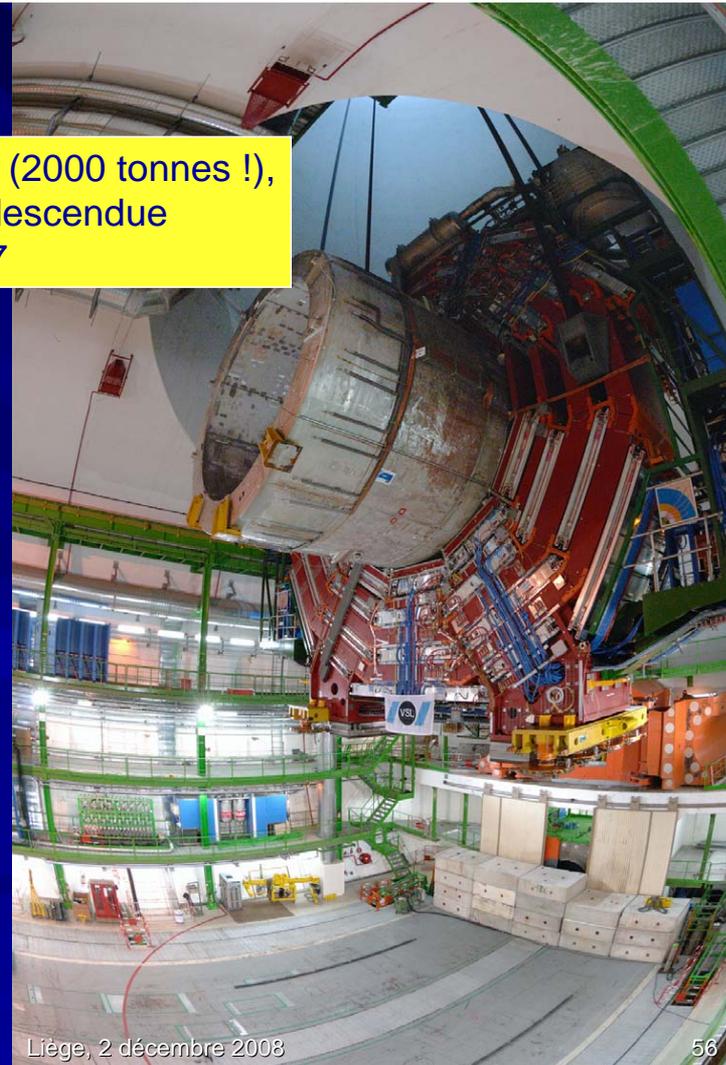
# CMS

La partie centrale de CMS, la plus lourde (2000 tonnes !), qui comprend l'aimant solénoïdal, a été descendue dans la caverne souterraine en fév. 2007



## Solénoïde de CMS :

Longueur magnétique 12,5 m  
Diamètre 6 m  
Champ magnétique 4 T  
Intensité nominale 20 kA  
Energie stockée 2,7 GJ  
Testé à pleine intensité pendant l'été 2006



CMS  
Bobine Solénoïde



Liège, 2 décembre 2008

57

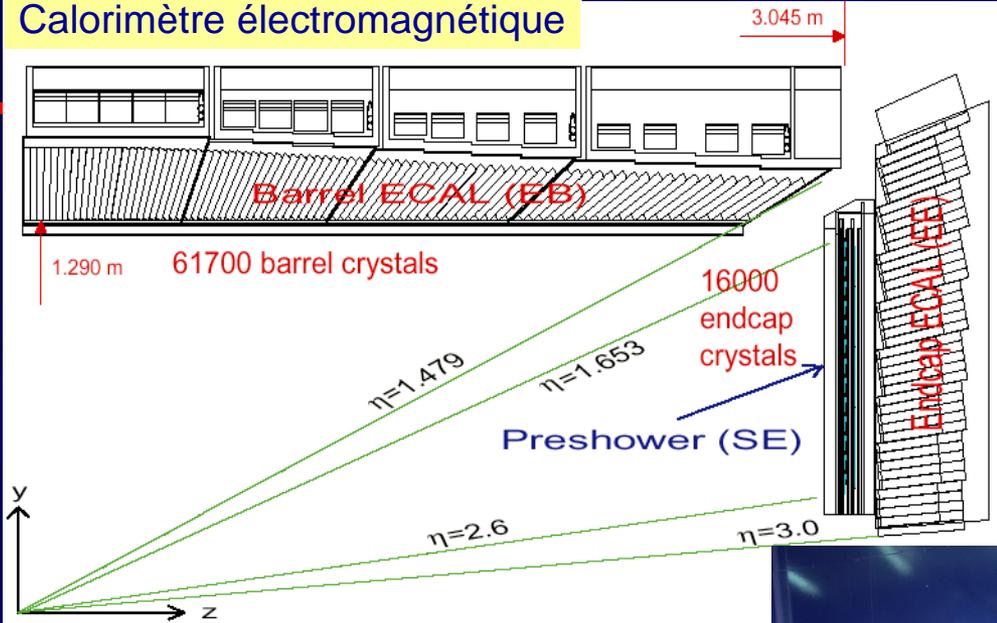
CMS  
Bobine Solénoïde pré-  
parée pour insertion  
dans son cryostat



Liège, 2 décembre 2008

58

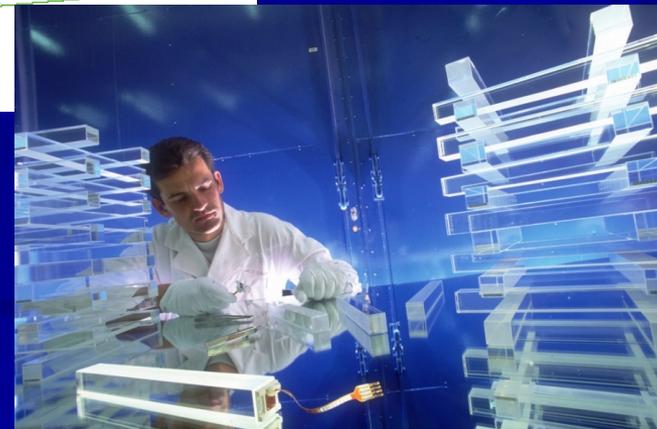
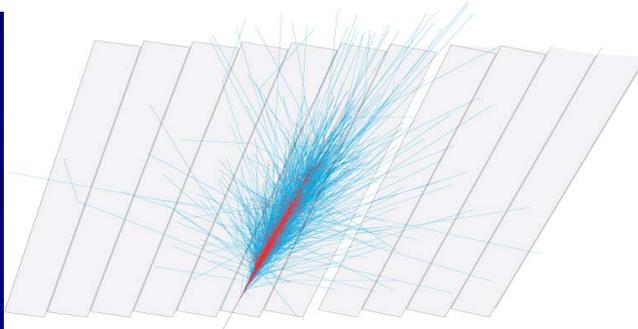
## Calorimètre électromagnétique



CMS



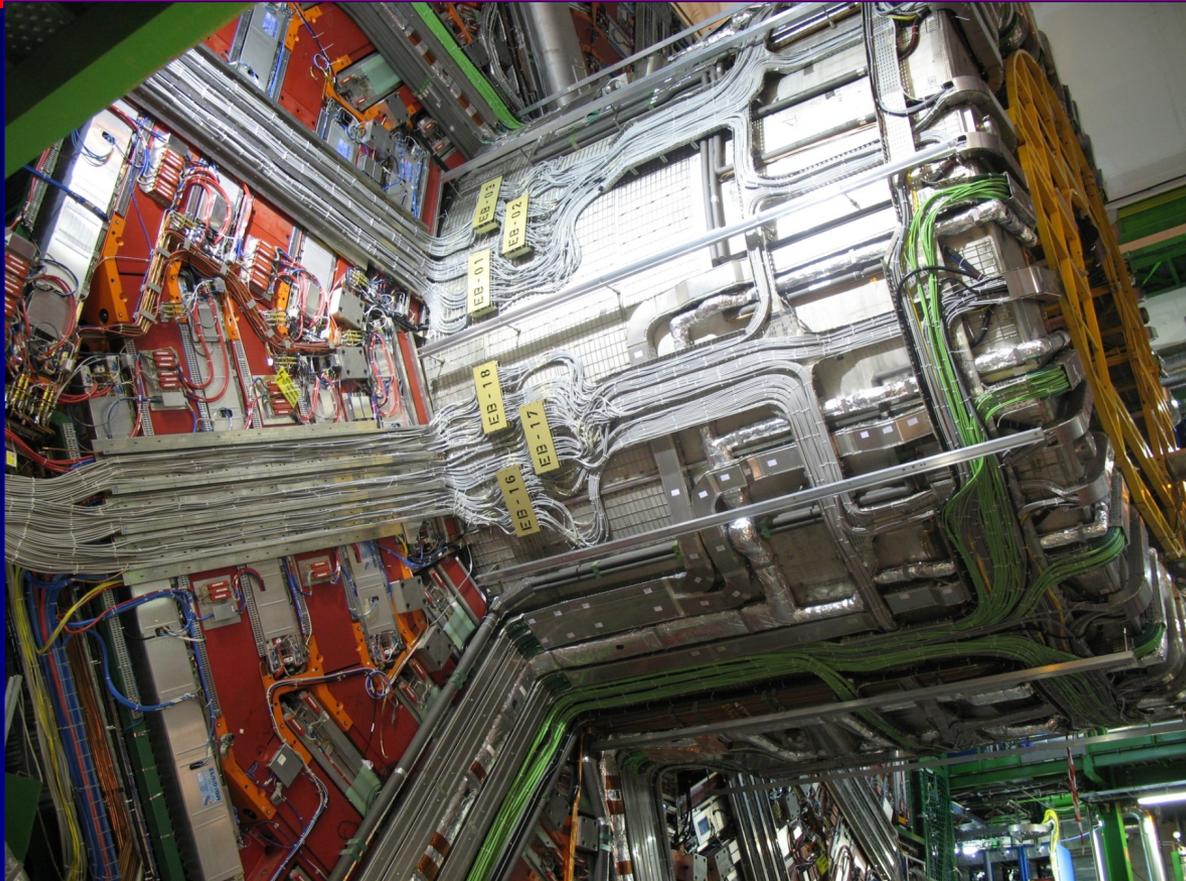
~ 80000 cristaux de  $\text{PbWO}_4$



Liège, 2 décembre 2008

59

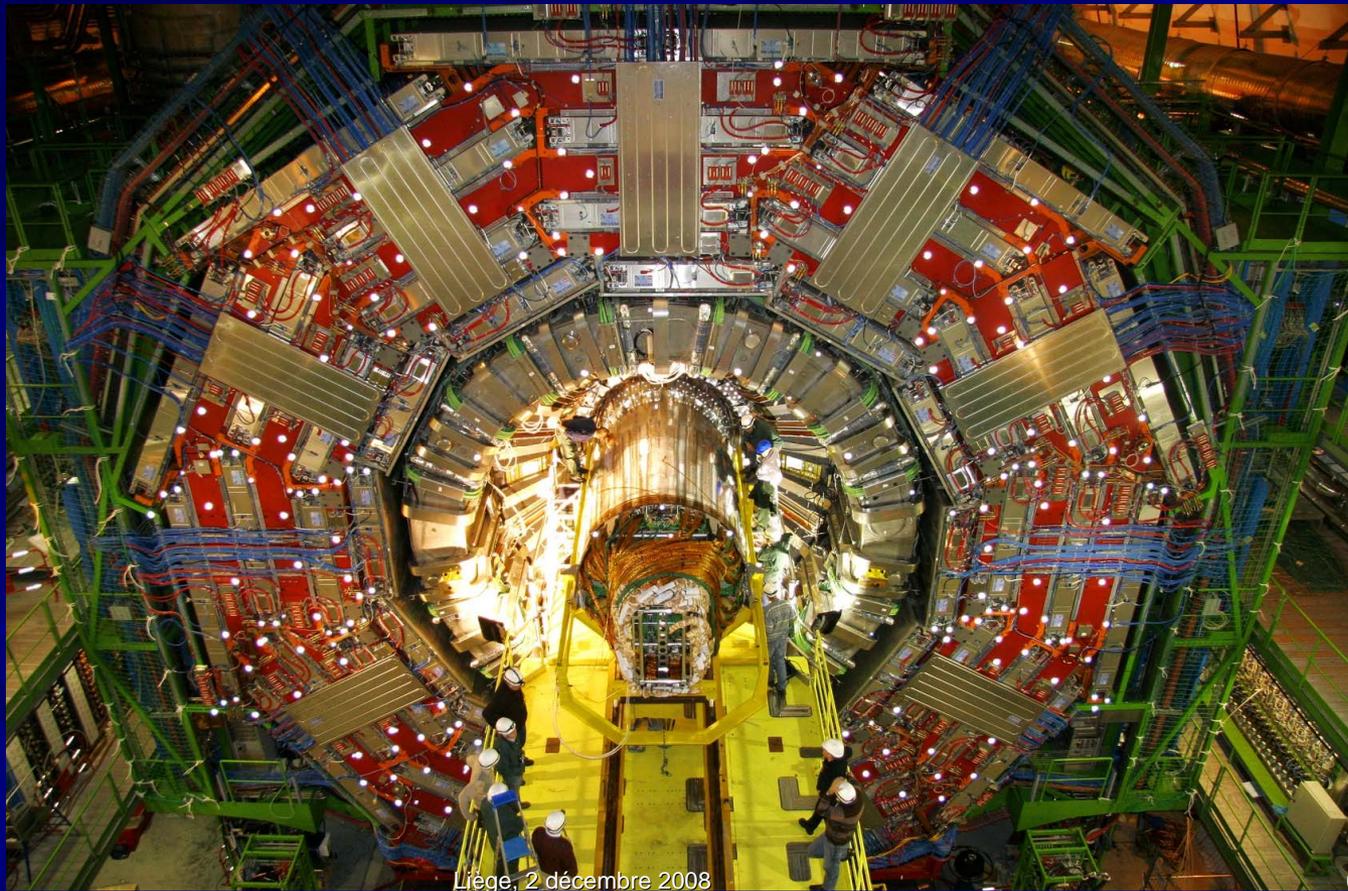
## Opérations de câblage – Un défi



Liège, 2 décembre 2008

60

# Insertion du trajectographe de CMS (15 déc. 2007)



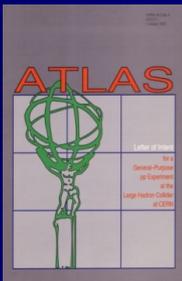
Liège, 2 décembre 2008

61



# Fondements d'ATLAS

- Longue histoire, R&D commencée à la fin des années 80
- Fusion de deux propositions de détecteur polyvalent en 1992 (Eagle, Ascot)
- Lettre d'intention ATLAS signée en 1992
- Fondements d'ATLAS définis dans le Mémoire d'accord pour la construction (MoU, RRB-D 98-44 rév.)
  - Capital pour la construction: 475 MCHF (exprimé en francs suisses ATLAS 1995; valeur de base («CORE value»)
    - 268 MCHF versés sous forme d'éléments à livrer («deliverables»)
      - Les instituts et leurs organismes de financement s'engagent à fournir une contribution en nature, reconnue comme valeur de base
      - Les éléments à livrer sont le reflet des compétences des instituts qui les fournissent
    - Les 208 MCHF restants correspondent à des éléments pris en charge en commun, répartis en proportion des éléments à livrer
      - Cela inclut des éléments comme les toroïdes tonneau et bouchons, les cryostats et la cryogénie LAr, l'accès au détecteur et les structures de support et de blindage
      - Jusqu'à présent, plus de 55% de la somme a été versée sous forme de contributions en nature
    - La valeur de base reconnue ne comprend pas l'infrastructure de l'institut ni le personnel (ce dernier étant estimé à 5 310 années-hommes)
    - A noter: ATLAS n'est pas une entité juridique. Elle dépend largement du CERN (le laboratoire hôte)
      - A ce jour, 169 instituts participants
      - 42 organismes de financement de 37 pays; le CERN est à la fois institut participant et laboratoire hôte

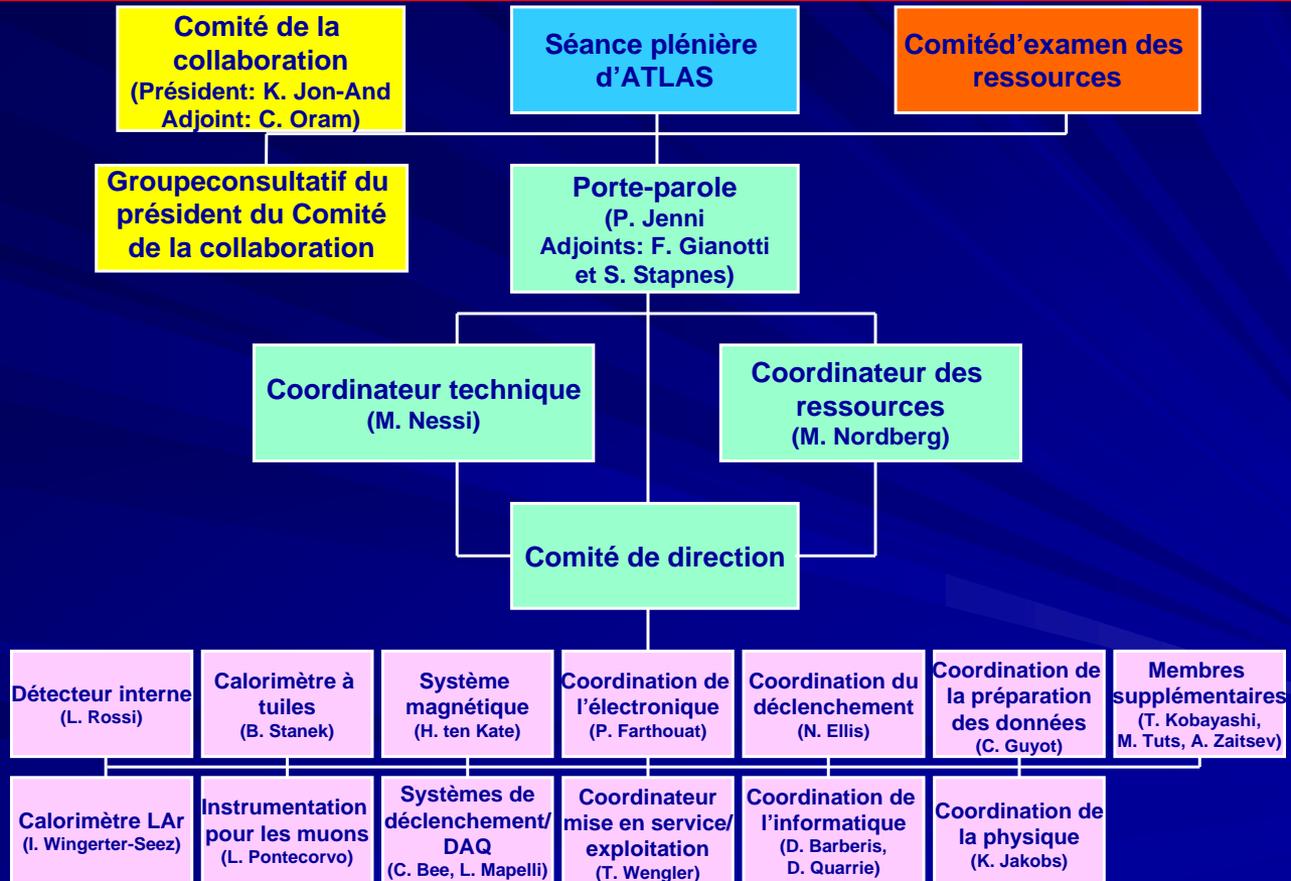


## «Philosophie» de la gouvernance d'ATLAS



- Processus démocratique («1 institut, 1 voix»)
- Le porte-parole représente la Collaboration; il ne lui impose pas sa volonté.
  - 169 instituts => aucun lien hiérarchique direct
- Recours à des coordinateurs plutôt qu'à des managers
- Nominations à court-terme (2 ans; majorité des 2/3 pour le renouvellement)
- Nominations en fonction des compétences de chaque personne plutôt que de considérations géographiques
  - A noter: le porte-parole a une certaine influence lors de la procédure de sélection du chef de projet
- Limiter au maximum les frais administratifs
- S'efforcer d'obtenir autant d'éléments à livrer/contributions en nature que possible
  - Procédures spéciales pour gérer et reconnaître les contributions
  - Répartition des risques (les organismes de financement se partagent les risques financiers)

# Organisation d'ATLAS - mars 2008



Liège, 2 décembre 2008

64



## Données du LHC

- 40 millions de collisions par seconde
- Après filtrage, 100 collisions intéressantes par seconde
- Un mégaoctet de données numérisées pour chaque collision = vitesse d'enregistrement de 0,1 gigaoctet/sec.
- $10^{10}$  collisions enregistrées chaque année = 10 pétaoctets de données par an

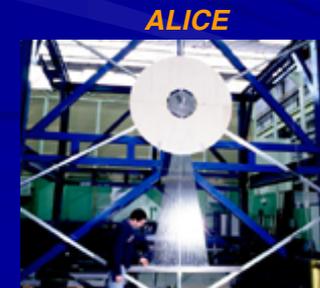
**1 mégaoctet (1Mo)**  
Une photo numérique

**1 gigaoctet (1Go)**  
= 1000Mo  
Un film sur DVD

**1 téraoctet (1To)**  
= 1000Go  
Production annuelle de livres dans le monde

**1 pétaoctet (1Po)**  
= 1000To  
Production annuelle d'une expérience LHC

**1 exaoctet (1Eo)**  
= 1000 Po  
Production annuelle d'informations à l'échelle mondiale



Liège, 2 décembre 2008



## La Grille – Qu'est-ce que c'est ?

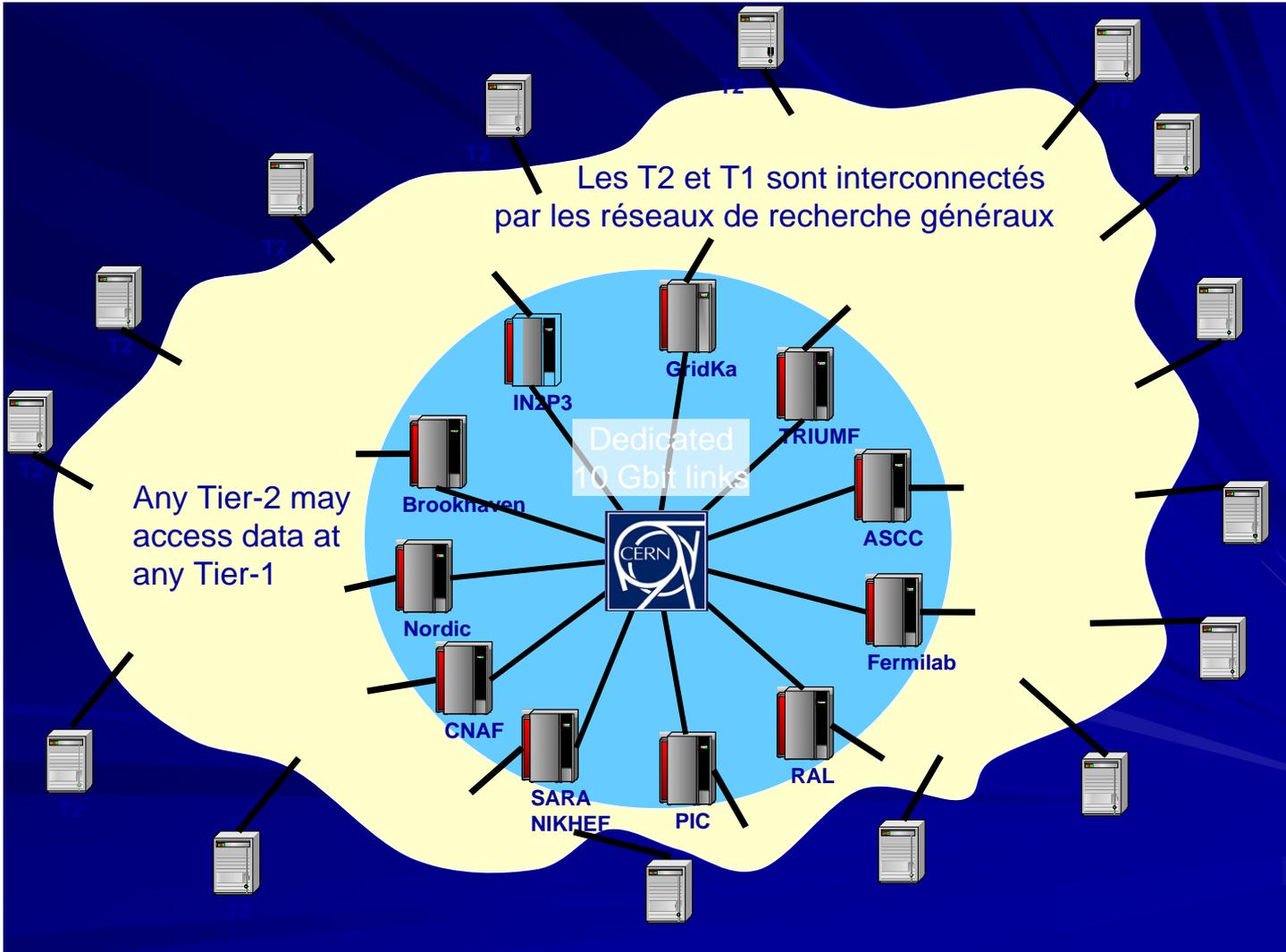


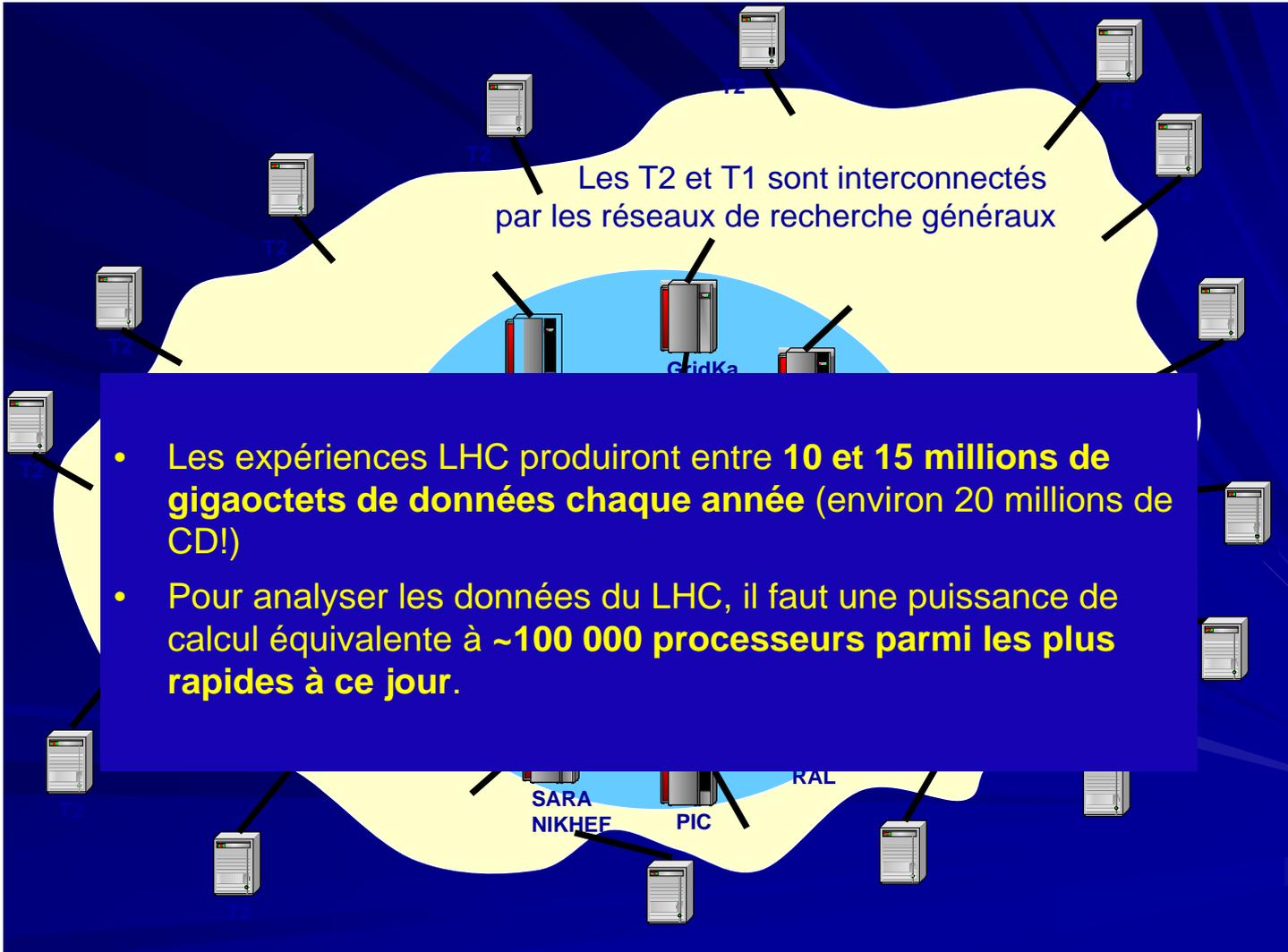
- Le World Wide Web offre un accès transparent à des informations stockées dans plusieurs endroits géographiques différents
- La Grille, elle, est une nouvelle infrastructure qui offre un accès transparent à des ressources réparties sur toute la planète pour le calcul et le stockage de données.



Liège, 2 décembre 2008

66





## La Grille de calcul mondiale pour le LHC



- Le service d'analyse des données des expériences LHC réparti dans le monde entier:
  - CERN, 11 grands centres de niveau 1, plus de 100 centres de niveau 2

### ■ Quels résultats ?

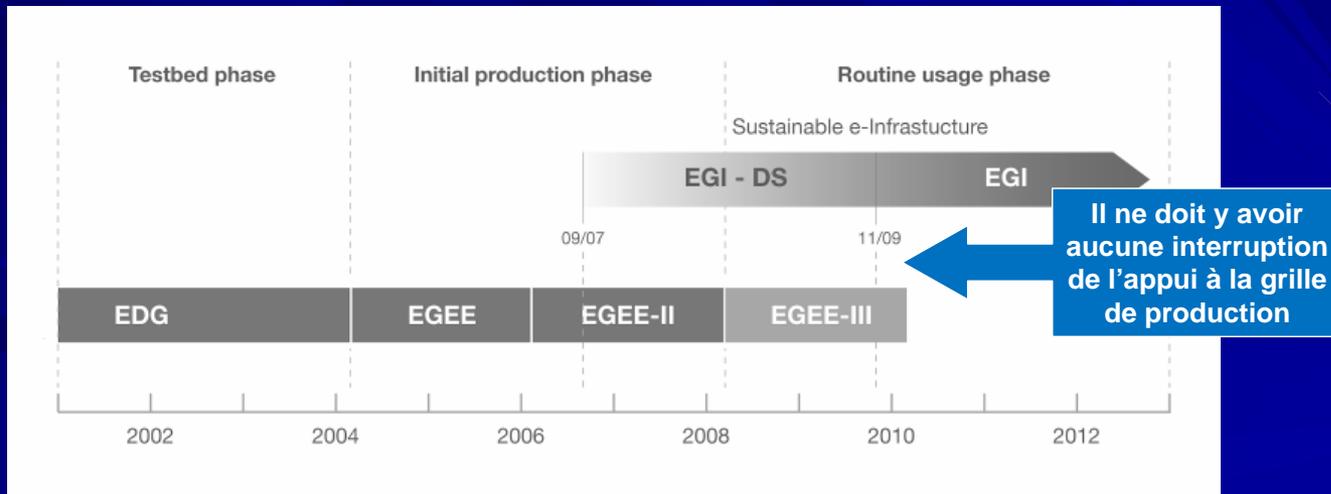
- Mise en place du réseau optique à 10 gbps entre le CERN et les centres de niveau 1
- Distribution de données depuis le CERN vers les centres de niveau 1 à 1,6 gbps – le débit requis en 2008
- Un million de tâches traitées régulièrement tous les mois à travers la grille
- Participation au service de tous les centres de niveau 1 et de la plupart des centres de niveau 2 à l'occasion des « bancs d'essai » (Data Challenges) des expériences
- **Objectifs atteints en termes de performance et de fiabilité**
- **L'exploitation distribuée de la grille, mise en place en 2005, est parvenue à maturité**





# Projet de grille européenne

- Nécessité de préparer une infrastructure de grille commune et permanente
- Assurer la viabilité à long terme de l'infrastructure électronique européenne indépendamment des cycles de financement des projets à court terme
- Coordonner l'intégration des infrastructures nationales de grille et leurs interactions
- Etre l'opérateur de l'infrastructure de grille de production au niveau européen pour tout un ensemble de disciplines scientifiques



Liège, 2 décembre 2008

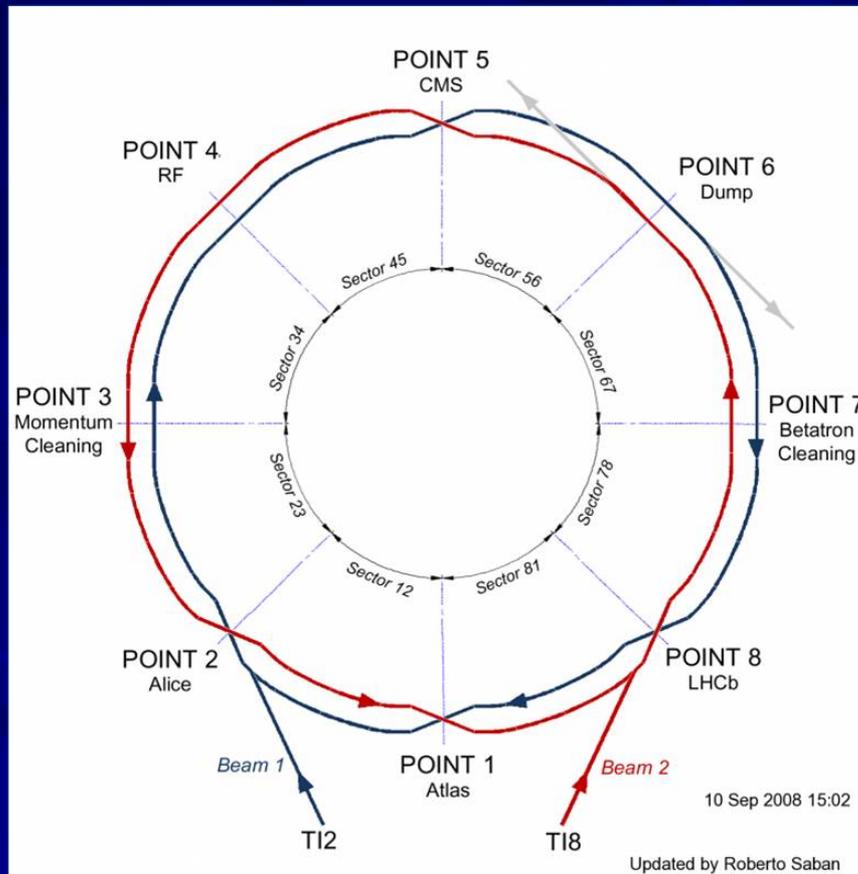
7070

# Démarrage du LHC



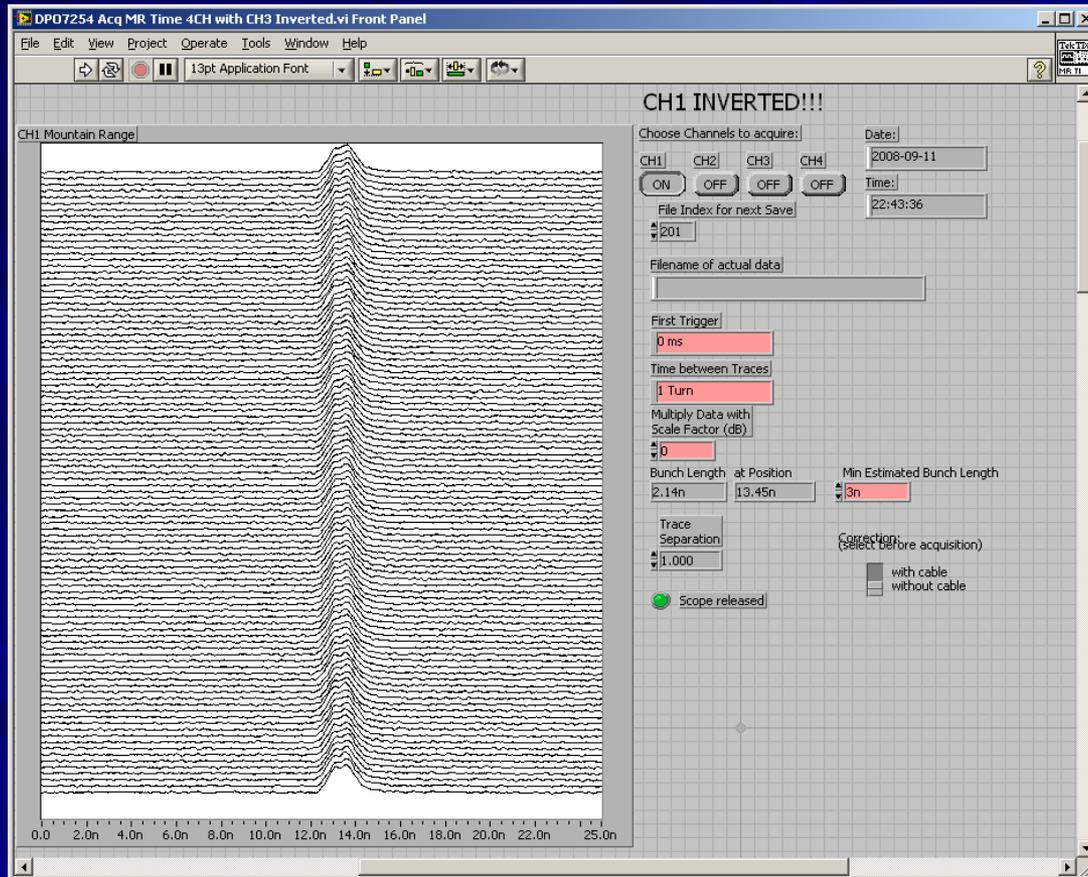
## Le démarrage du LHC a connu un magnifique début des opérations le 10 septembre 2008:

- Le faisceau a été accéléré dans les LINAC, Booster, PS, SPS jusqu'à 450 GeV pour être injecté dans le LHC
- Les lignes d'injection (TI8, TI2) ont transporté le faisceau jusqu'au LHC
- Les "kickers" d'injection ont envoyé le faisceau dans le LHC
- **les faisceaux ont circulé**, dans les deux sens, pour la première fois et sous les yeux du monde entier, en l'espace de quelques heures
- Les **expériences LHC**, terminées et opérationnelles comme prévu, ont enregistré immédiatement des données en lien avec les faisceaux
- La **Grille de calcul mondiale (LHC)** était prête et opérationnelle
- **le succès du premier faisceau du LHC est le témoignage des années de minutieuse préparation et de la compétence des équipes impliquées dans la construction et l'exploitation des accélérateurs du CERN**
- **Chacun dans le domaine a été impressionné par le contrôle rapide de la trajectoire du faisceau, un témoignage de la qualité du software and des tests précédents**



Liège, 2 décembre 2008

# Capture with optimum injection phasing, correct reference



Liège, 2 décembre 2008

73



# Les diverses étapes jusqu'à la luminosité nominale

## Beam commissioning

Beam commissioning will proceed in phases with increased complexity:

- Number of bunches and bunch intensity.
- Crossing angle (start without crossing angle !).
- Less focusing at the collision point (larger ' $\beta^*$ ').

Parameter	Phase A	Phase B	Phase C	Nominal
k / no. bunches	43-156	936	2808	2808
Bunch spacing (ns)	2021-566	75	25	25
N ( $10^{11}$ protons)	0.4-0.9	0.4-0.9	0.5	1.15
Crossing angle ( $\mu\text{rad}$ )	0	250	280	280
$\sqrt{\beta^*/\beta_{\text{nom}}^*}$	2	$\sqrt{2}$	1	1
$\sigma^*$ ( $\mu\text{m}$ , IR1&5)	32	22	16	16
L ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$6 \times 10^{30} - 10^{32}$	$10^{32} - 10^{33}$	$(1-2) \times 10^{33}$	$10^{34}$

## Incident du 19 septembre



- Pendant le commissioning du dernier secteur à 5 TeV, un incident a provoqué une grande fuite d'hélium dans le tunnel.
- La cause est une connexion électrique défectueuse entre deux aimants.
- Le temps nécessaire au réchauffement du secteur, réparations et refroidissement ne permettra pas un redémarrage avant la période annuelle de fermeture des installations du CERN.
- Après réchauffement du secteur 3-4, les aimants dans la zone affectée pourront être déconnectés et leur inspection permettra de définir les réparations et nettoyage à effectuer.
- **L'Inauguration a eu lieu le 21 octobre 2008**

## Le calendrier des Experiences



- L'incident qui s'est produit le 19 septembre est sans doute un coup dur psychologique mais nous surmonterons sans aucun doute cet obstacle avec la même rigueur et la même diligence.
- Nous avons reçu de nombreux messages de sympathie et de soutien, en particulier de laboratoires américains (Fermi et BNL), de KEK au Japon et de BNIP en Russie, tous prêts à aider, et de sous-traitants tels que Air Liquide
- Le LHC reprendra ses activités dès le printemps 2009. L'entretien des infrastructures du CERN dans la zone nord débutera le 6 Octobre afin de pouvoir redémarrer l'Accélérateur en avril 2009 (et non pas en juin comme prévu)
- Les expériences seront mises en mode "long shutdown", pour être prêtes à nouveau dès le début du printemps 2009: la date exacte sera déterminée en commun dès que cela sera possible
- La plupart des expériences ont établi un programme de travail utile et/ou indispensable de 4-5 mois : réparations, rénovations, améliorations, et des travaux d'installations supplémentaires

## Stratégie d'ATLAS pour l'expérimentation (très similaire à celle de CMS)



### Avant que la prise de données ne commence:

- Contrôles stricts de la qualité de la construction du détecteur pour respecter les spécifications de l'expérimentation
- Essais avec faisceaux (15 ans de travaux qui ont abouti à des **essais combinés avec faisceaux en 2004**) pour comprendre et étalonner (une partie) du détecteur et valider/ ajuster les outils logiciels (p.ex. simulation Geant4)
- Simulations détaillées d'un détecteur en condition réelle « tel que construit et installé » (défauts d'alignement, manque d'uniformité des matériaux, canaux morts, etc.) → test et validation des stratégies d'étalonnage/d'alignement
- Mise en service de l'expérience avec des rayons cosmiques dans la caverne souterraine

Stade  
actuel

### Avec les premières données:

- Mise en service/étalonnage du détecteur et déclenchement in situ en conditions d'expérimentation (biais min.,  $Z \rightarrow ll$ , ...)
- « Redécouvrir » le modèle standard, le mesurer à  $\sqrt{s} = 14$  TeV (biais minimum, W, Z, tt, jets QCD, etc.)
- Valider et ajuster les outils (p. ex. générateurs MC)
- Mesurer les principaux bruits de fond de la Nouvelle physique (W/Z+jets, tt+jets, multijets QCD,...)



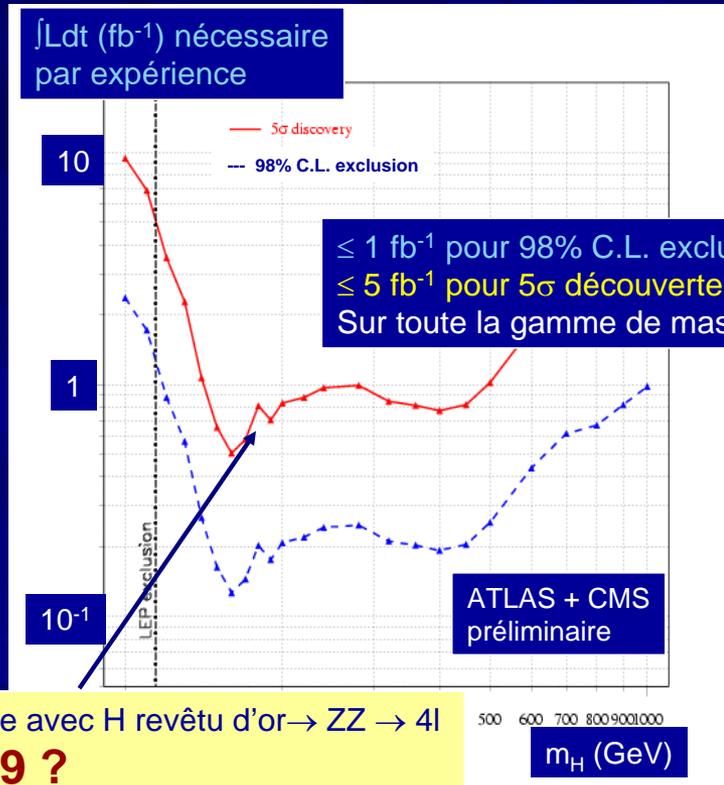
**ouvrir la voie aux découvertes ...**

Liège, 2 décembre 2008

77



# Le Higgs du Modèle standard à ATLAS et CMS



Ici découverte plus facile avec H revêtu d'or → ZZ → 4l  
 → d'ici à fin 2009 ?

# Première phase d'exploitation du LHC



**D'ici environ un an, la physique des particules entrera dans une nouvelle ère, probablement la plus glorieuse et la plus féconde de son histoire.**

Une machine pouvant sonder l'échelle prometteuse du TeV devrait nous fournir une profusion de résultats avec un potentiel direct de découvertes jusqu'à  $\approx 5-6$  TeV

- **Le LHC devrait trouver la nouvelle physique, si elle existe, (SUSY devrait être découverte rapidement; il faudra un peu plus de temps pour les Higgs légers ... sans compter les éventuelles surprises !)**
- Il fera la lumière sur le mécanisme du Higgs du MS et de nombreuses prédictions à l'échelle du TeV
- **Il pourrait apporter des éléments clés à notre connaissance de la physique fondamentale → impact sur l'astrophysique des particules et sur la cosmologie**
- Surtout, il nous indiquera la voie à suivre...

## Sommaire



- Le CERN: des installations au service de la communauté européenne des physiciens des particules, devenant un laboratoire « mondial ».
- Le projet LHC: une progression unique et nécessaire pour la PHE - deux accélérateurs, quatre expériences et une grille de calcul mondiale.
- Projets du CERN pour la prochaine décennie – le S-LHC et le CLIC (Collisionneur linéaire  $e^+e^-$  de plusieurs TeV). 

## La stratégie européenne pour la physique des particules Activités scientifiques



**En 2006, un groupe consultatif scientifique ad hoc a défini les orientations stratégiques dans un document.**

**La nouvelle stratégie européenne pour la physique des particules a été approuvée à l'unanimité lors d'une session spéciale du Conseil à Lisbonne (14 juillet 2006)**

La priorité absolue est d'exploiter pleinement le potentiel du LHC. Il faut obtenir les ressources nécessaires pour achever le programme initial afin que la machine et les expériences puissent être exploitées de manière optimale à leur performance nominale.

- La R&D pour la machine et les détecteurs doit être activement poursuivie et organisée de manière centralisée dans la perspective d'un relèvement de la luminosité d'ici à 2015 environ.
- Un programme coordonné devrait être intensifié afin de développer la technologie du CLIC et les aimants haute performance des futurs accélérateurs, et de s'assurer un rôle clé dans l'étude et le développement d'une installation neutrino haute intensité.
- L'activité européenne (et du CERN) relative au Projet mondial de conception (GDE) doit être vigoureuse et bien coordonnée pour que les études de conception et de développement technique devant mener à une décision quant à la construction permettent au Conseil de procéder à une nouvelle évaluation autour de 2010.
- Le Conseil œuvrera activement en faveur d'une participation coordonnée de l'Europe à un programme neutrino mondial.

## Specific programme "Capacities" - Research Infrastructures



FP7 projects selected in 2007-2008 to be delivered in 3-4 years  
 Preparatory Phase projects (PPP), Design Studies (DS) and Integrating Activities (IA)

Project acronym	Full title	Coordinator	EU funding (total)	EU funding for CERN
<b>SHLC</b> (PPP)	Preparatory Phase of the Large Hadron Collider Upgrade	CERN	5,200 k€	3,020 k€
<b>ILC-HiGrade</b> (PPP)	ILC and High Gradient Superconducting RF Cavities	DESY	5,000 k€	350 k€
<b>EuroNu</b> (DS)	High Intensity Neutrino Oscillation Facility in Europe	RAL-STFC	4,000 k€	620 k€
<b>EuCARD</b> (IA)	European Coordination for Accelerator Research and Development	CERN	10,000 k€	2,280 k€
<b>ULICE</b> (IA)	Union of Light Ion Centres in Europe	CNAO	8,400 k€	820 k€

## Programme d'augmentation de la luminosité du LHC (SLHC)

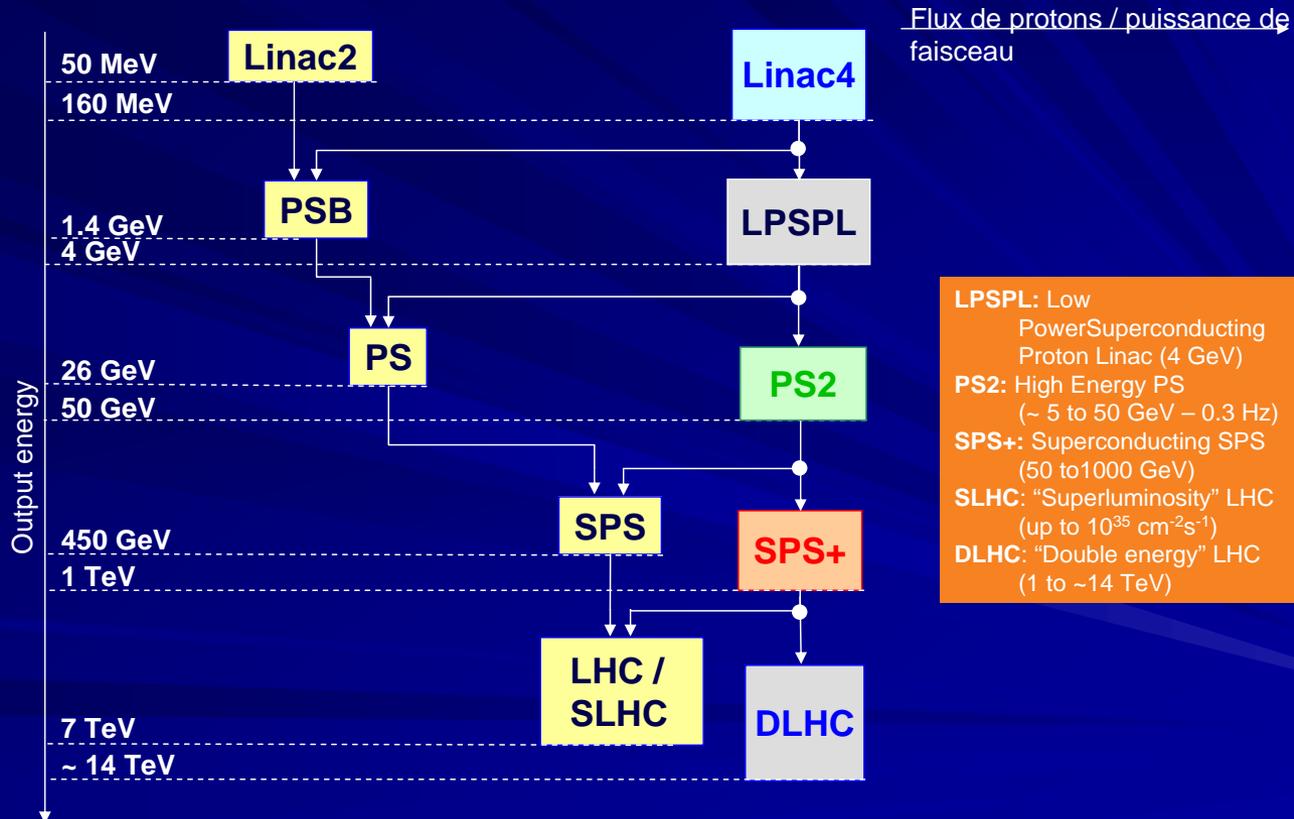


1. L'utilité/utilisation du SLHC dépendra évidemment de la manière dont se manifesteront la brisure de la symétrie électrofaible et/ou la nouvelle physique au LHC.
2. Une prochaine étape à la frontière des hautes énergies pourrait être un collisionneur de hadrons de très haute luminosité à l'énergie du LHC (SLHC)
  - statistiques plus élevées
  - accès plus étendu aux masses

Cela exigera d'importantes modifications du système d'injection et du matériel LHC ainsi que de nouveaux travaux de R&D sur les détecteurs (irradiation plus forte des trajectographes).

3. L'exploitation efficace du LHC exige la consolidation des injecteurs, en particulier du Synchrotron à protons (1959).

# Éléments d'amélioration



**LPSPL:** Low Power Superconducting Proton Linac (4 GeV)  
**PS2:** High Energy PS (~ 5 to 50 GeV – 0.3 Hz)  
**SPS+:** Superconducting SPS (50 to 1000 GeV)  
**SLHC:** "Superluminosity" LHC (up to  $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )  
**DLHC:** "Double energy" LHC (1 to ~14 TeV)



# Projets de collisionneurs linéaires

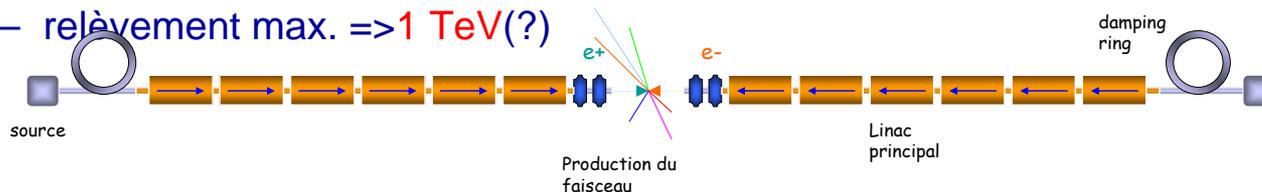
La nouvelle physique devrait se situer dans la gamme du TeV. Le LHC la circonscrit et établira son échelle d'énergie. Un collisionneur linéaire  $e^+e^-$  serait idéal pour des expériences sondant la physique au-delà du modèle standard. Deux options s'offrent selon l'échelle d'énergie de la nouvelle physique :

jusqu'à 1 TeV

- ILC (Collisionneur linéaire international)
  - technologie **supraconductrice**
  - fréquence RF 1,3 GHz
  - gradient accélérateur  $\sim 31$  MV/m
  - énergie au centre de masse **500 GeV**
  - relèvement max.  $\Rightarrow$  **1 TeV(?)**

plusieurs TeV

- CLIC (Collisionneur linéaire compact)
  - technologie **résistive**
  - **12 GHz**
  - **$\sim 100$  MV/m**
  - **gamme d'énergie multi-TeV (nom. 3 TeV)**



Liège, 2 décembre 2008

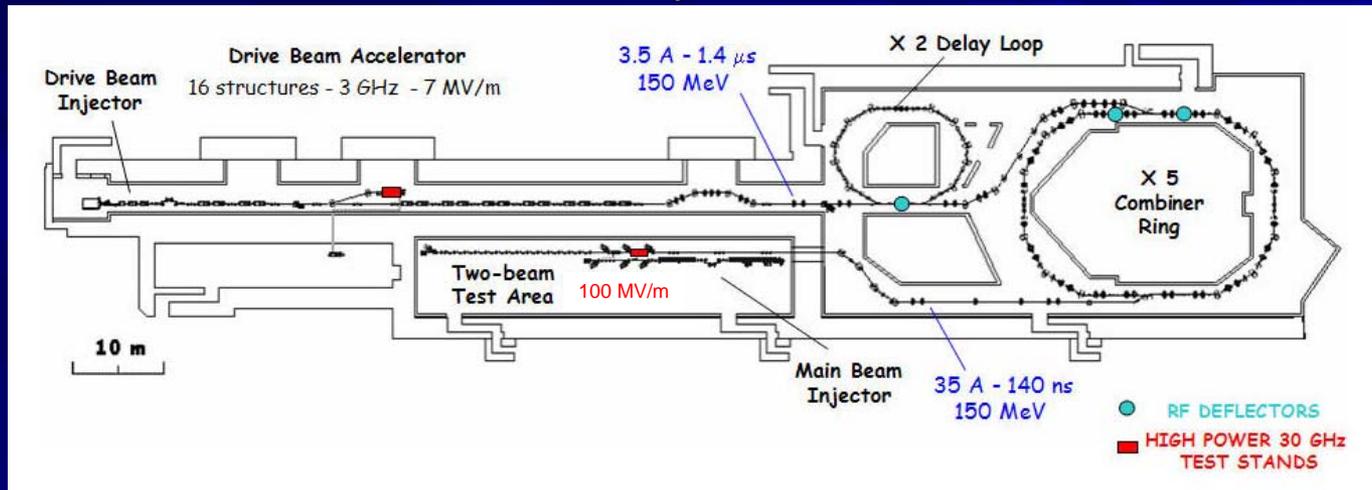
85



## Installation d'essais de CLIC: CTF3

CTF3 conçue pour tester tous les aspects clés de la technologie CLIC

But : valider le concept du CLIC d'ici à 2010



aspects  
clés

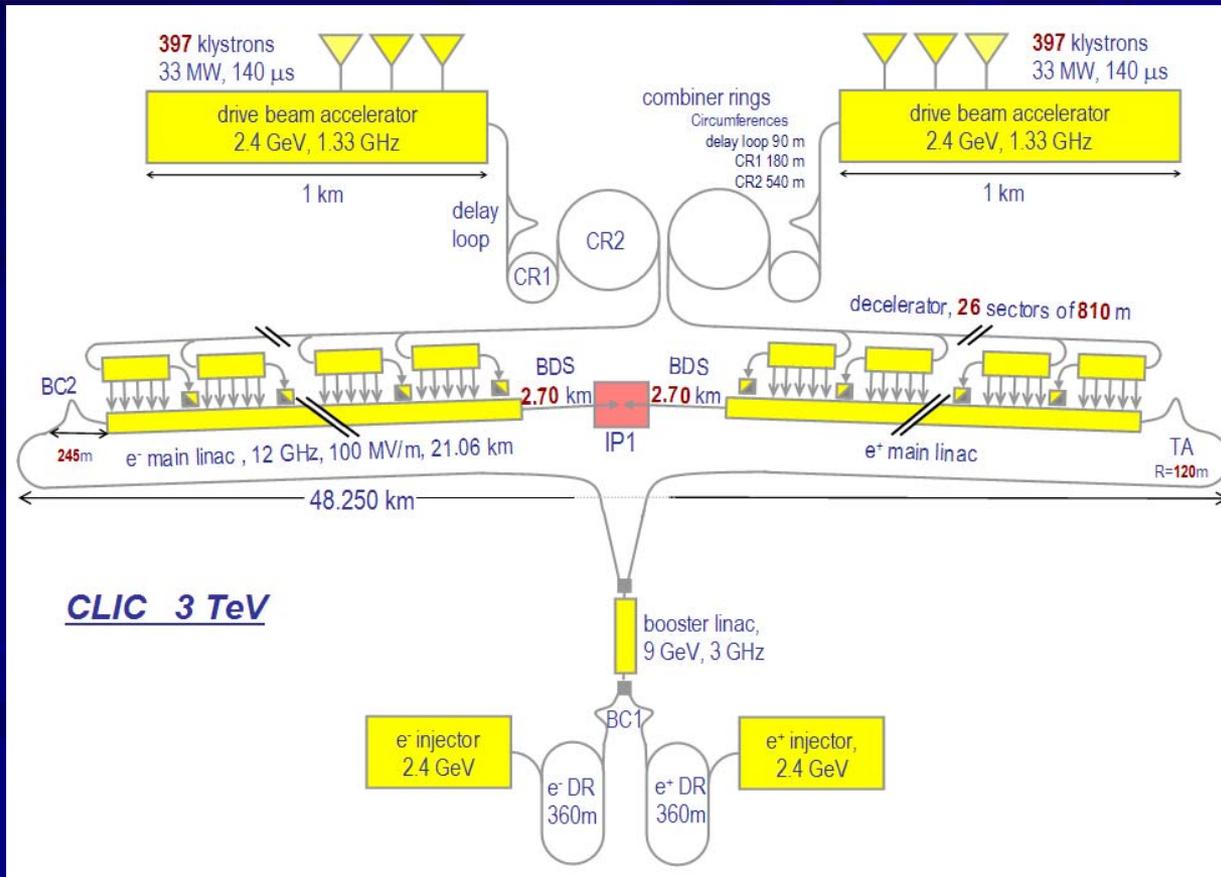
- depuis 2005: structures accélératrices (bimétalliques) développ. & essais
  - 2007- 2008: système de production d'un faisceau d'entraînement
  - 2008- 2009: structure accélératrice amortie avec paramètres nominaux
- ON/OFF structure d'extraction de puissance**  
**Etalonnage de la stabilité du faisceau d'entraînement**  
**Sous-système CLIC**

Liège, 2 décembre 2008

86



# CLIC – Vue d'ensemble



**CLIC 3 TeV**

Liège, 2 décembre 2008

87

## Conclusions



Les membres du Conseil CERN Council et les représentants des Pays membres (MS) ont reconnu nos efforts et résultats et se sont mis d'accord pour :

- Une situation financière “extrêmement critique” du CERN de 2008 à 2011, liée au remboursement des prêts bancaires importants pour la construction du LHC
- La demande pour des ressources supplémentaires par le Management:
  - Réduction des effectifs à 2250 en 2008 et le complément maintenu constant jusqu'à 2011
  - Une contribution financière supplémentaire de 240 MCHF pendant quatre ans (60 MCHF/an) au dessus du budget annuel fixe
- Cette contribution spéciale consentie servira à financer de nouvelles activités, identifiées comme priorités par le groupe de Stratégie Européenne pour la Physique des Particules:
  - consolidation de l'opération LHC
  - démarrage de la construction de Linac4 et la préparation du projet de la nouvelle ligne d'injection (SPL et PS2), amélioration de la fiabilité et de la performance du LHC
  - préparation pour le « upgrade » de la luminosité avec de nouveaux « inner triplets » et des détecteurs radhard plus performants
  - Mise en valeur des tests de qualification CLIC

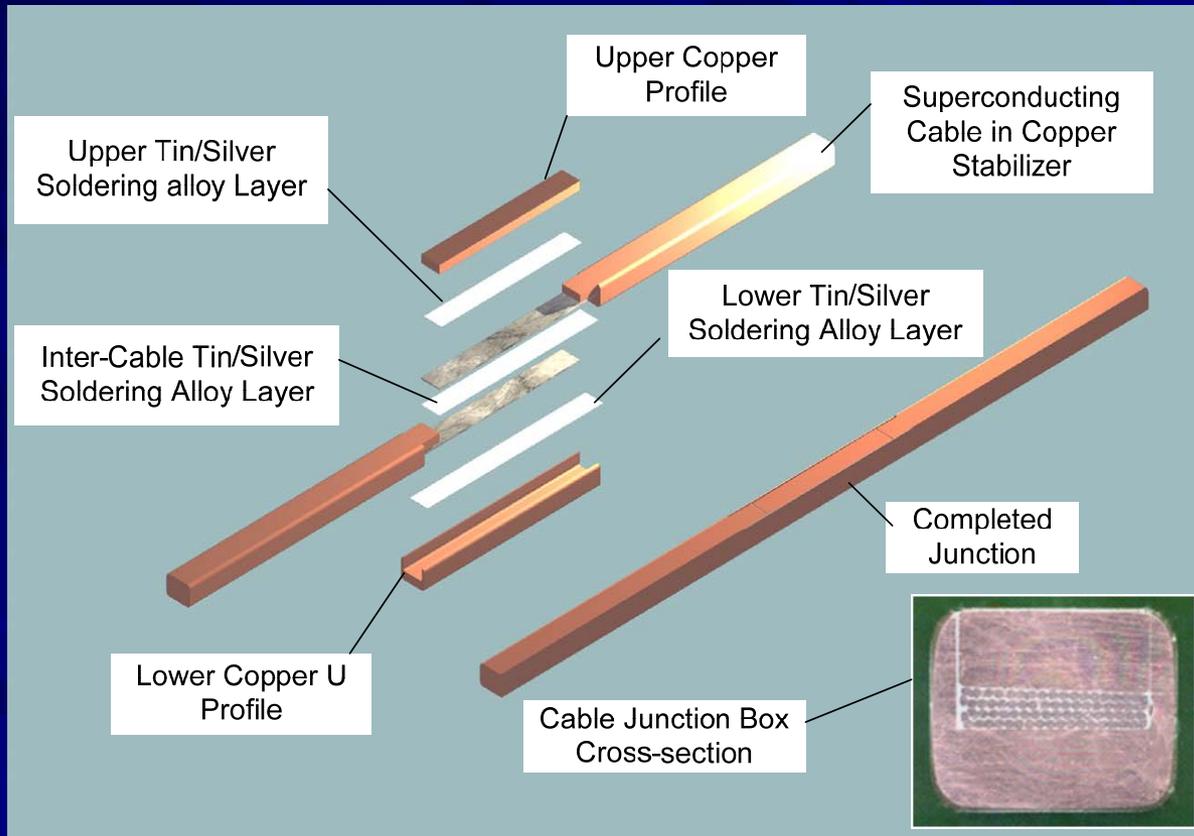
**Merci à tous les pays membres, en particulier les pays hôtes.  
Ils ont assuré l'avenir du CERN à long terme.**

Liège, 2 décembre 2008

88



# “Busbar” connexions



Liège, 2 décembre 2008

89

# Cryostat and cold masses longitudinal displacements



## Displacements status in sector 3-4 (From Q17R3 to Q33R3) : P3 side

Based on measurements by TS-SU, TS-MME and AT-MCS

	Q17	A18	B18	C18	Q18	A19	B19	C19	Q19	A20	B20	C20	Q20	A21	B21	C21	Q21
Cryostat	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Cold mass	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5

	Q21	A22	B22	C22	Q22	A23	B23	C23	Q23	A24	B24	C24	Q24	A25	B25	C25	Q25
Cryostat	<2	<2	<2	<2	-7	<2	<2	<2	-187	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Cold mass	<5	<5	<5	<5	-25	-67	-102	-144	<5	-190	-130	-60	<5	<5	<5	<5	<5

	Q25	A26	B26	C26	Q26	A27	B27	C27	Q27	A28	B28	C28	Q28	A29	B29	C29	Q29
Cryostat	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	474	-4	<2	<2	11	<2	<2	<2	<2
Cold mass	<5	<5	<5	<5	<5	57	114	150?	-45	230	189	144	92?	50	35	<5	<5

	Q29	A30	B30	C30	Q30	A31	B31	C31	Q31	A32	B32	C32	Q32	A33	B33	C33	Q33
Cryostat	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	188	<2	<2	<2	5	<2	<2	<2	<2
Cold mass	<5	<5	<5	<5	<5	19	77	148	<5	140	105	62	18	<5	<5	<5	?

SSS with vacuum barrier  
>0 Towards P4  
[mm]  
? Values are in mm  
? Not measured yet  
←→ Cold mass displacement  
←→ Cryostat displacement  
| Open interconnection  
\* Electrical interruptions  
\* Dipole in short circuit  
→ Electrically damaged IC  
↕ Buffer zones  
Disconnected

Liège, 2 décembre 2008

Courtesy JP. Tock

## Q27R3



Liège, 2 décembre 2008

91

# QQBI.27R3



Liège, 2 décembre 2008

92

# Dommmages



- Aimants
  - à démonter et retirer du tunnel: 42 MB et 15 SSS, dont:
  - certainement à réparer: 21 MB et 5-15 SSS
  - à remesurer et réinstaller: 42 MB et 15 SSS
  - interconnexions à refaire: 58
  - cryostats et supportage à consolider pour les 8 secteurs
- Système de protection des aimants et barres électriques
  - à installer dans les 8 secteurs
- Cryogénie
  - réparation des connexions à la ligne cryogénique
  - fluides cryogéniques à remplacer (6 t He, 1260 t LIN)
- Vide
  - soufflets et éléments de connexion à remplacer
  - tubes à vide faisceaux à nettoyer

## Le Modèle standard (MS)



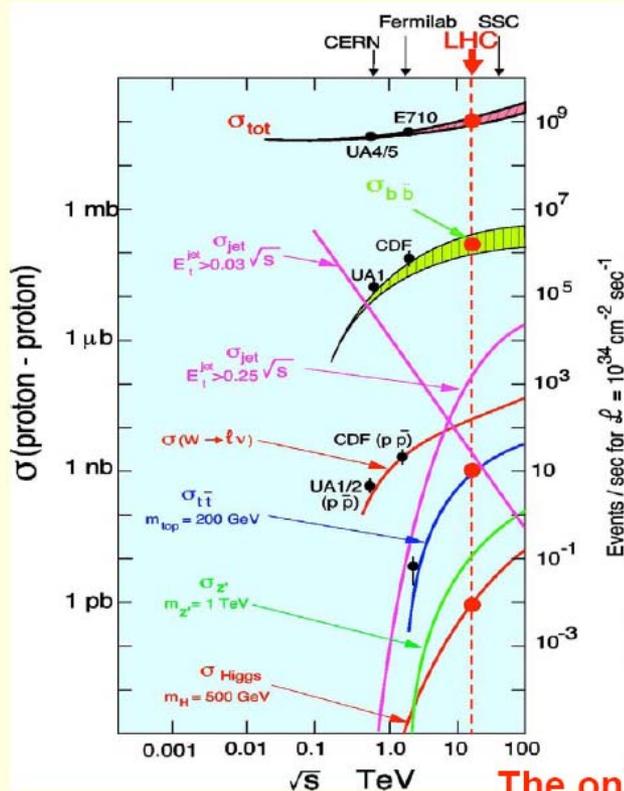
Le Modèle standard repose sur le principe d'invariance de jauge. Il n'est cependant valable que pour des particules de masse nulle, inexistantes dans ce monde.

Il n'y a cependant pas lieu de perdre espoir.

Dans un supraconducteur, le champ des paires de Cooper donne une masse au photon (effet Meissner). De la même manière, on postule dans le MS qu'un champ adéquat, le champ de Higgs, donne une masse aux Z, aux W et aux fermions. Son quantum est le boson de Higgs.



# Sections efficaces et taux de production



Rates for  $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ : (LHC)  
 Number of Events =  $L \cdot \sigma$

• Inelastic proton-proton reactions:	$10^9 / \text{s}$
• bb pairs	$5 \cdot 10^6 / \text{s}$
• tt pairs	$8 / \text{s}$
• $W \rightarrow e \nu$	$150 / \text{s}$
• $Z \rightarrow ee$	$15 / \text{s}$
• Higgs (150 GeV)	$0.2 / \text{s}$
• Gluino, Squarks (1 TeV)	$0.03 / \text{s}$

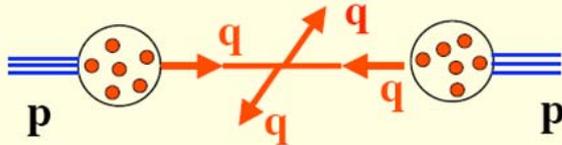
LHC is a factory for:  
 top-quarks, b-quarks, W, Z, ..... Higgs, .....

**The only problem: you have to detect them !**



# Quelles signatures expérimentales peut-on utiliser ?

Quark-quark scattering:

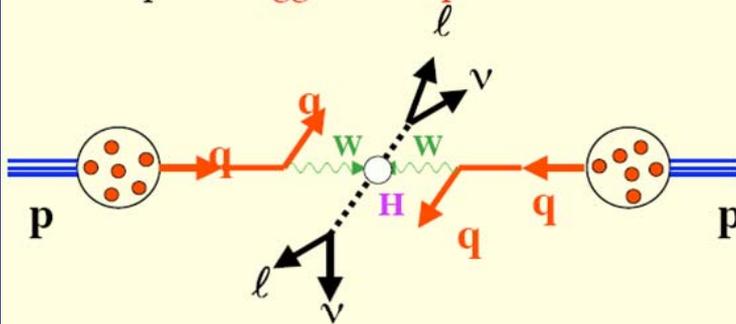


No leptons / photons in the initial and final state

If leptons with large transverse momentum are observed:

⇒ interesting physics !

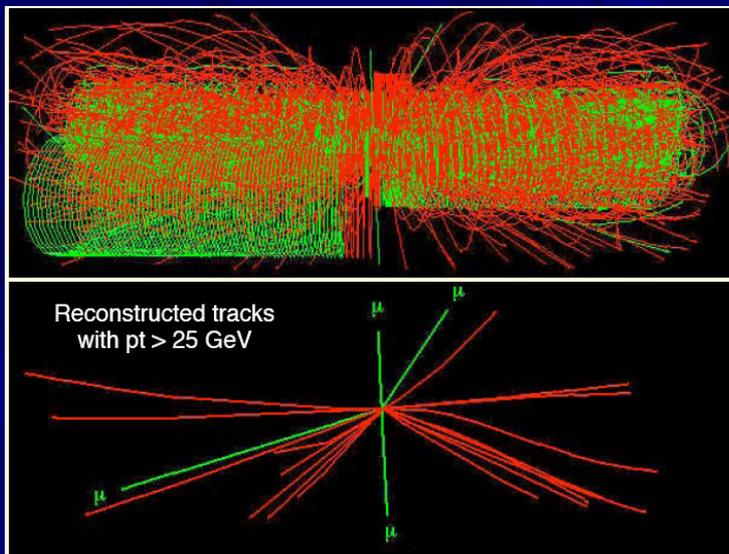
Example: Higgs boson production and decay



Important signatures:

- Leptons und photons
- Missing transverse energy

## Suppression du bruit de fond: reconstruction d'objets avec une impulsion transversale élevée



### Incidence de l'effet d'empilement sur les performances et les spécifications des détecteurs

- Réponse rapide:  $\sim 50$  ns
- Granularité:  $> 10^8$  canaux
- Radiorésistance (jusqu'à  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>/an dans les calorimètres à petits angles)
- Reconstruction des événements beaucoup plus complexe qu'avec les précédents collisionneurs

Liège, 2 décembre 2008

97

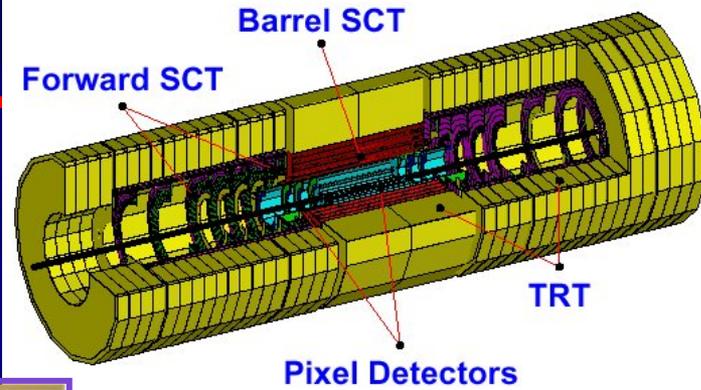
## ATLAS – Trajectographe interne

### 3 sous-systèmes:

Pixels de silicium :  $0,8 \cdot 10^8$  canaux

Rubans de silicium (SCT) :  $6 \cdot 10^6$  canaux

Trajectographe à rayonnement de transition (TRT) : pailles remplies de gaz,  $4 \cdot 10^5$  canaux



Liège, 2 décembre 2008

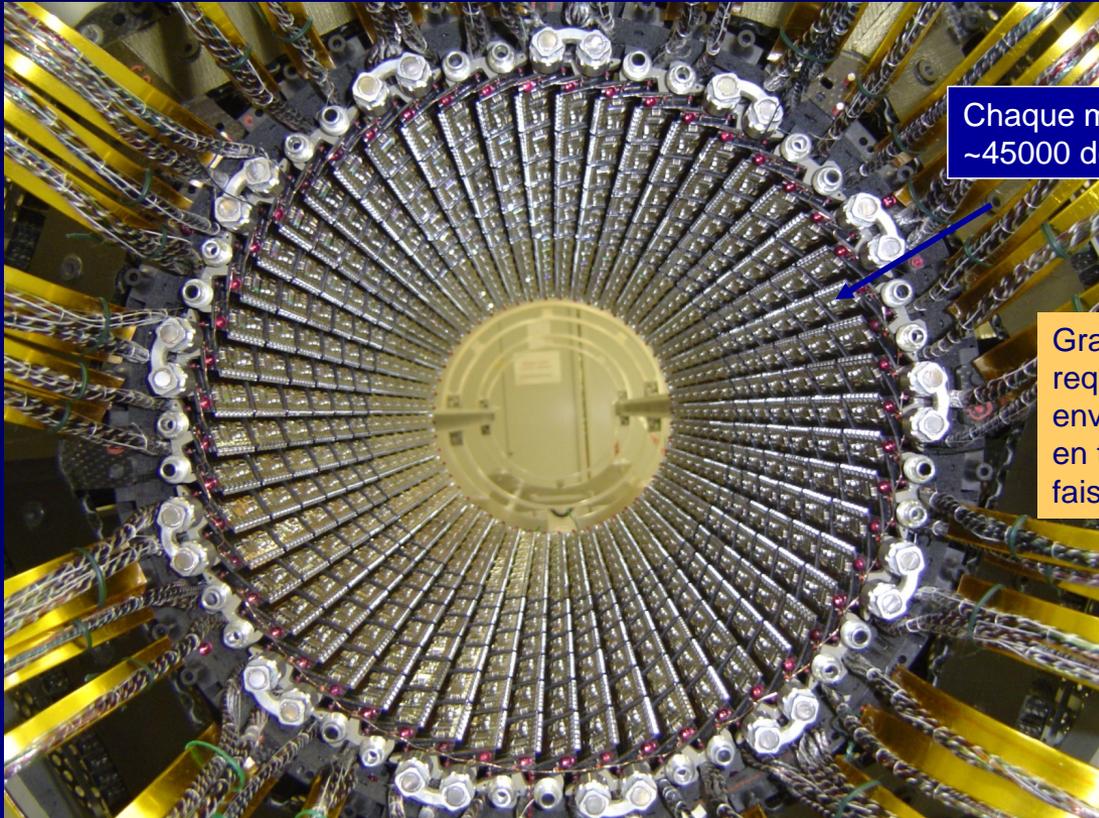
Muon cosmique enregistré dans le TRT tonneau (dans le hall d'assemblage en surface)



98

## Le cœur d'ATLAS: le détecteur à pixels

- 3 couches à ~ 5cm, 10cm et 13cm de la ligne de faisceau
- ~ 80 millions de pixels de Si haute technologie (50 $\mu$ m de large, 400 $\mu$ m de long, 250 $\mu$ m de haut)

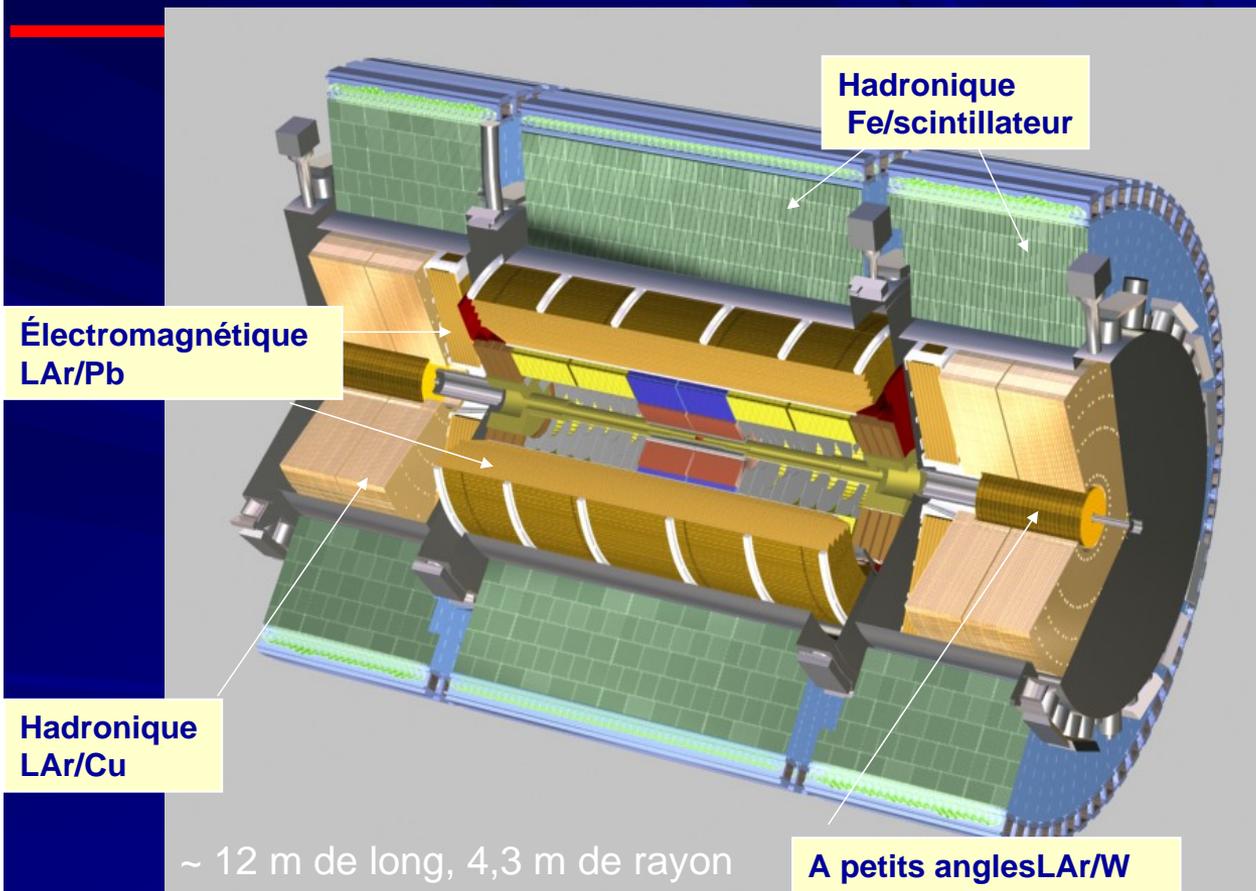


Chaque module contient  
~45000 détecteurs à pixels

Granularité élevée  
requis dans un  
environnement dense  
en traces autour du  
faisceau



# ATLAS - Calorimètres



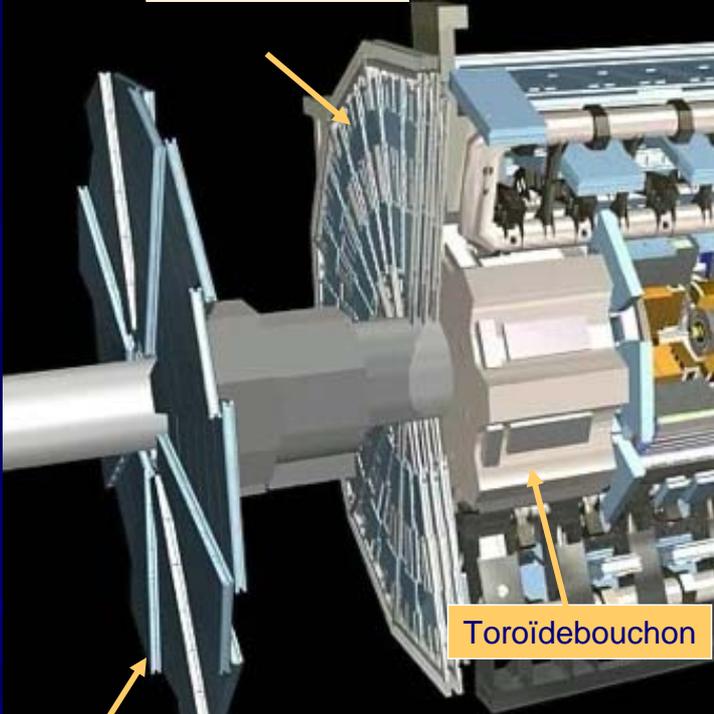
Liège, 2 décembre 2008

100

Spectromètre à muons à petits angles:  
8 grandes roues construites dans la caverne



4 grandes roues



Roues d'extrémité

Toroïdebouchon

**ATLAS**



Liège, 2 décembre 2008

101

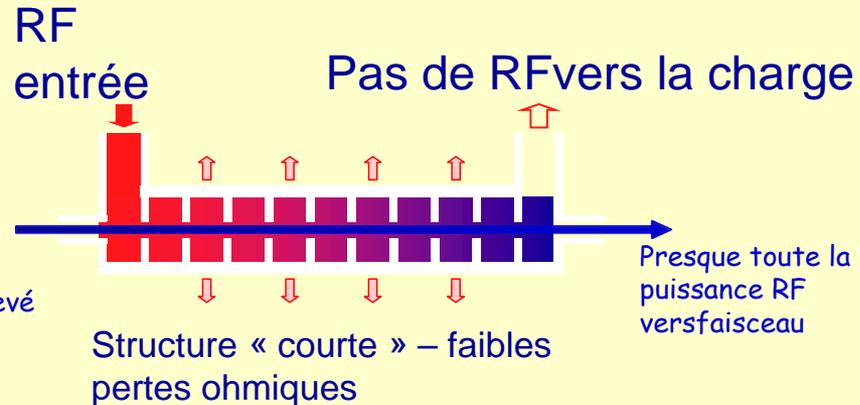
# Production d'un faisceau d'entraînement

## Principes de base



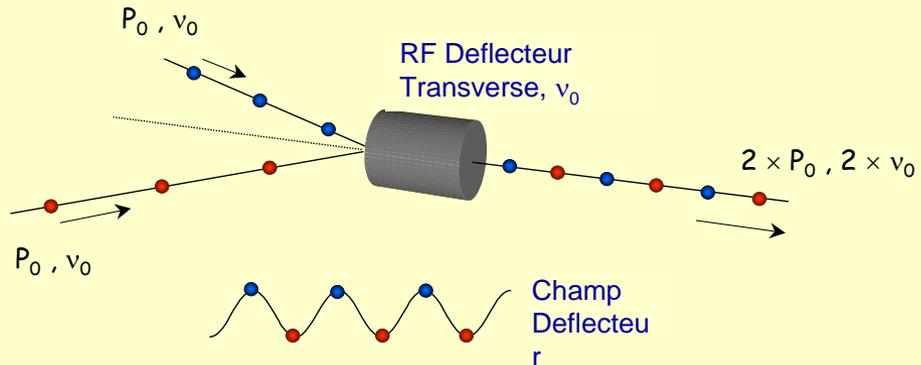
### ■ Accélération efficace

Accélération avec un faisceau à pleine charge dans les sections accélératrices à ondes progressives



### ■ Multiplication de la fréquence et de la puissance

Combinaison/séparation des faisceaux par des déflecteurs RF transversaux

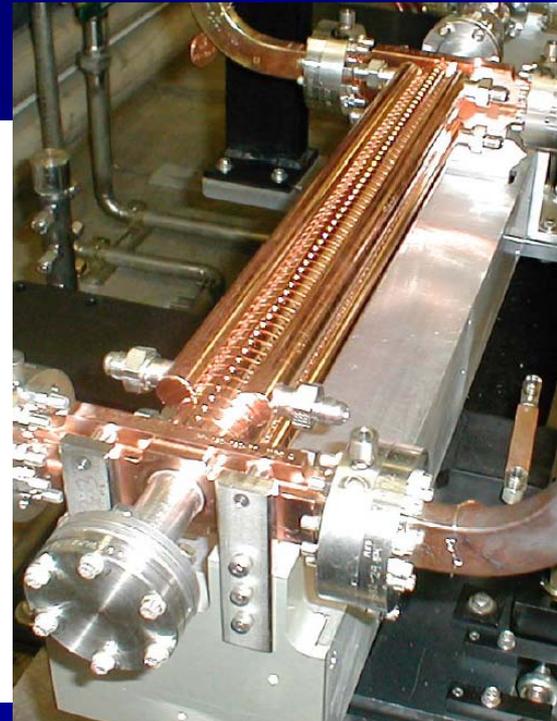
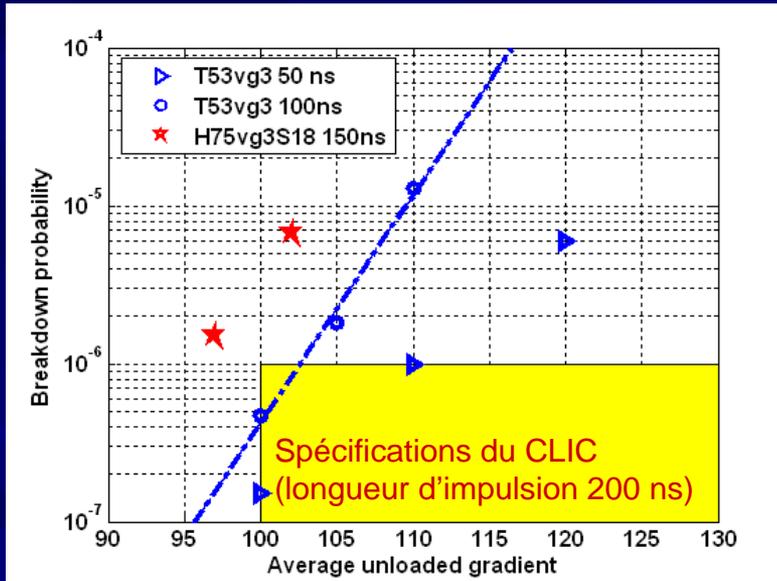




# Les défis du CLIC (1)

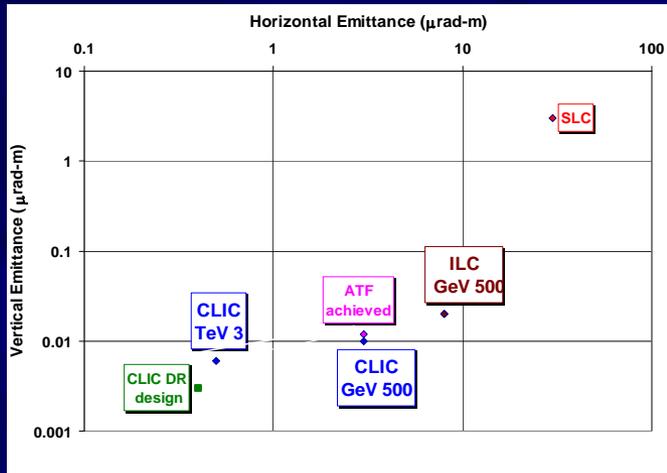
## Structure accélératrice

Résultats récents de l'essai haute puissance @SLAC (11,4 GHz)





# Les défis du CLIC (2)

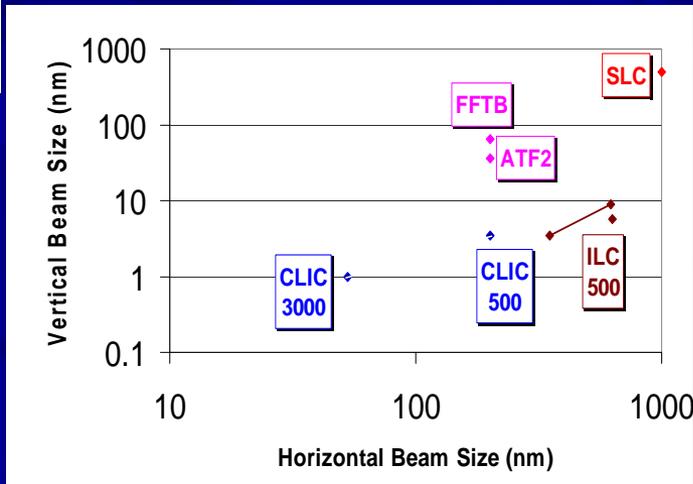


## Taille des faisceaux lors des collisions

Hor./vert. taille : 53 nm/ ~1 nm

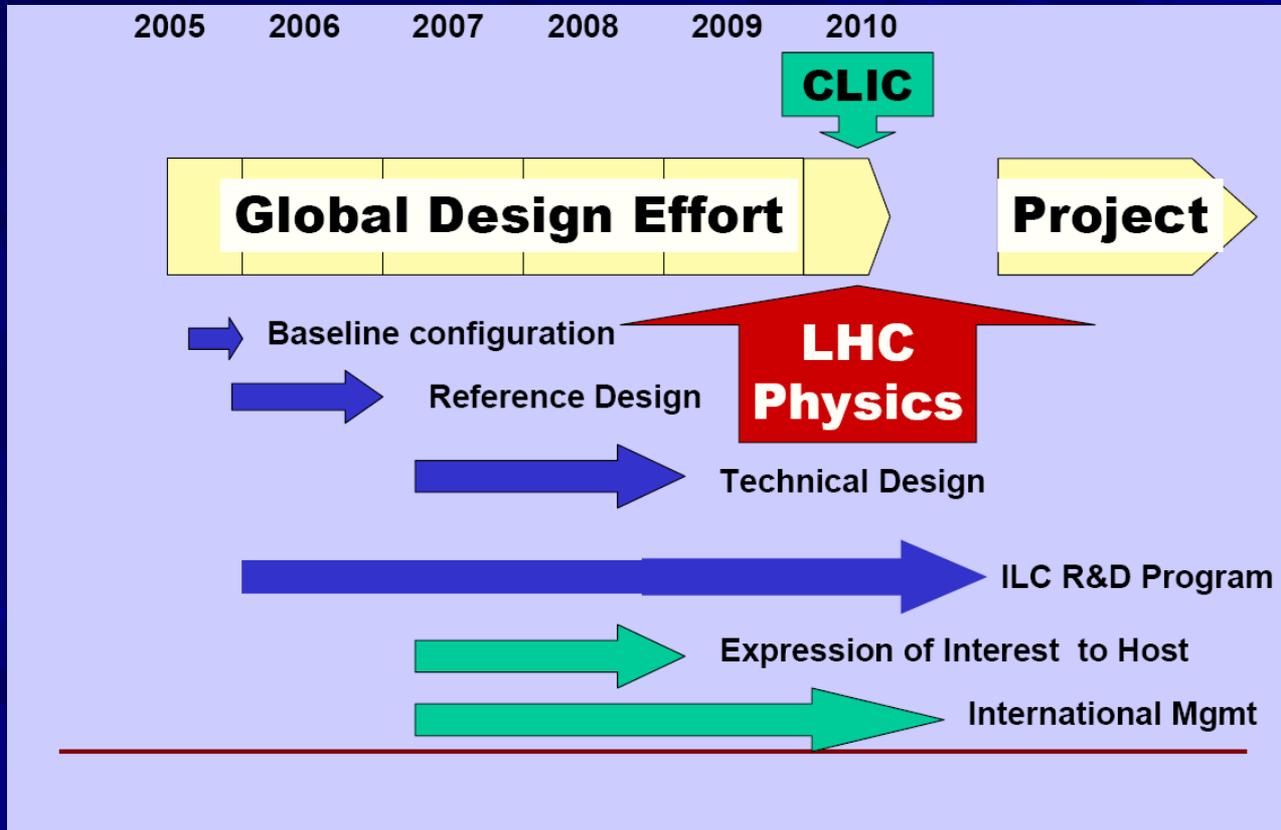
Émittance des faisceaux aux anneaux d'amortissement  
 Hor./vert. : ~0.6/0.01  $\mu\text{rad}\cdot\text{m}$

SLC@SLAC  
 Installations d'essais:  
 ATF@KEK  
 FFTB@SLAC





# Plan et calendrier du GDE (Effort mondial de conception)



Liège, 2 décembre 2008

105

## 2008-2011: début de la mise en œuvre, au CERN, de la stratégie européenne pour la physique des particules



### ■ **Premier Thème – Priorité absolue: achever le LHC et les expériences, exploitation optimale à l'énergie nominale pendant les années 2008-2010**

- contribution du CERN à l'achèvement des quatre expériences
- renforcement des capacités d'analyse des données
- consolidation et améliorations pour accroître la luminosité du LHC à court terme (env.  $10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$ ), en particulier :
  - réalisation de la deuxième phase - collimateurs et aimants de dilution
  - amélioration des contrôles de faisceau du LHC
  - nouvelle alimentation au PS
  - extraction en plusieurs tours au PS

### ■ **Deuxième Thème - Deuxième priorité : rénovation de l'ensemble du système d'injection afin d'assurer la fiabilité de l'exploitation du LHC (2011) :**

- Remplacement du PS par une **machine de 50 GeV**; conception, décision sur la construction en 2010, mise en service en 2016.
- remplacement du Linac 2 et du synchrotron injecteur par un nouvel injecteur de 160 MeV, le **Linac 4**, à construire immédiatement, et un linac à protons supraconducteur (SPL) de 3-5 GeV; conception et décision sur la construction en 2010, mise en service en 2016.

## 2008-2011: début de la mise en œuvre, au CERN, de la stratégie européenne pour la physique des particules



### ■ **Troisième Thème – R&D accélérateurs et détecteurs – augmentation de la luminosité du LHC**

- R&D sur les aimants supraconducteurs à champ élevé, un aimant à champ pulsé en vue d'une éventuelle version supraconductrice du PS, et des **quadripôles supraconducteurs** pour une installation neutrino.
- Développement : **trajectographes et calorimètres (LHC et CLIC)**, microélectronique et optoélectronique, amélioration des systèmes de déclenchement, d'acquisition de données et de contrôle.
- Amélioration du programme de qualification CLIC avec CTF3

### ■ **Quatrième Thème -** (sera partiellement financé par le CERN, avec d'importantes contributions extérieures)

- Installation d'essai polyvalente pour cavité SC
- R&D sur les cibles haute puissance pour la production de neutrinos
- projet ISOLDE haute intensité et haute énergie (HIE - Isolde)

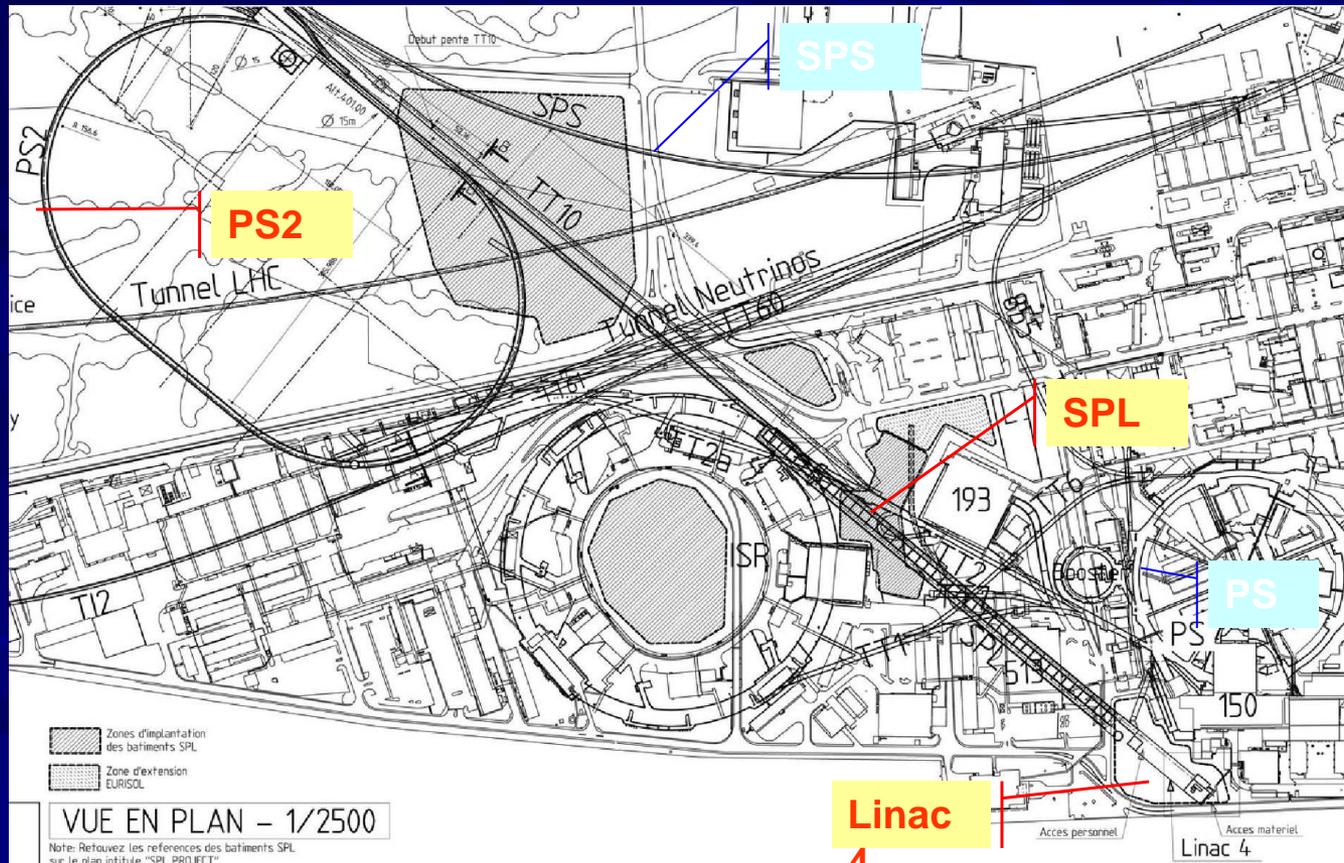
## Activités scientifiques envisagées pour la période 2011-2016



- À décider en 2010-2011, compte tenu des premiers résultats de physique du LHC et des résultats des études de conception et de la R&D des années précédentes. Le programme comprendra très probablement :
- Un relèvement de la luminosité du LHC exigeant un nouvel injecteur (SPL et PS).
- Montant total de l'investissement sur 6 ans (2011-2016) : 1000-1200 MCHF + 200-300 personnes par an. Budget total annuel : ~ 200-250 MCHF.
- Élaboration d'une étude technique pour le programme CLIC en vue d'une éventuelle décision sur la construction en 2016 après l'optimisation du LHC (en fonction de l'avenir de l'ILC).
- Total de la contribution du CERN M + P = ~ 250 MCHF + 1000 -1200 EPT sur 6 ans.
- Consolidation accrue de l'infrastructure : 30 MCHF + 40 ETP à compter de 2011.
- Note : Sur la période 2011-2016, la participation effective du CERN à un programme plus vaste (ILC ou usine à neutrinos) ne sera pas possible avec les ressources escomptées si le feu vert est donné pour l'optimisation du LHC et l'étude technique du CLIC.
- La situation serait tout à fait différente si *aucun des programmes ci-dessus n'est approuvé* ou si l'on envisageait un niveau d'activités et d'appui plus ambitieux dans le cadre européen.



# Layout of the new injectors



Liège, 2 décembre 2008