



Le Défi des Détecteurs

Daniel Fournier

ATLAS

LAL-IN2P3/CNRS & Université Paris-Sud

Le boson de Higgs, la France et le LHC : 25 ans de collaboration et de partenariat

24 avril 2013 - Campus CNRS Gérard Mégie, Paris

L' évolution des détecteurs

illustrée par 3 expériences « fondamentales »

Défis posés par le LHC: technique et sociologie

Quelques exemples dans ATLAS

Quelques exemples dans CMS

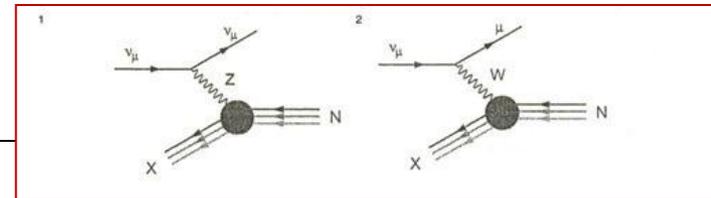
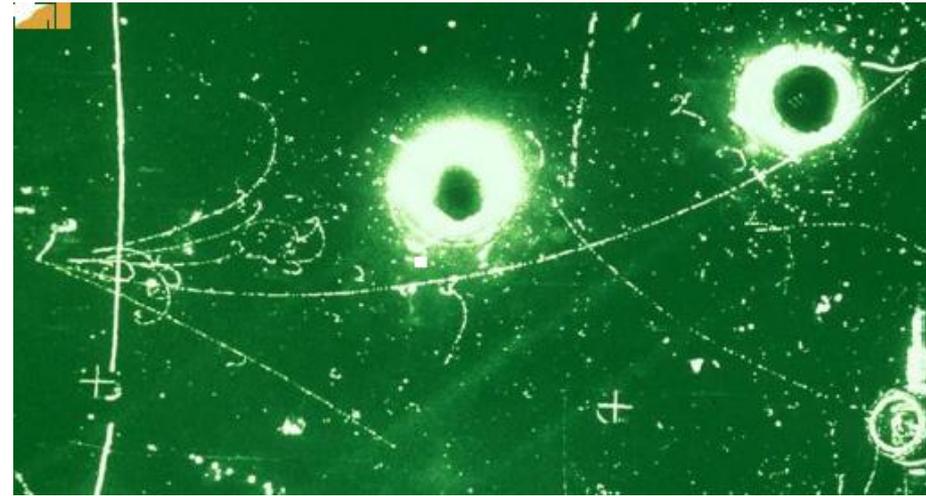
LHCb et Alice : expériences « spécialisées »

Le rôle de la Grille de Calcul: LCG-France

Haute luminosité : la R&D pour de nouveaux défis



Découverte des courants neutres: 1973



Faisceau neutrino au CERN/PS,

Chambre de « grand volume » (6 m³ de fréon), dessinée/construite en France
80 k Photos neutrino 200 k antineutrinos (ν_{μ})

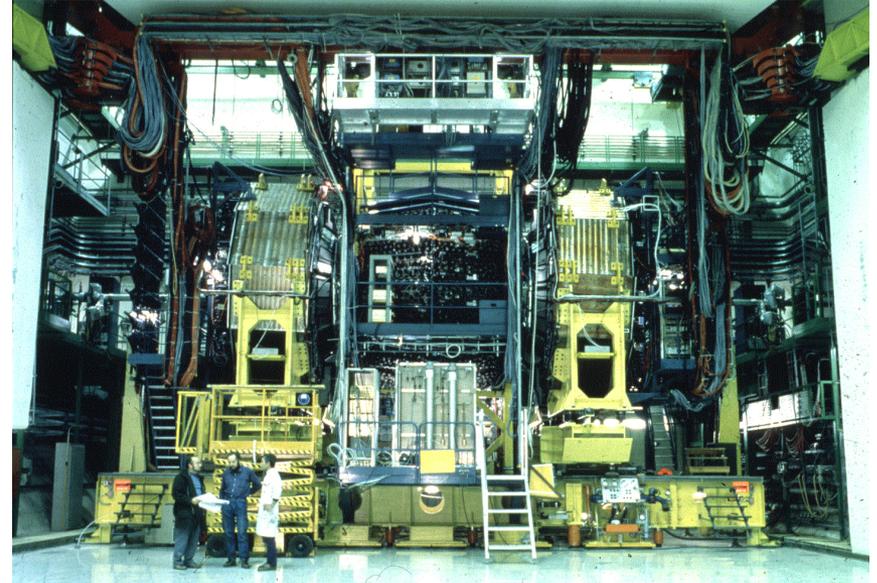
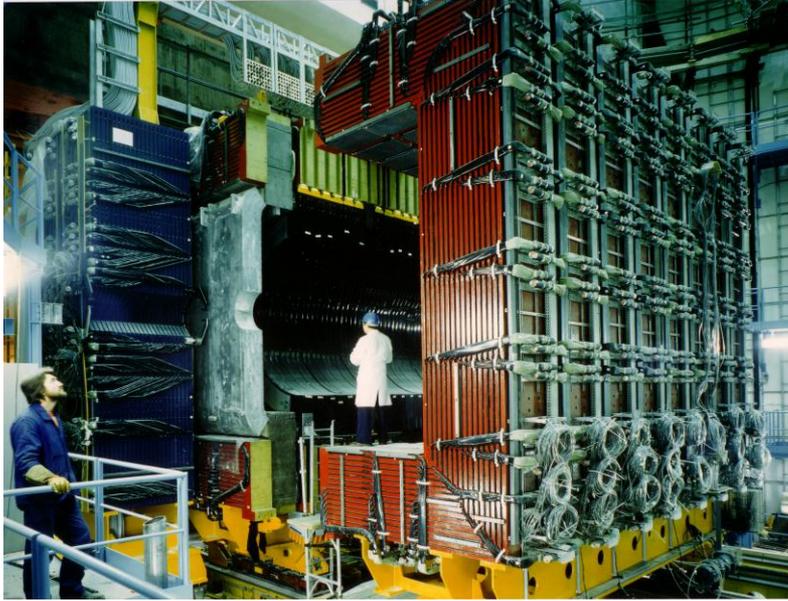
Découverte d'événements sans muons dans l'état final = « courants neutres »

Le W (responsable désintégration béta) a un équivalent neutre le Z⁰

Collaboration de 7 laboratoires, 55 physiciens

Article: Phys Lett B 3 pages, 3 références

Découverte de W et Z: 1983: UA1 et UA2



Produire des W et Z « réels »

SPS transformé en collisionneur: 540 GeV disponibles dans la collision

Détecteur « électronique » acceptance proche de 4π

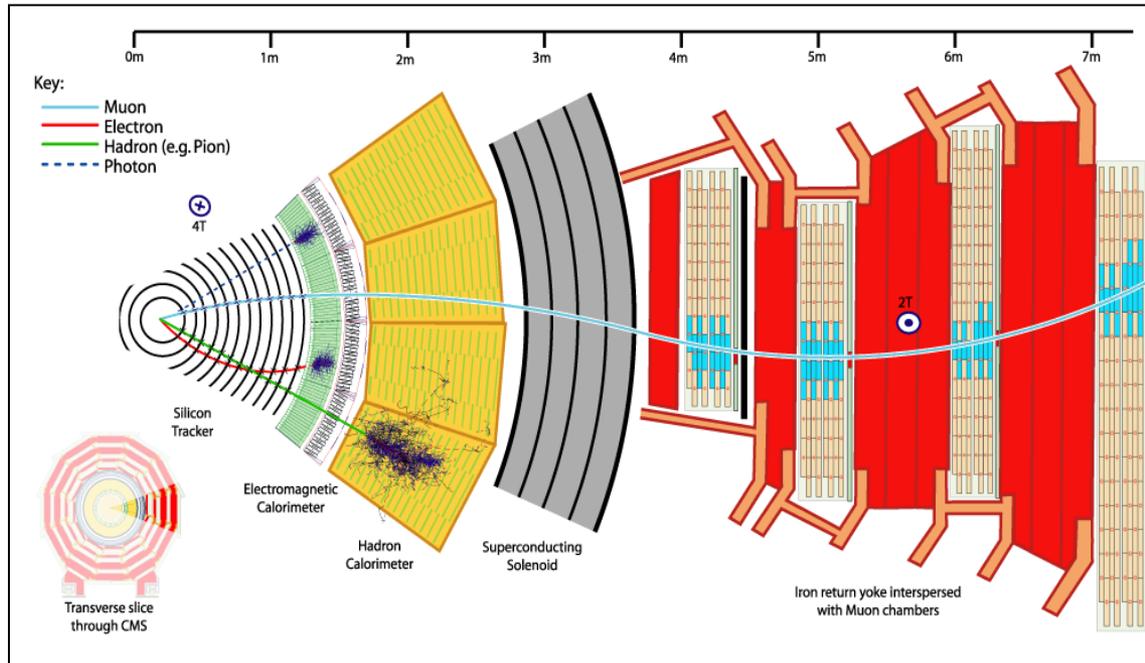
Granularité « modeste » : 750 cellules « gondoles » EM de UA1

$\sim 10^{10}$ collisions ppbar pour observer $\sim 10 Z \rightarrow l+l-$

~ 130 physiciens /UA1 et ~ 60 /UA2

Articles: 13 pages 20 références

Découverte du Higgs:2012: ATLAS et CMS



Focalisation de la communauté sur la recherche du Higgs

~10 ans de R&D
~10 ans de construction en parallèle avec
-LEP
-Tevatron

Collisionneur pp (gluons-gluons): 8 TeV disponible dans la collision

Couches: **tracking, calorimètre, spectro a muons**

Aimants: CMS = grand solénoïde ATLAS= solénoïde+ toroïdes

Granularité : Calo EM (x 200) tracking (x ~10000)

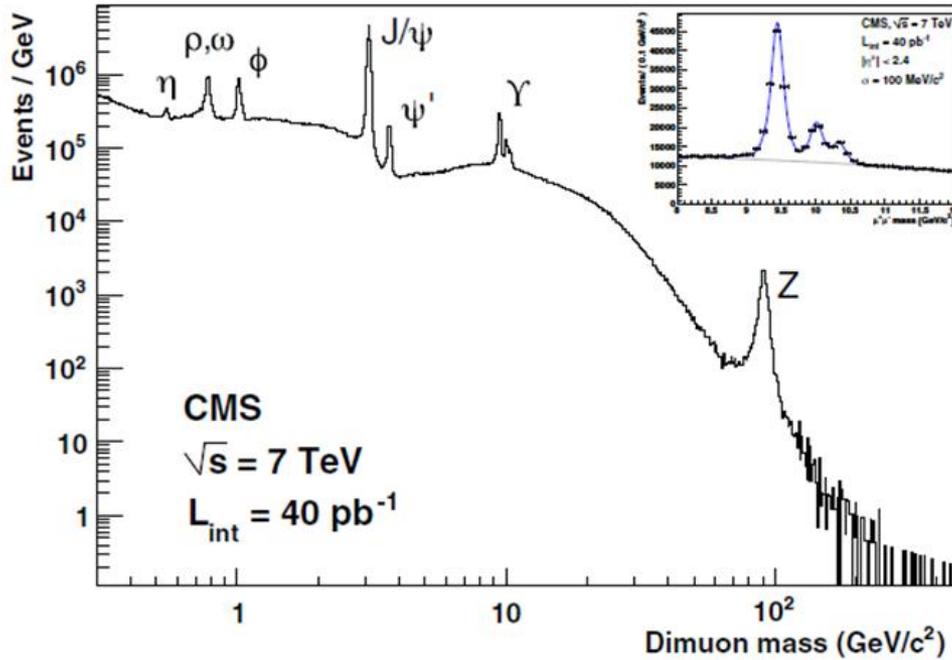
10^{15} collisions pp ($\times 10^5$) pour observer ~ 10 $H \rightarrow 4\text{leptons}$, ~ 100 $H \rightarrow 2\gamma$

~2500 scientifiques / expérience

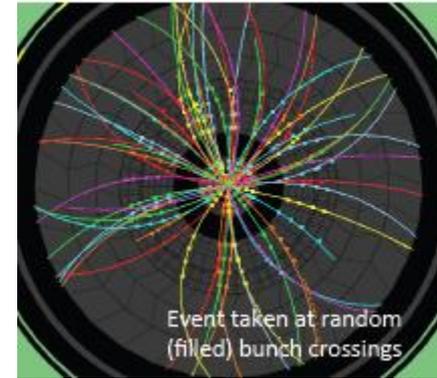
Articles : 30 pages 140 références

Défis technologiques

- ~20 coll chaque 25ns ~ **1GHz** → ~ **400 Hz** enregistrés
- Haut pouvoir sélectif pour electron/photons, muons, taus, jets-b dans un environnement difficile (multiplicité, irradiation)



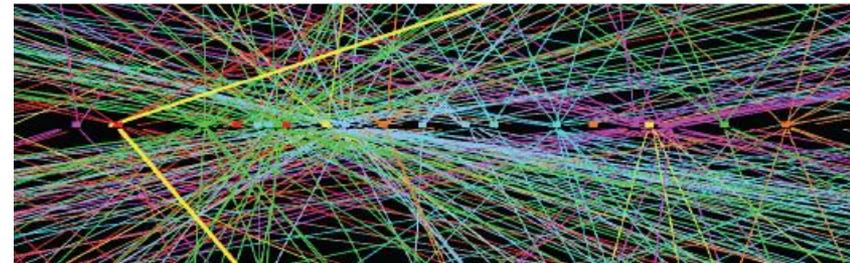
2010
~7^E32
~3 evt/bc



2012
~7^E33 [50ns]
~20 evt/bc



Maintenir sélectivité et haute précision malgré l'empilement de collisions lié à la haute luminosité



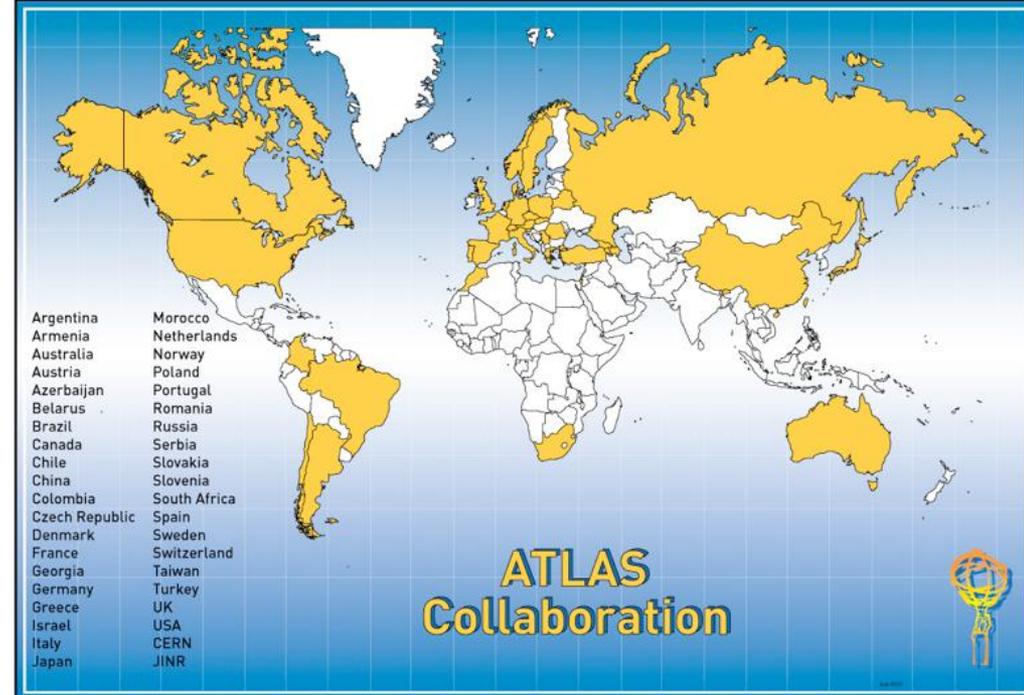
Défis sociologiques

Exemple: ATLAS

38 Pays

177 groupes

2900 Participants scientifiques

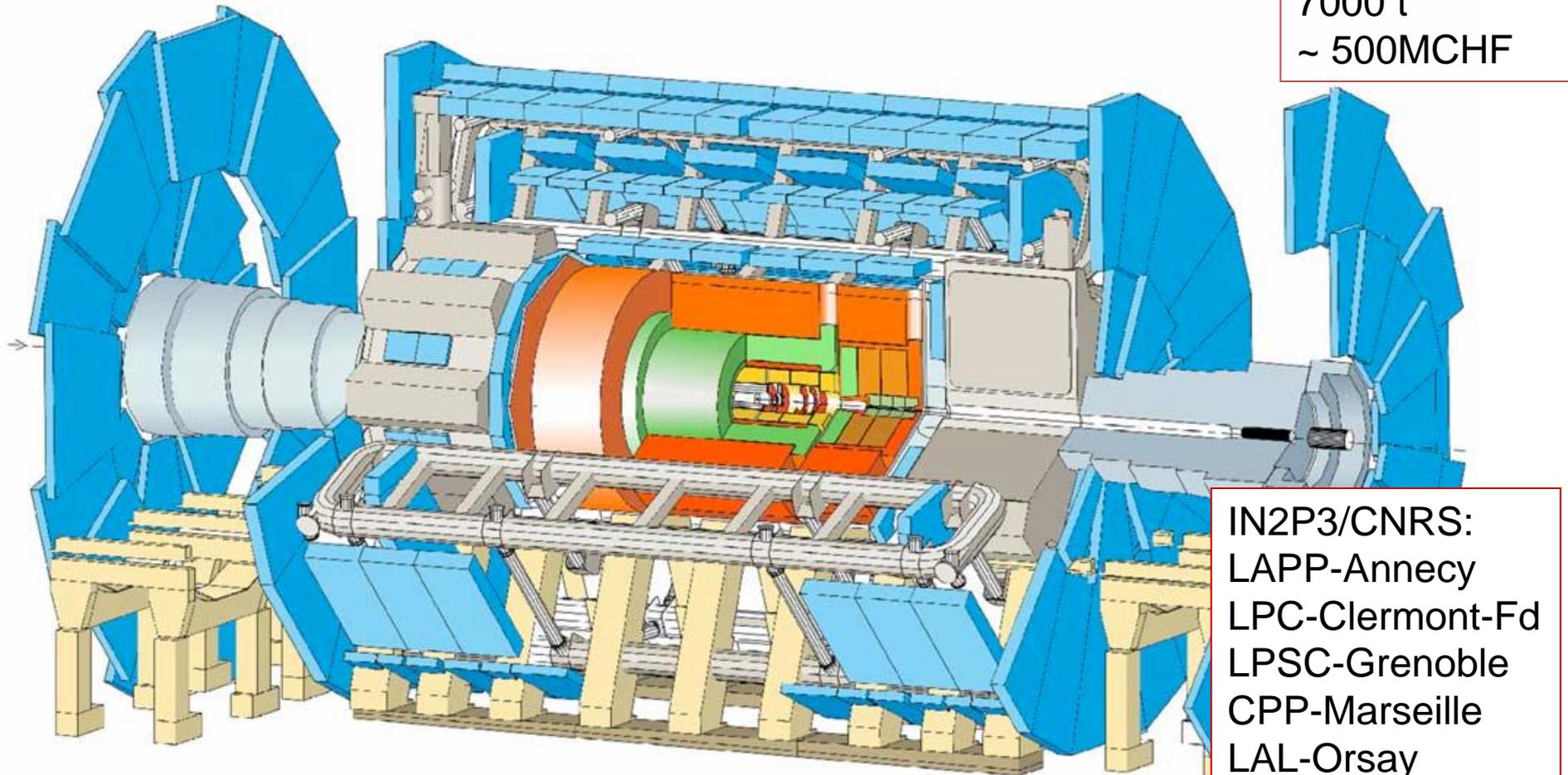


Au moment de la construction : Combiner :

- La volonté de chaque pays de dépenser « chez lui »
- L'existence de « sources uniques » pour les technologies les plus pointues ou pour des matières premières rares (tungstène,..)
- La nécessité de minimiser le coût total
- Les règles particulières d'achat du CERN (moins disant)
- Des « opportunités » conjoncturelles

Expérience ATLAS : toroïde, Calorimètre, pixels

44m x 25m (Φ)
7000 t
~ 500MCHF



IN2P3/CNRS:
LAPP-Annecy
LPC-Clermont-Fd
LPSC-Grenoble
CPP-Marseille
LAL-Orsay
LPNHE-Paris

IRFU/CEA-Saclay

Toroïde à air: grand volume, peu massif
Concept introduit/soutenu par M.Virchaux (IRFU/CEA) .

Les Toroides d'Atlas

Barrel

8 bobines de longueur 25 m

Dessiné par CEA/CERN

Innombrables défis technologiques liés à la taille

Bobines: Ansaldo

« Boîtes à bobines » Aluminium

Soudures BE → MIG+ assemblage mécanique

Intégration/montage final au CERN, personnel Dubna

Masse froide: 370 t

Energie stockée: 1,1 GJ



End Caps

Diamètre 10,7 m

Dessiné par RAL

Intégration/montage final au CERN

Masse froide: 2 x 140 t

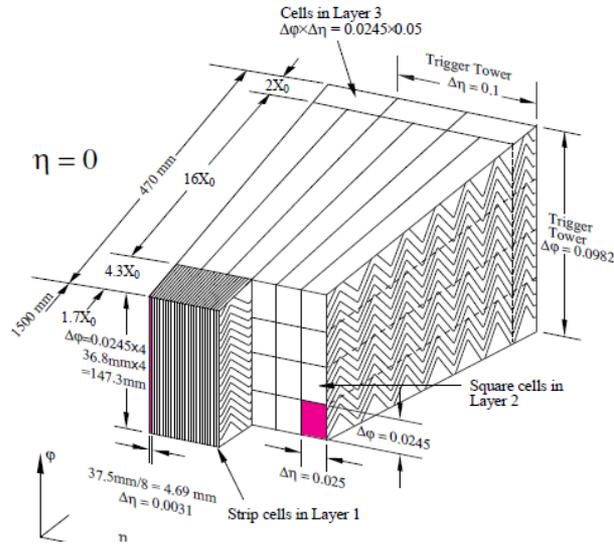
Energie stockée: 2x 0,25 GJ



Le Calorimètre Argon Liquide d'Atlas

Argon liquide

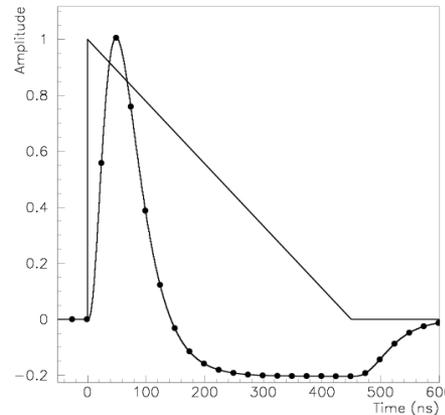
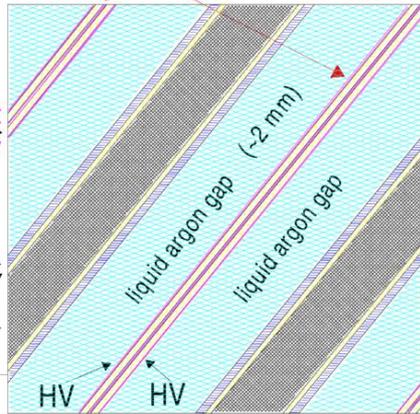
- insensible aux radiations
 - « facile » à calibrer
 - collection de charge « lente »
- Géométrie « accordéon » combine
- structure pointante en « tours »
 - signaux rapides (courant)
 - segmentation en profondeur (pointé des photons)



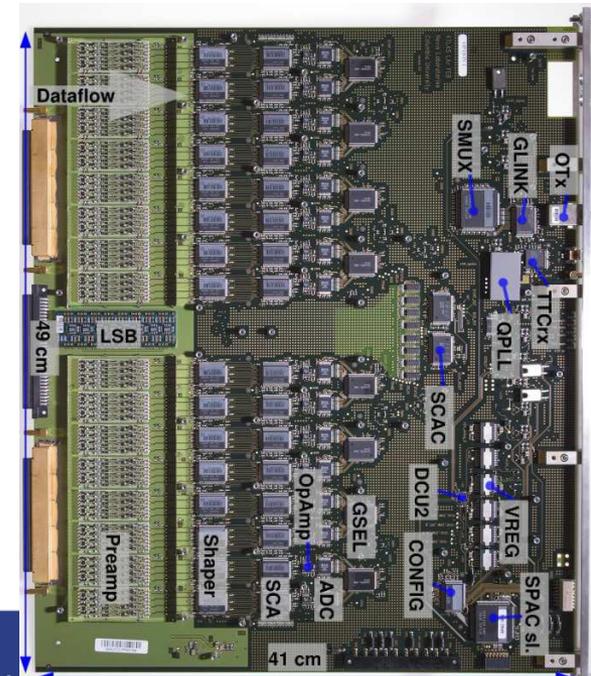
readout electrode absorber

outer copper layer
inner copper layer
kapton
outer copper layer

stainless steel
glue
lead



Solution proposée/soutenue/ labos FR



Le boson de Higgs, la France et le LHC :

25 ans de collaboration et de partenariat - 24 avril 2011

LAr EMB: exemple de découpage en tâches

\$, Euros, CHF
 ~30% FR
 ~30% US
 ~20% CERN
 ~20% IT, S, ...

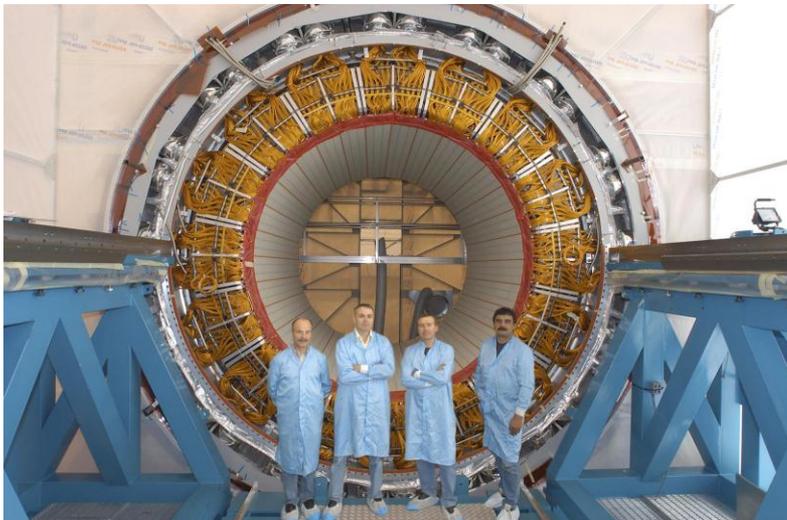
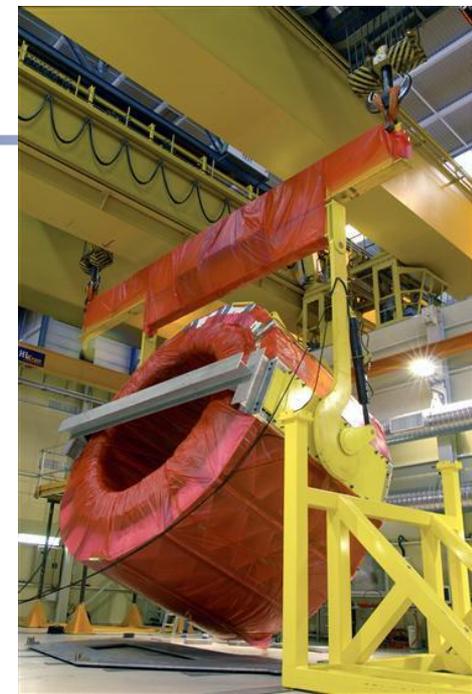
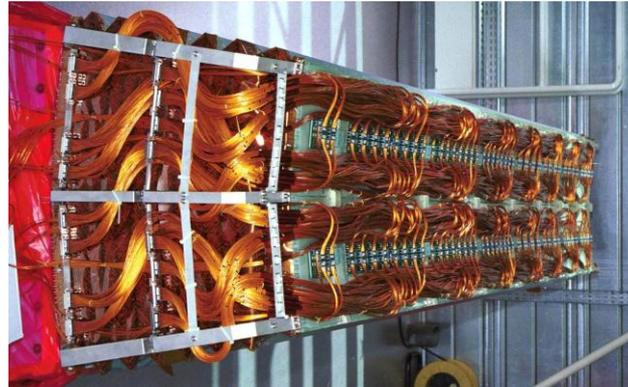
OBJET	Dessin/Specs	Realisation	Commentaire
Cryostat (40 m ³ LAr)	US	KHI/Japon	Financé/US
Cryogénie	CERN/FR	GB/Norvege/FR	Financé/FR
Traversées étanches	US/FR/Canada	US	200000 traversées -0 probleme
PLOMB	FR	Allemagne	Contrôle usine FR
INOX	FR	US/teledyne	Sans concurrent
Prepreg	FR	FR/Structil	
Machine a former les accordéons	CERN	CERN	Trop compliqué→industrie
Presse de collage	FR	FR (Deshors/Brive)	Haute precision
Barreaux anisotropes	CERN	Suisse	Contrat/ES cassé –
Electrodes/matiere polyimide	Grande largeur	Japon	Dupont a renoncé (dimensions)
Electrodes/réalisation	CERN	Suisse	Abandon FR (cout)
Electrodes/machine test	FR	FR	Installé et opéré en usine
Séparateurs nid d'abeille	FR	B/FR	« sous-produit » aviation
Presampler	FR/S	FR/S/B	Partie des tests/Maroc
Cables froids microcoax	FR	FR/Axon	Tests en usine/appareillage labo
Preamplis hybrides	FR/US	US/Italie	
ASIC Amplis/formeurs	FR	Aut/AMS	
Memoires analogiques	FR	FR/DMILL	
Cartes	US/FR	US	Moins cher/Europe. Tests US/FR
Assemblage modules→roue	FR	FR/Sacsum	Sur site au CERN

Le boson de Higgs, la France et le LHC :

25 ans de collaboration et de partenariat - 24 avril 2013



LAr EMBet quelques photos



*Le boson de Higgs, la France et le LHC :
25 ans de collaboration et de partenariat - 24 avril 2013*



Calorimètre à Tuiles scintillantes

Destiné à la mesure des « Jets »

Clermont-Fd

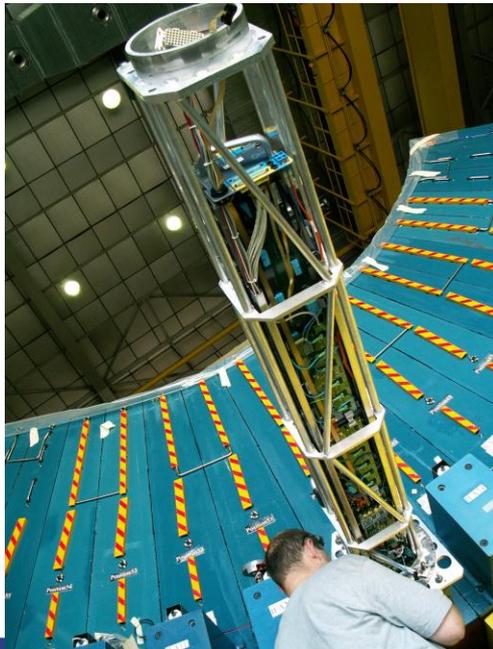
Concept

« Tiroirs pour électronique »

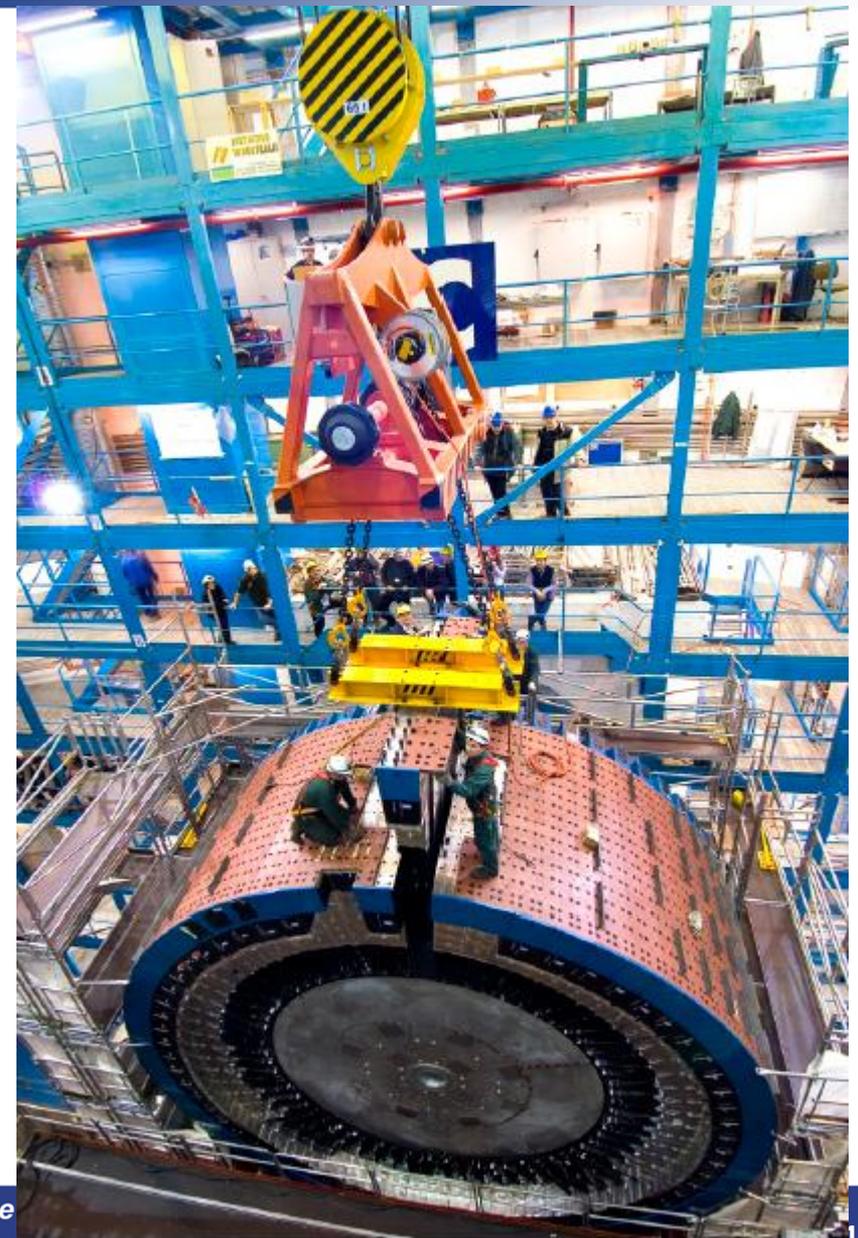
Système HV

Système de test « on-site »

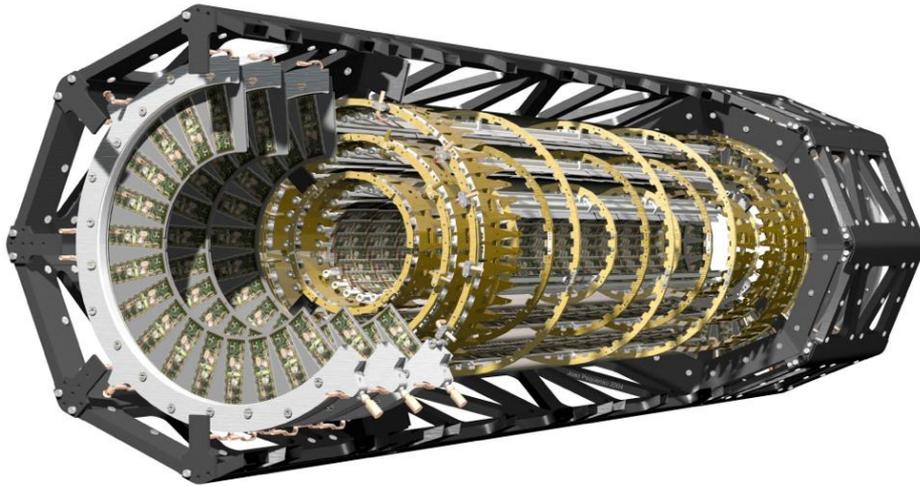
Laser pour calibration



Le boson de Higgs, la France

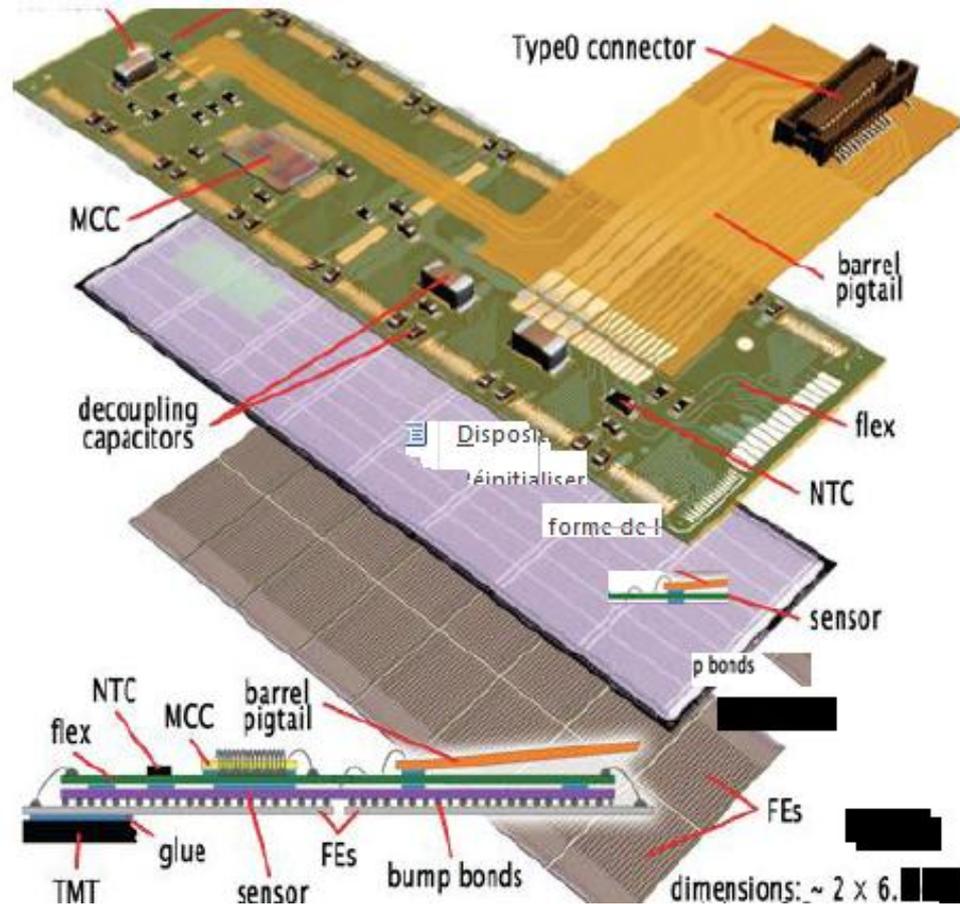


Atlas : Le détecteur de vertex à pixels

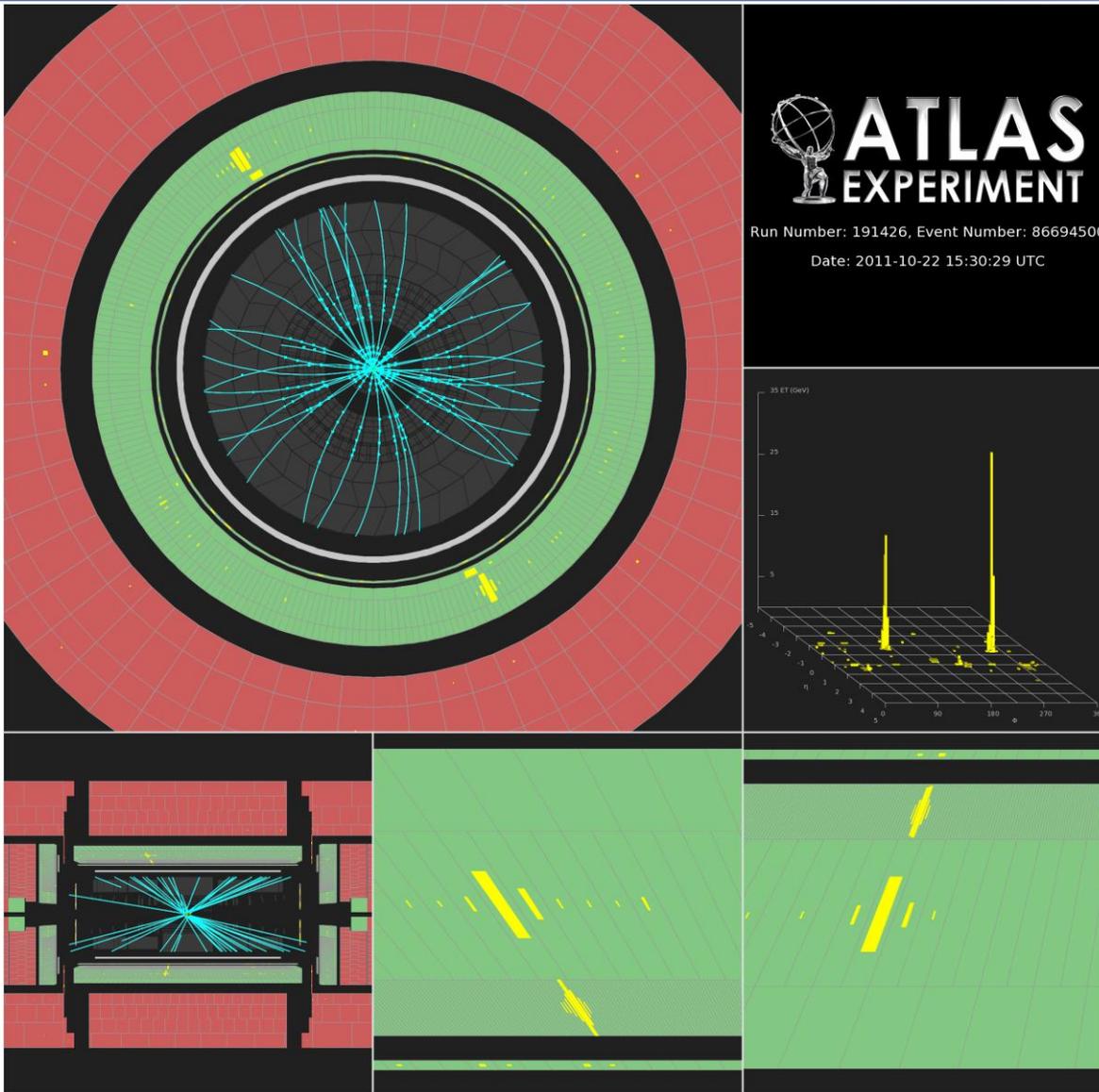


Partie la plus interne de Atlas tracking
3 couches à $R=50, 88, 122$ mm + Disks
80 M pixels (50 x 400 microns)
Si wafers n-on-n CIS et Tesla
Electronique: DMILL \rightarrow IBM (250 nm)
Très « pointu »: « Bump bonding » (G, It)
(50 contacts par mm^2)

Rôle pionnier de CPPM
(P.Delpierre)



Atlas: candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$



2 photons « non-convertis »
 $P_T(1) = 64.2 \text{ GeV}$
 $P_T(2) = 61.4 \text{ GeV}$
 $M_{\gamma\gamma} = 126.6 \text{ GeV}$

Expérience CMS: Solénoïde, cristaux, Si

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel (100x150 μm) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips (80x180 μm) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

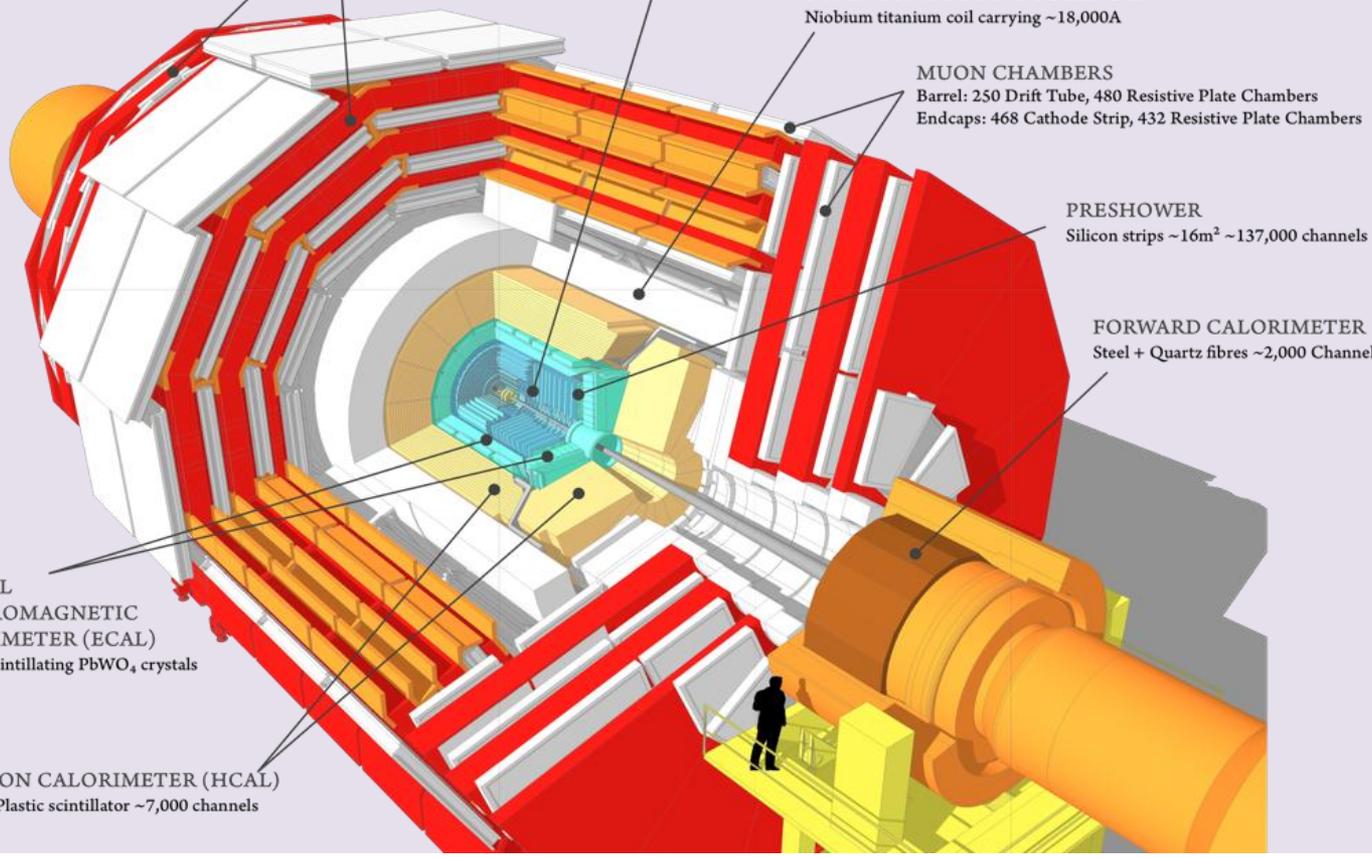
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



20m x 15m (Φ)
12500 t
 $\sim 500\text{MCHF}$

IN2P3/CNRS:
IPN-Lyon
LLR-Palaiseau
IPHC-Strasbourg

IRFU/CEA-Saclay

Le boson de Higgs, la France et le LHC :

25 ans de collaboration et de partenariat - 24 avril 2013

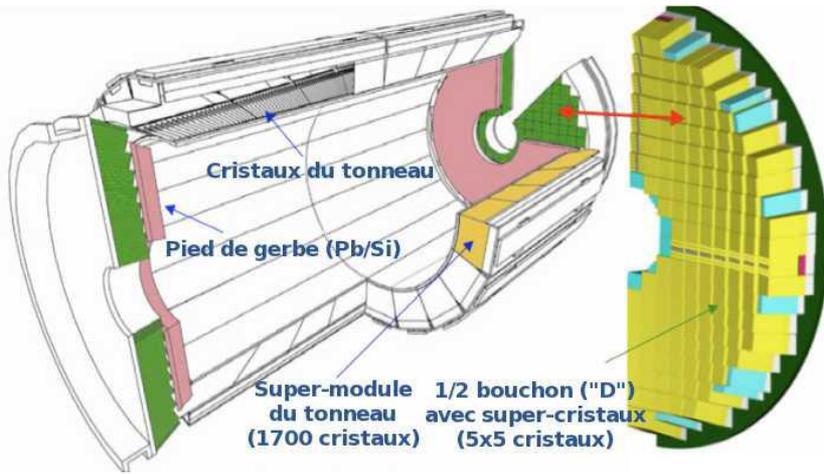


CMS: le solénoïde

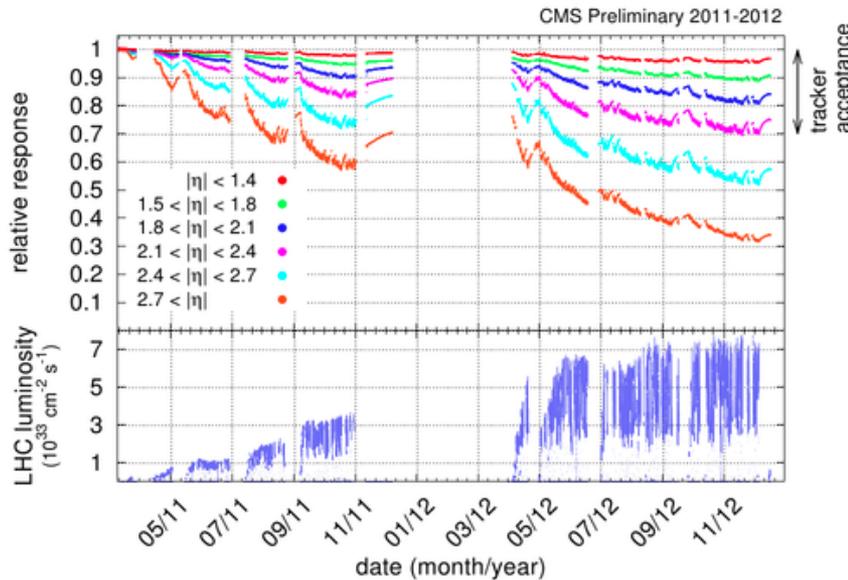


Dessin CEA/CERN.
4 couches 19 kA 3.8 T
Rint= 3 m Lint = 12 m
Masse froide= 220 t
Contient tracking et Calorimètre
Energie stockée: 2.6 GJ

CMS: le Calo à cristaux PbWO4

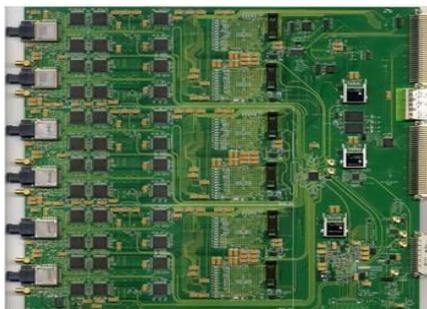


Excellente résolution($3\%/\sqrt{E}$)
~80000 cristaux/Russie (+Chine)
Calibration plus difficile /LAR
Réponse sensible à l'historique radiation
Suivi par laser (CEA)
Déclenchement/LLR



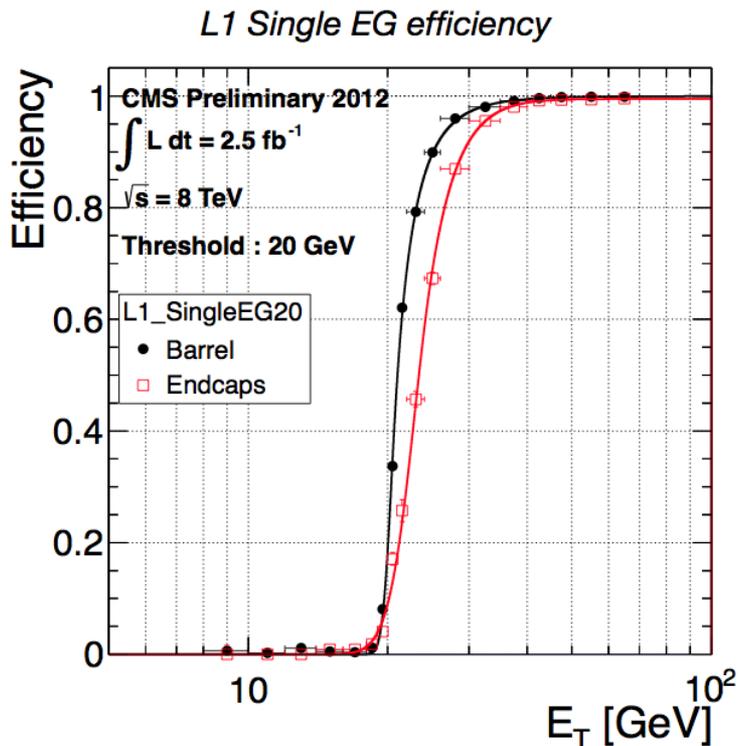
Mise en place des fibres pour le suivi par laser

CMS Ecal: LVL1 trigger



EB Trigger Concentrator Card

EE Trigger Concentrator Card



Contribution LLR

Clock & Control System (CCS)



Sharp turn-on essentiel

Data Concentrator Card (DCC)

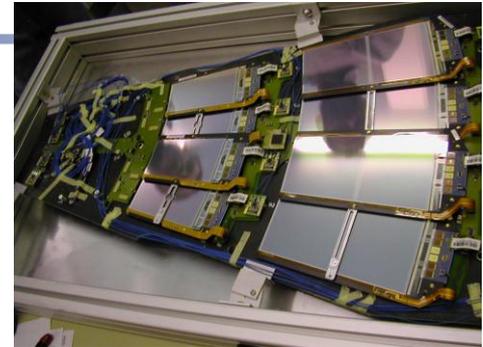


CMS: Si tracking

Couverture complète $|\eta| < 2.4$ $\sim 198 \text{ m}^2$ Si

- Strips: 10-12 barrel/ endcap layers; 9.3M canaux
- Pixels: 3 barrel layers, 2+2 disks; 66M canaux

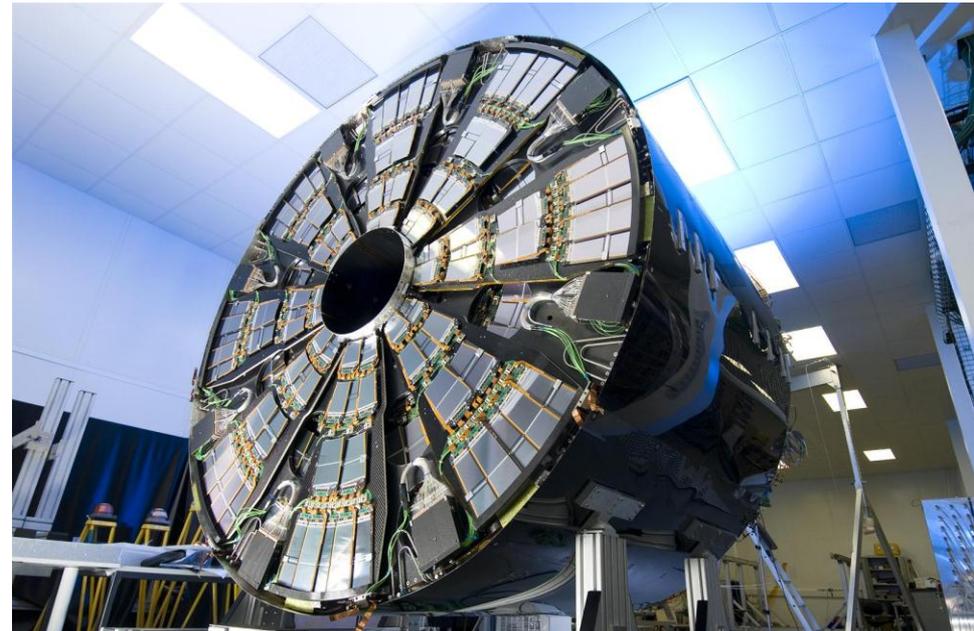
Alignement intermodules $O(10\mu\text{m})$



Contribution IPHC IPNL

Rôle du tracking essentiel pour

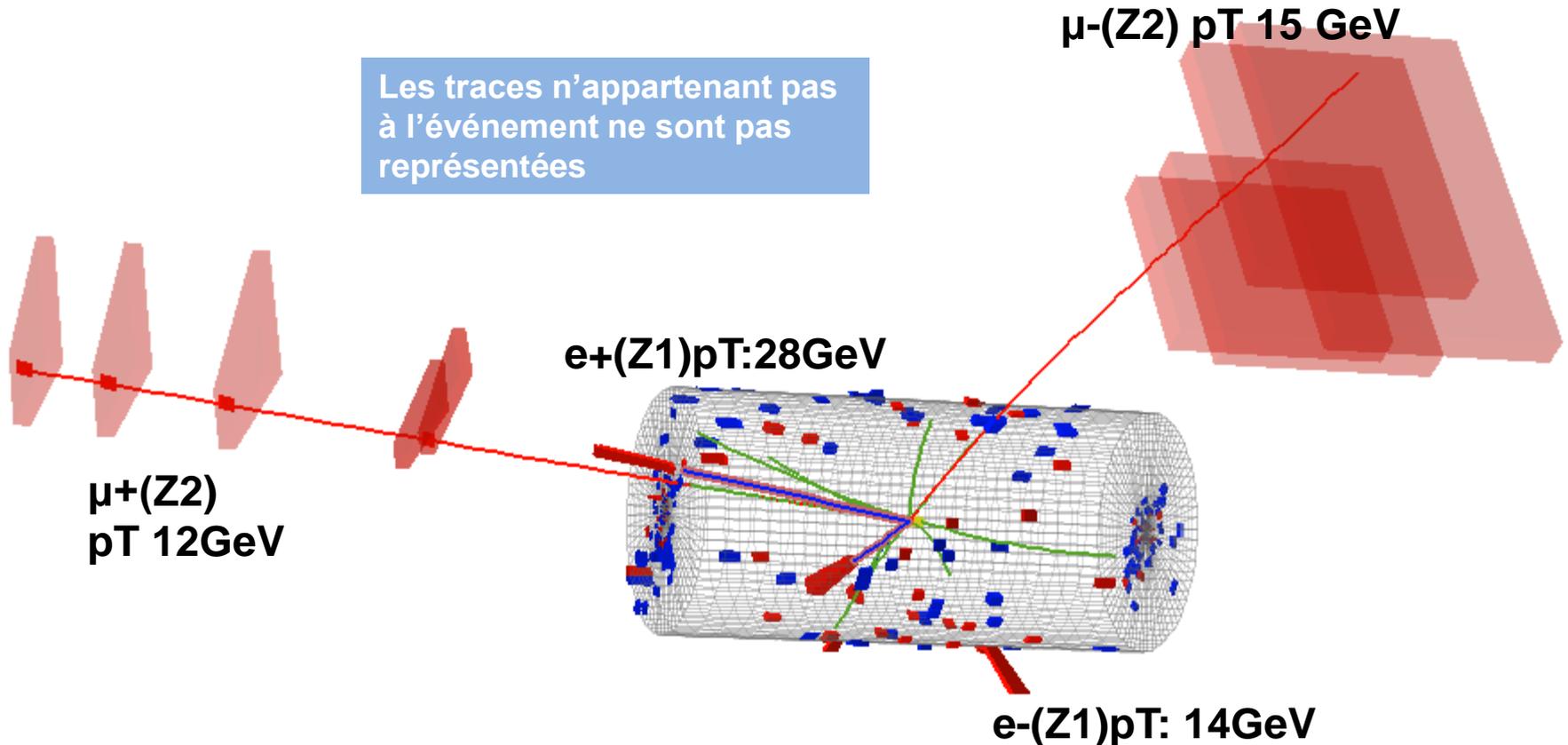
- Impulsion des traces en général (incl muons et electrons)
- input/"particle flow" (jets)
- marquage des vertex secondaires " b-tagging"



Event display CMS

Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2\mu 2e$ $m=125.8$ GeV

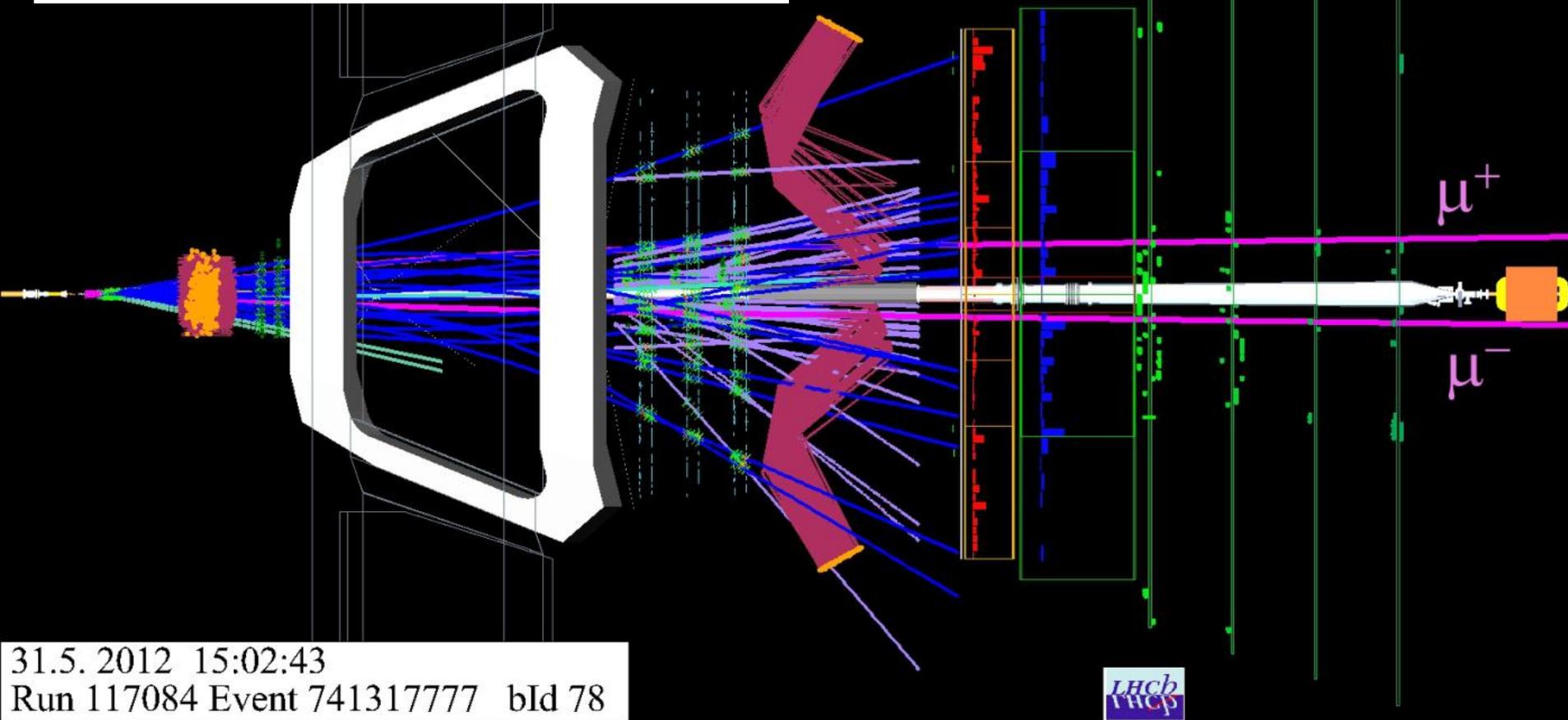
Les traces n'appartenant pas à l'événement ne sont pas représentées



LHCb: Violation CP, désintégrations rares

Exemple candidat $B_s \rightarrow \mu\mu$

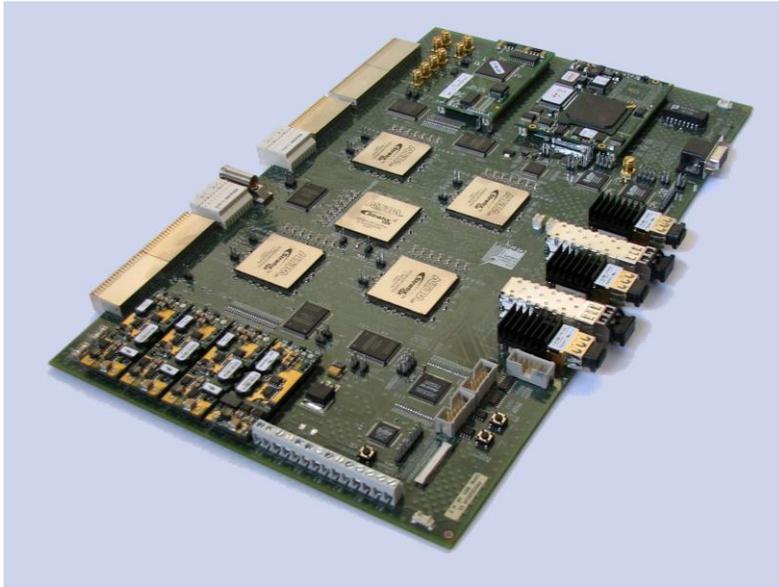
Identification π/K (RICH)
Vertexing (VELO) essentiels



31.5. 2012 15:02:43
Run 117084 Event 741317777 bId 78



LHCb: réalisations françaises



IN2P3/CNRS:
LAPP-Annecy
LPC-Clermont
CPP-Marseille
LPNHE-Paris
LAL-Orsay

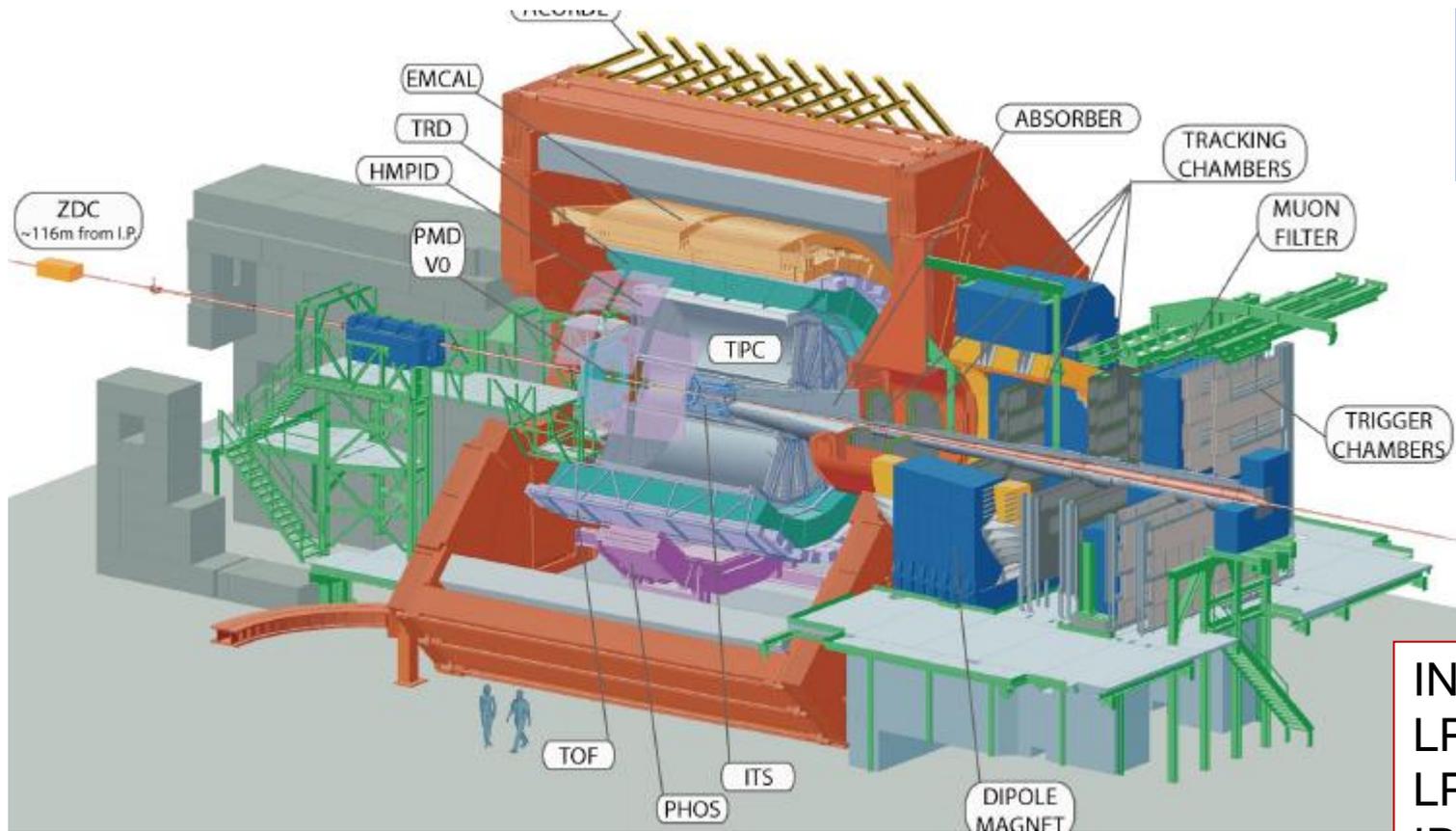


Carte « Calcul » trigger muon (CPPM)

96 liaisons sérieelles à 1.6 Gbps
1512 composants
7574 points de connections, 9457 via
18 couches, classe 6

Carte Lecture Calorimètre
Taille 30 × 40 cm²
3500 composants
11 BGAs avec chacun 500 contacts
12 couches

Alice: pp (low pT), pPb, PbPb



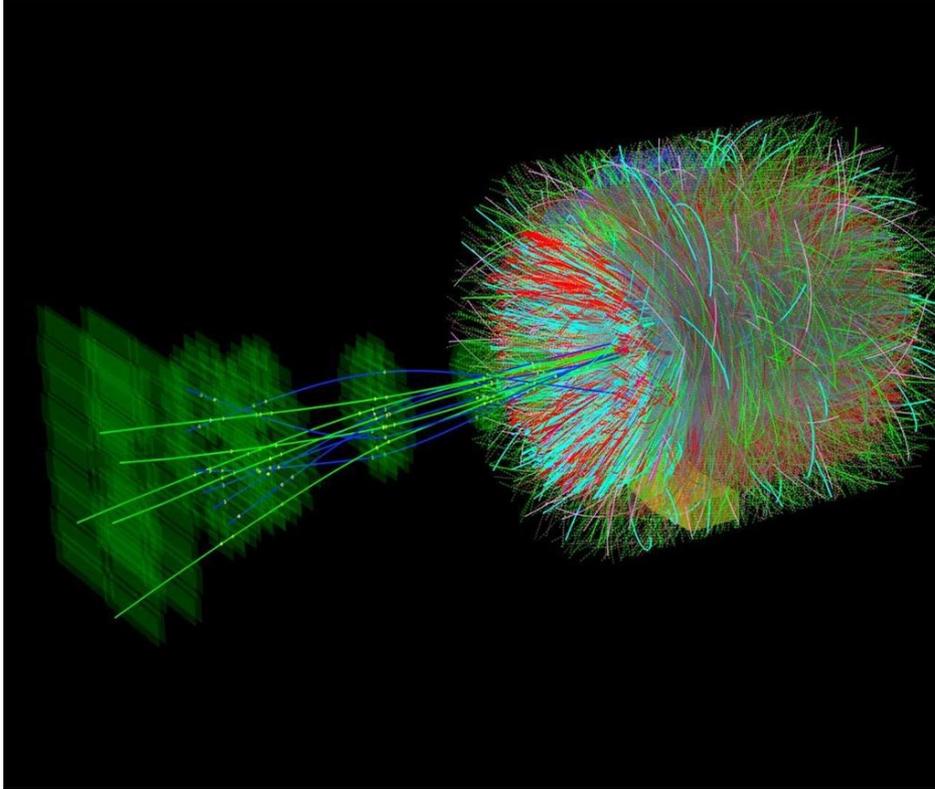
Detector:
Length: 26 meters
Height: 16 meters
Weight: 10,000 tons

France :
ITS
Bras muon
Calo EM

IN2P3/CNRS:
LPC-Clermont
LPSC-Grenoble
IPN-Lyon
Subatech-Nantes
IPN-Orsay
IPHC-Strasbourg
IRFU/CEA-Saclay

Processus de grande section efficace
QGP
TPC pour les hautes multiplicité (Pb-Pb)
Identification de particules essentielle (π /K/p/mu/el)

Alice : QGP

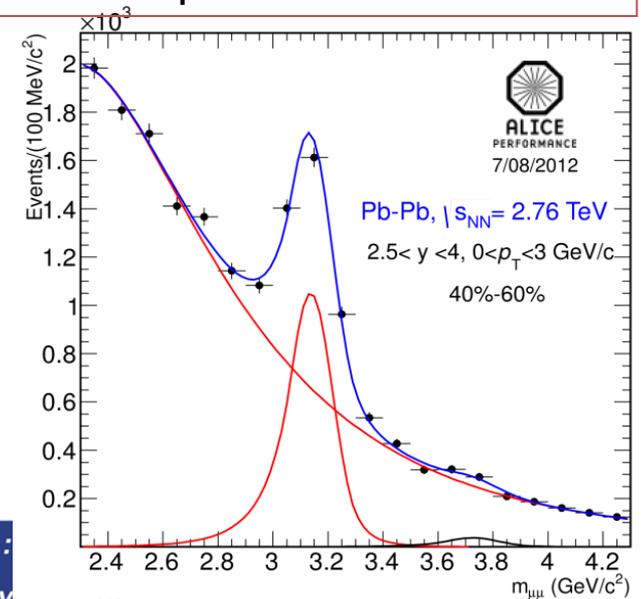


Collision « centrale » PbPb dans la TPC
et le bras muon
Plusieurs milliers de particules (pions)
pour une collision donnée

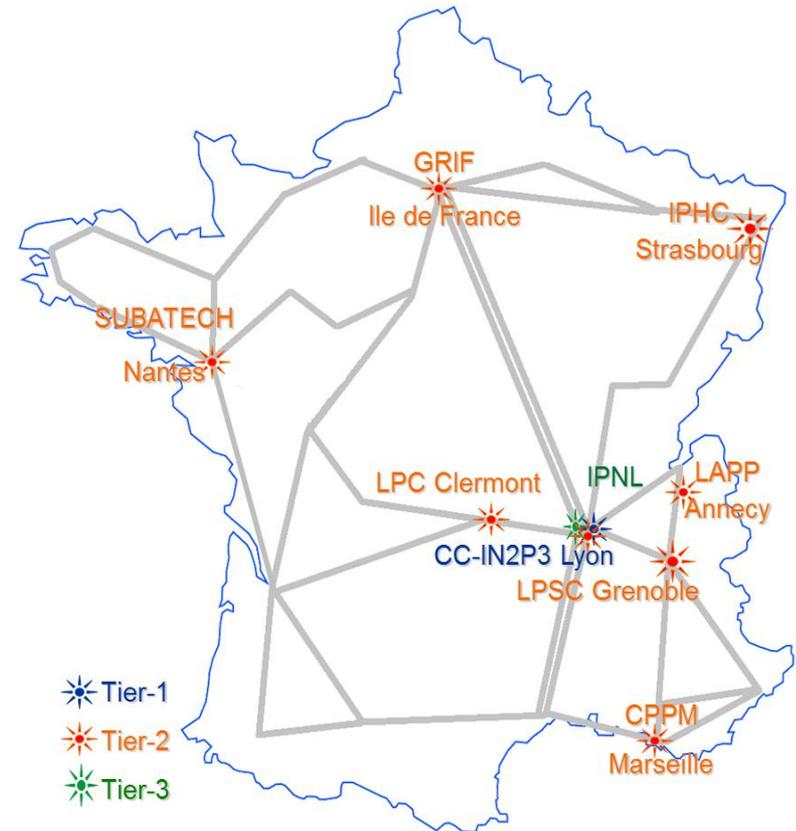


Installation modules Ecal

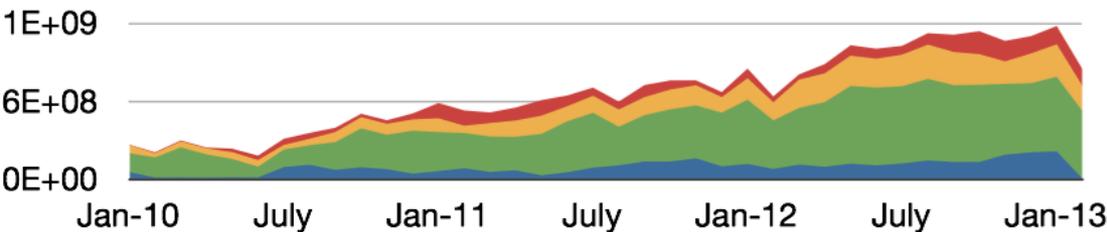
Detection J/ ψ dans le bras muon



LCG, LCG-France



Normalised CPU time [units HEPSPec06.Hours]



X 1.7 Jan 12 → Jan 13

1E⁰⁹ /mois ~ 30000 machines 8 cœurs 24h/24 7j/7

- Participation de la France à hauteur de 10% du CPU total mondial
- Environ 17 PB de données stockées sur le nuage FR ~10¹⁰ évènements

Le boson de Higgs, la France et le LHC :

25 ans de collaboration et de partenariat - 24 avril 2013



Upgrades pour la haute luminosité

Conditions

14 TeV, $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (écrêté)
25 ns \rightarrow ~ 120 collisions/bc ; le double si 50ns
> 300 fb^{-1} /an, pendant 10 ans (à partir de ~ 2023)

Demande: **Même niveau de performance qu'avec 25 int/bc**

Nécessité d'améliorer:

- tenue aux radiations (facteur ~ 6 / nominal [500 fb^{-1}])
- granularité du détecteur de vertex et tracking
- sélectivité du déclenchement
- capacité de l'acquisition de données (incluant LHCb)

\rightarrow requiert un nouveau détecteur de traces pour ATLAS et CMS

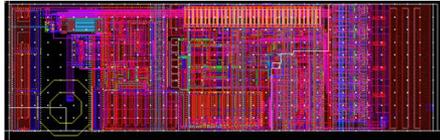
\rightarrow 2 illustrations Pixels ATLAS

Trigger de traces CMS

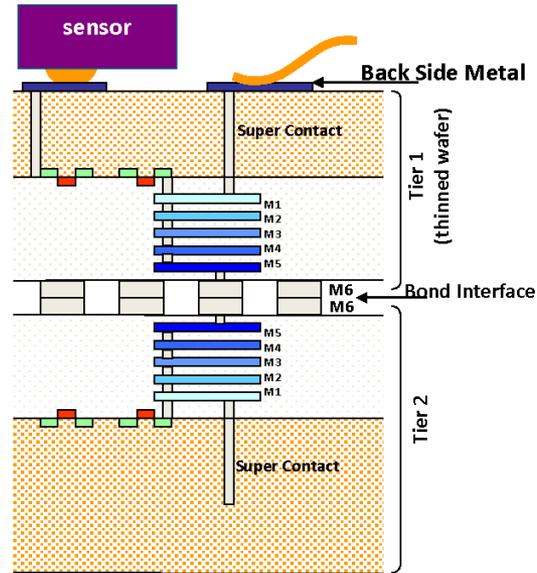
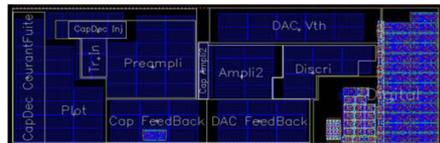


ATLAS pixels : Développements d'électronique

Analog tier

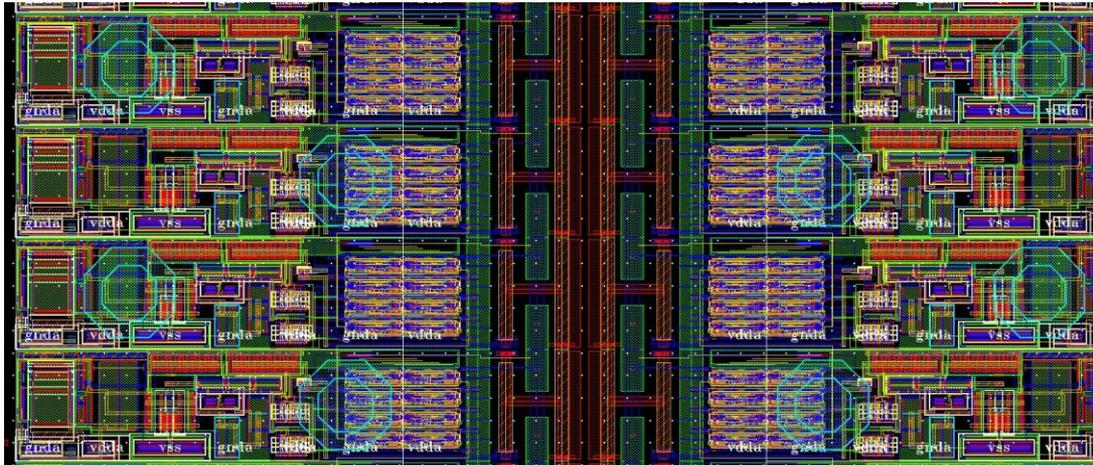


Digital tier



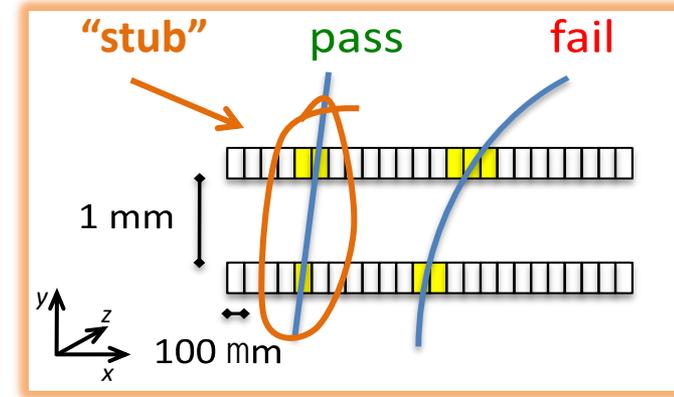
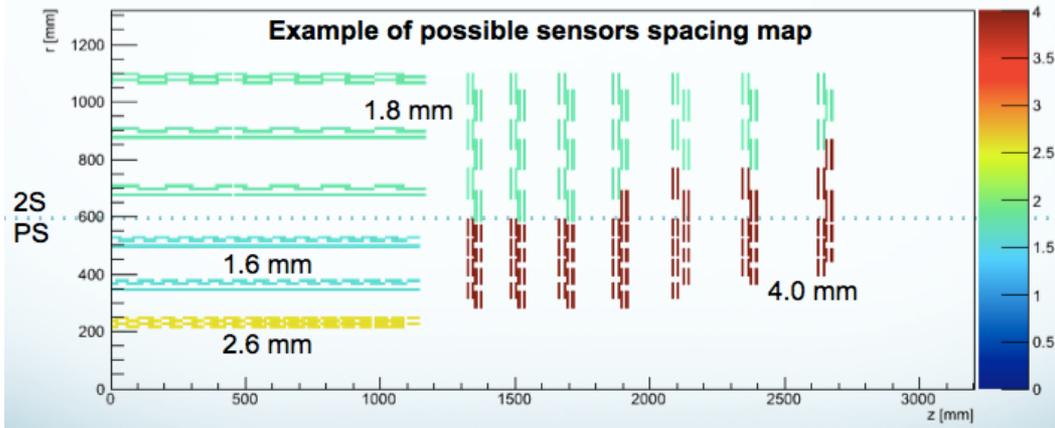
Electronique « 3D »
en 130 nm
Pixels 50 x 125 microns

Doit résister à 1 Grad
et 10^{16} n/cm²

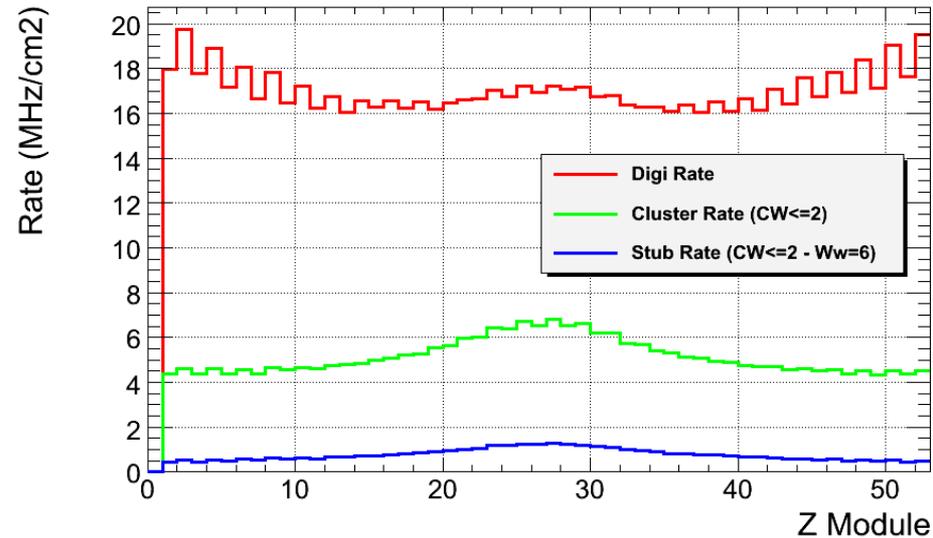


Electronique 65 nm
Pixels 25 x 125 microns
(8 circuits/dessin)
Emplacement des bb
visible/transparence

Upgrades: track trigger CMS



Equivalent d'une coupure en pT
 Gagne un facteur ~ 5 sur la quantité d'info à transférer
 Peut permettre d'utiliser l'info des traces au niveau 1 du déclenchement
 Requier un transfert à très large bande entre les 2 couches de détecteur



Conclusion

- La découverte du boson de Higgs est un succès planétaire, après des efforts intenses :
 - Presque 50 ans depuis les prédictions théoriques (1964)
 - Presque 30 ans depuis le premier « workshop » sur le LHC (1984)
- Concentration des forces de la discipline autour du LHC, au CERN
 - Le collisionneur
 - Les expériences
 - La grille de calculont parfaitement fonctionné (malgré des retards, des problèmes,..) inévitables pour une entreprise de cette taille, avec des technologies à la pointe
- Les équipes scientifiques
L'industrie française ont joué un rôle de premier plan
- Le programme « haute luminosité » représente un « challenge » d'une envergure comparable au programme initial.

