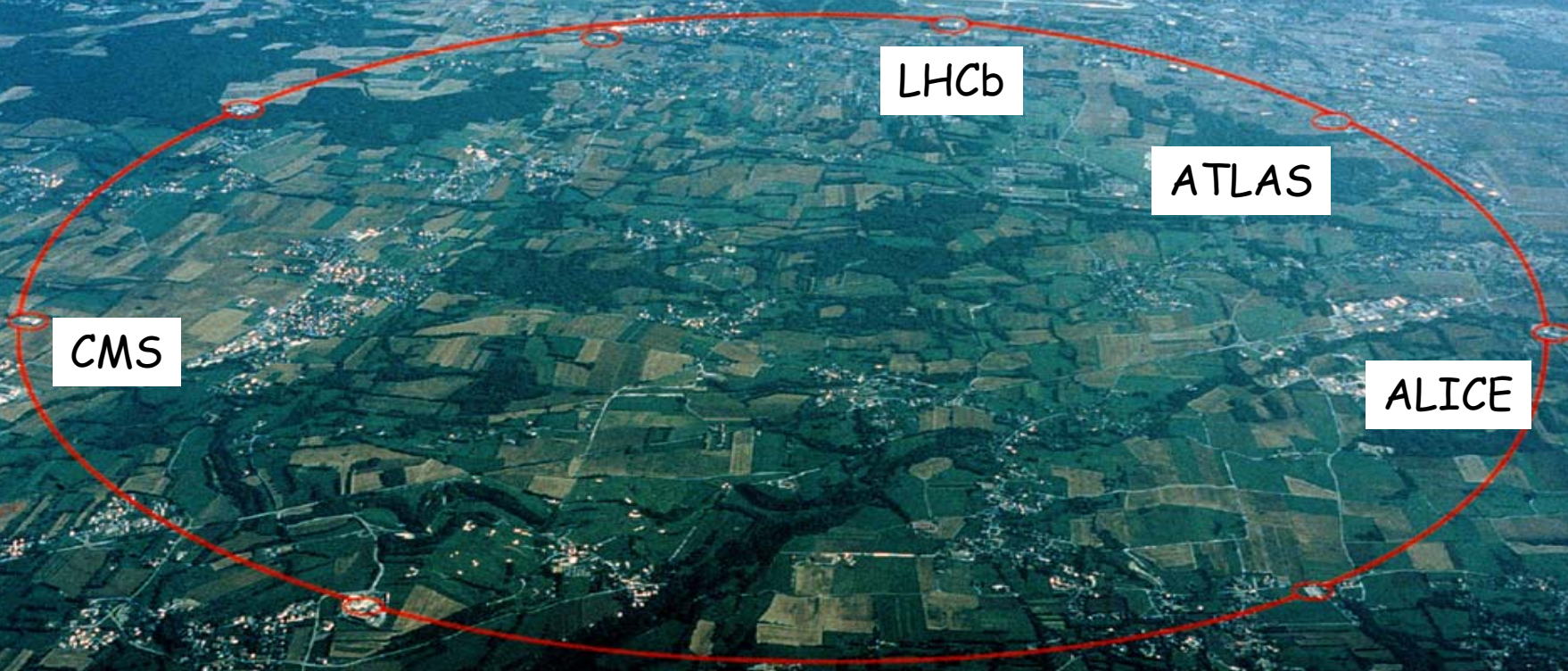


Les Détecteurs au LHC : Concept, comportement, performance, upgrades,....



Foreword of the Document presented to the Krakow meeting on European Strategy for Particle Physics (Sept 2012)

The ATLAS and CMS Collaborations

CMS and ATLAS have discovered a new Higgs-like boson with a mass of 125-126 GeV. This opens a new chapter in the history of particle physics.....

The discovery of the new boson was anchored by the final states with the best mass resolution, namely $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ$ ($4e$, 4μ or $2e2\mu$). These modes placed stringent requirements on detector design and performance.

Indeed, the ability to search for the SM Higgs boson over the fully allowed mass range played a crucial role in the conceptual design and benchmarking of the experiments and also resulted in excellent sensitivity to a wide array of signals of new physics at the TeV energy scale.

This demonstrates the great value of a bold early conceptual design, a systematic programme of development and construction, and a detailed understanding of detector performance, in confronting challenging physics goals.

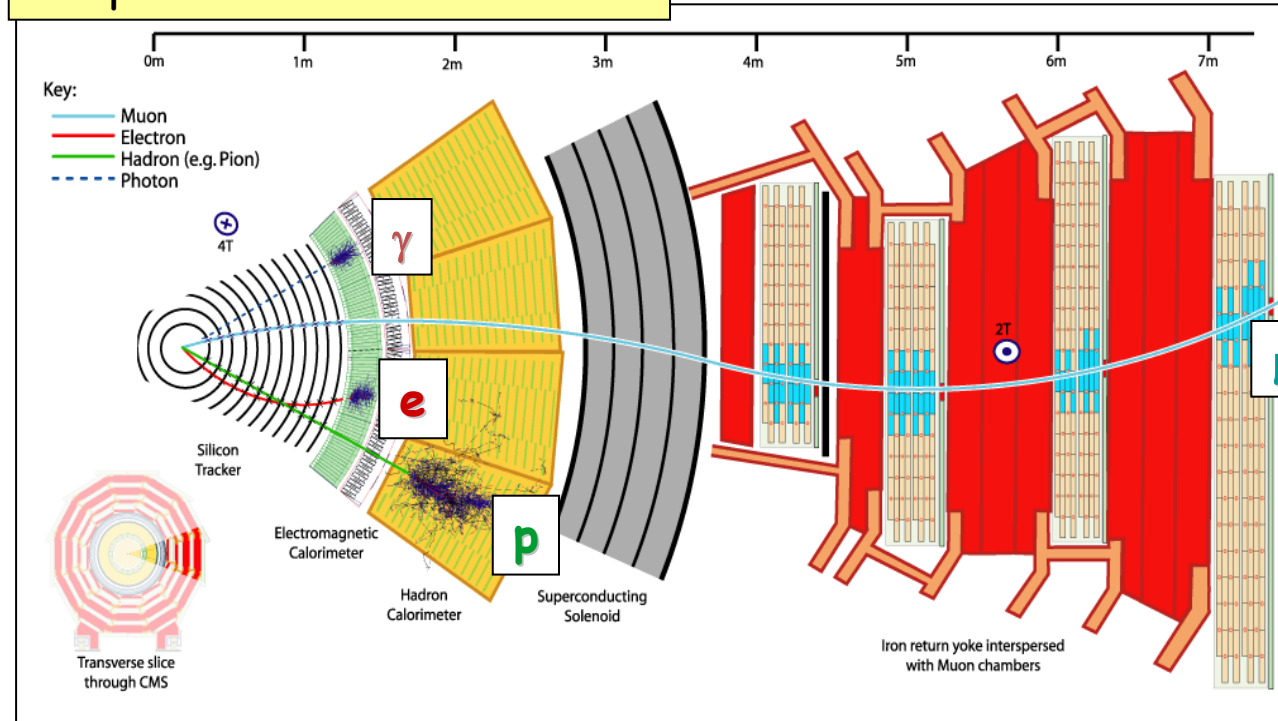
- Concepts
- Design/comportement
- Performances
- Cas particulier de LHCb
- Upgrades

1) Concepts

- Aimant/systeme muons
- Contraintes dues au taux d'évenements et radiations (prix a payer / haute luminosité)
- Technologies “rapides et robustes”
- Trigger !!
 - 1 GHz collisions(40MHz-bc-rate)-> ~300 Hz “on tape”

ATLAS et CMS : démarche commune

Coupe d'un secteur de CMS



- Détecteur “ 4π ” spectro à muons

- Calorimétrie e, γ de précision [$H \rightarrow \gamma\gamma$]

- Calorimétrie Jets et E_T miss

- Trajectographe+vertex (quark b, lepton τ)

- Déclenchement sans temps mort (**pipeline séquencé à 25ns ou 40 MHz**)

- Ecriture de ~ 300 evt/s sur support pérenne

- >10 ans de fonctionnement **sans détérioration de performance / radiations**

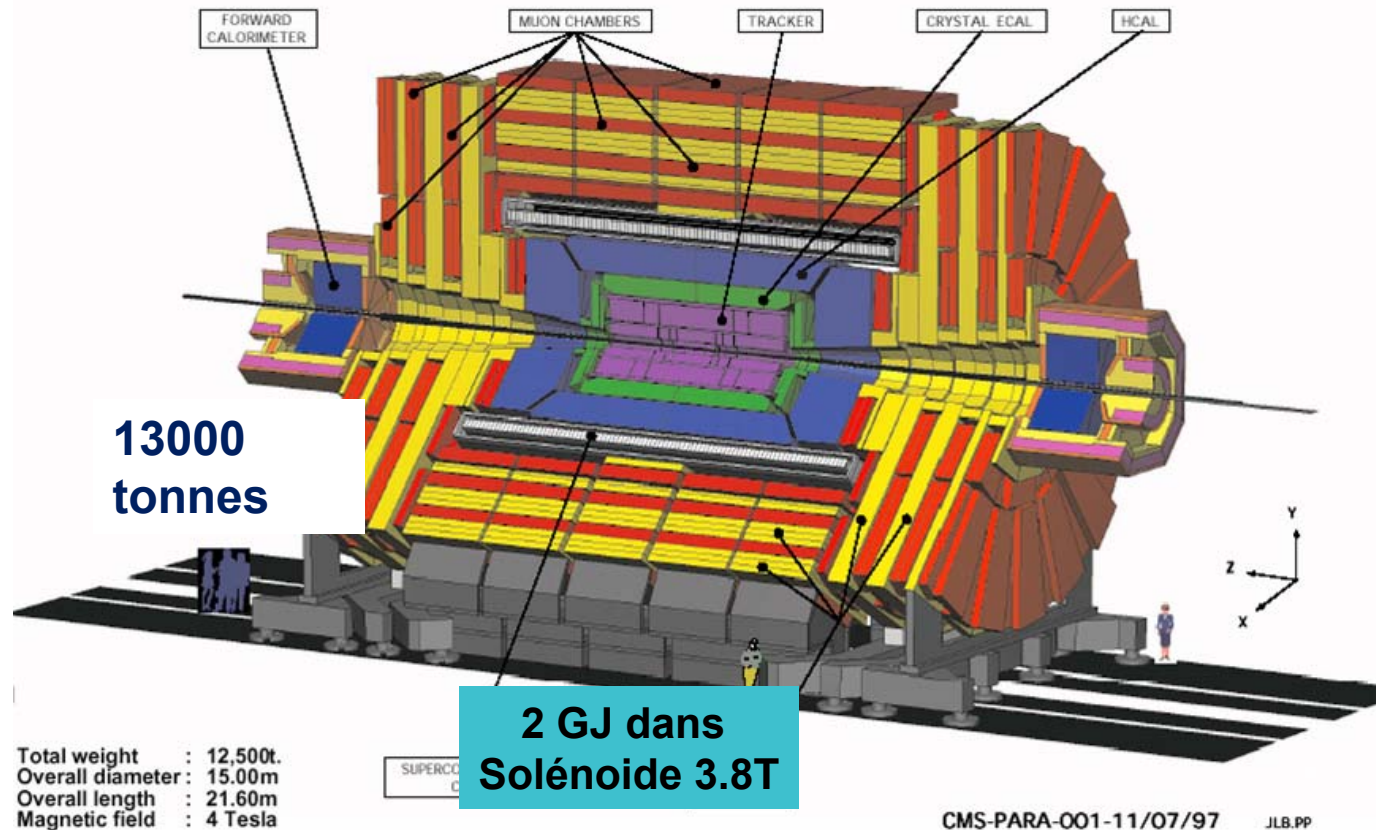
Experience CMS

22 m

15 m

13000 tonnes

CMS A Compact Solenoidal Detector for LHC



Collaboration de >2000 chercheurs répartis dans ~170 Instituts

Experience ATLAS

Length : ~ 46 m
Radius : ~ 12 m
Weight : ~ 7000 tons

Muon Spectrometer ($|\eta| < 2.7$) : air-core toroids + muon chambers → trigger and measurement with momentum resolution $< 10\%$ up to $E_\mu \sim 1$ TeV

3-level trigger reducing the rate from 40 MHz to ~200 Hz

Inner Detector ($|\eta| < 2.5$, $B=2$ T):
Si Pixels, Si strips, Transition Radiation detector (straws)
Precise tracking and vertexing, e/π separation
Momentum resolution:
 $\sigma/p_T \sim 3.8 \times 10^{-4} p_T (\text{GeV}) \oplus 0.015$

EM calorimeter: Pb-LAr Accordion
 e/γ trigger, identification and measurement
E-resolution: $\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E}$

HAD calorimetry ($|\eta| < 5$): segmentation, hermeticity
Fe/scintillator Tiles (central), Cu/W-LAr (fwd)
Trigger and measurement of jets and missing E_T
E-resolution: $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 0.03$

D.Fournier

Concept : choix du systeme magnétique

- Pionniers : ISR (années '70)
 - SFM 2 dipoles inversés (diffractive physics)
 - CCOR(Camilleri,DiLella,Lederman): Solenoide supra+drift chb
(visionnaire,..mais dépouillé...)
 - : SPEAR-PEP (années '70-80)
 - MARKI : solenoide
 - MARK II :solenoide (+ drfit chambers+ LAr)

- Plus recent ('80) SppS
 - UA1 : dipole
 - bon pouvoir d'analyse a 0 degre (Oz)
 - effet sur les faisceaux
 - pas de pouvoir magnetique selon Ox
 - UA2 : pas de champ magnétique!
- Recent: Tevatron
 - CDF: Solenoide
 - D0 phase I: pas de champ central, toroide a fer/muons
 - phase II: ajout d'un solenoide dans le calorimetre central

(sans champ magnetique central, les traces de basse impulsion ne sont pas faciles a distinguer de celles +energies->vertexing peu efficace)

- Recent:LEP,Hera ('90-2000)

- solénoïdes avec retour de fer (Aleph,Delphi,Opal,H1,Zeus)

- Grand solénoïde sans retour de fer(L3)

- (aussi proposé pour GEM/SSC)

- Permet mesure des muons (BL^2)sans la diffusion multiple due au fer. mais champ de fuite....→toroïde ATLAS

- Inconvénients du solénoïde?

- pouvoir magnétique chute comme $\sin(\theta)$ au delà limite géométrique

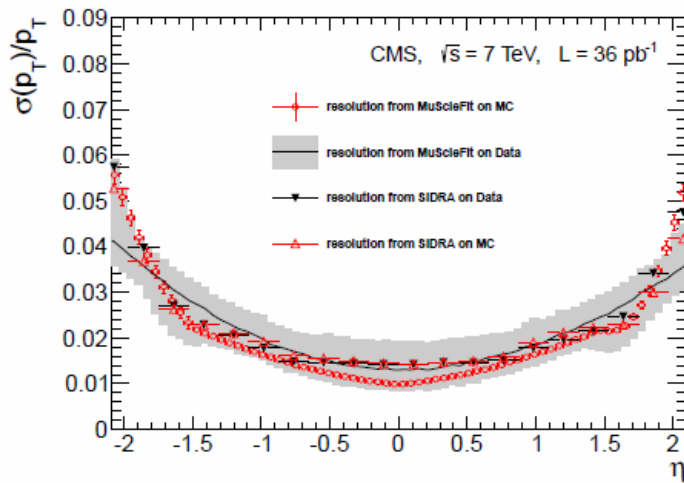
- A champ donné, l'épaisseur (pour tenir les contraintes mécaniques) croît comme le rayon-> devient "monstrueux"

- si le solénoïde contient : tracking+calo EM+ calo had

- sensibilité au champ élimine certains détecteurs(PM)

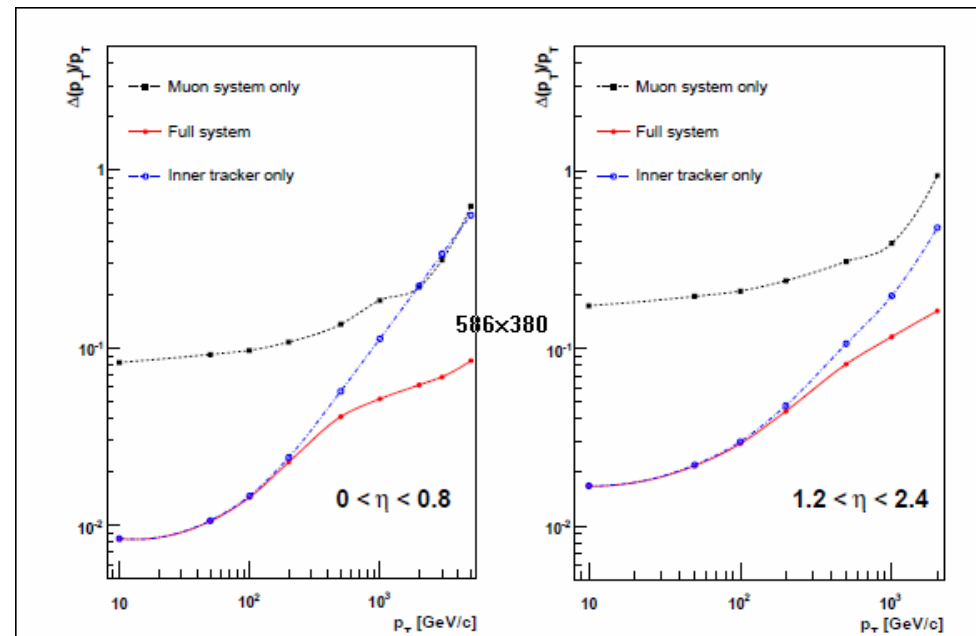
Aimant/système muons CMS

- Solenoid $R_{int} = 2.95\text{m}$ full length = 13 m weight (cold mass) = 220 tons
 $B = 3.8\text{ T}$ (4-layer winding) ; $\eta_{max} = 1.4$
 energie stockée : 2.6 GJ
 epaisseur radiale: 85 cm, $\sim 5X_0$, $\sim 1.6 \lambda$
 - Retour de fer (10kT)
- instrumenté pour muon trigger,
 muon ID, muon momentum



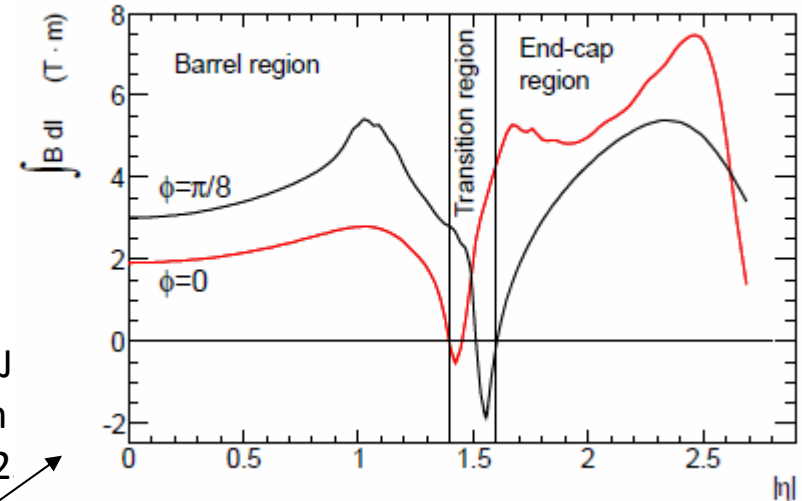
Data-muon inclusif

MC



Systeme magnetique/muons ATLAS

- “petit” solenoide, devant le calorimetre
 $R_{int}=1.23\text{m}$, full length=5.8m, w=5.7 tons
 $B=2\text{T}$, stored energy=0.04 GJ
 epaisseur 5cm, $0.6X0$, 0.2λ
 retour de fer=had cal+girder
- Barrel toroid: 8 bobines $L=25.3\text{ m rad ext}=5.3\text{m}$
 $w=830\text{ t}$ $B_{max/min}=2.5/0.2\text{ T}$, stored energy=1.08 GJ
- EndCap toroid: 8 bobines $L=25.3\text{ m rad ext}=4.5\text{m}$
 $w=2x240\text{t}$ $B_{max/min}=3.5/0.2\text{ T}$, stored energy=2x0.2



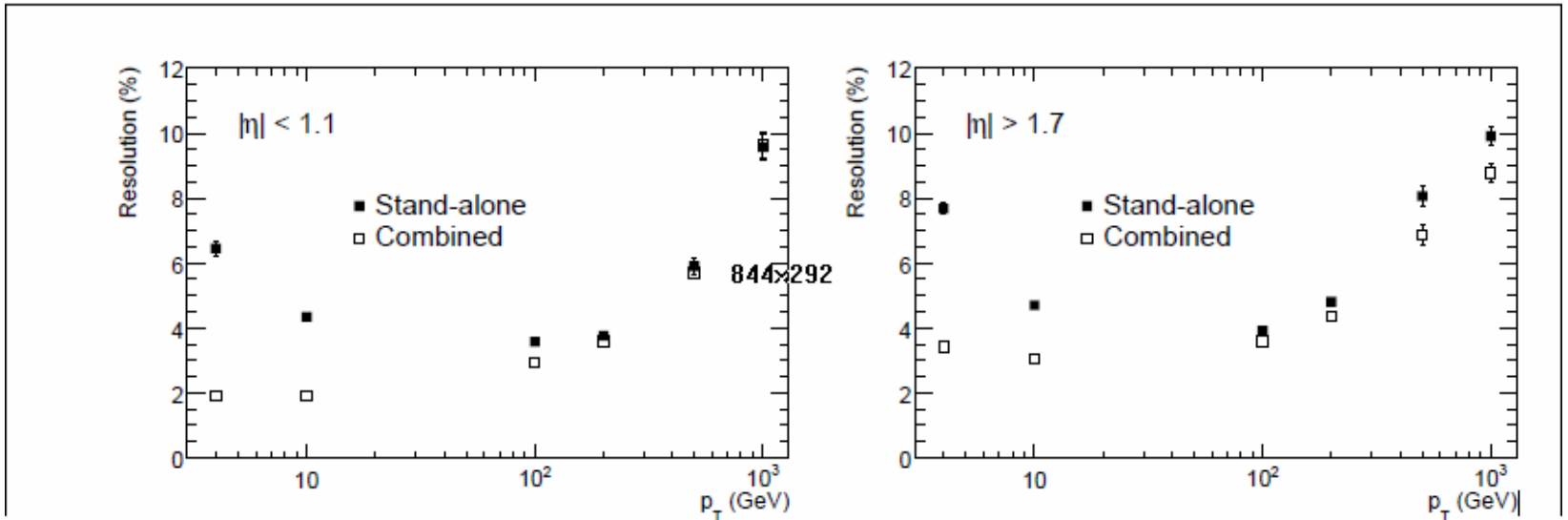
Le “bending power” est \sim constant jusqu’a $\eta \sim 2.5$

Le systeme toroidal a air permet la mesure des muons dans un environnement sans scattering multiple, et sans champ de fuite.

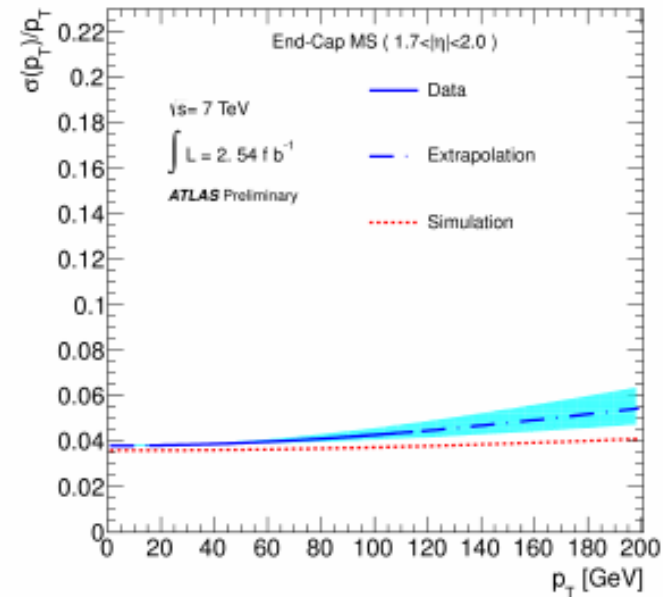
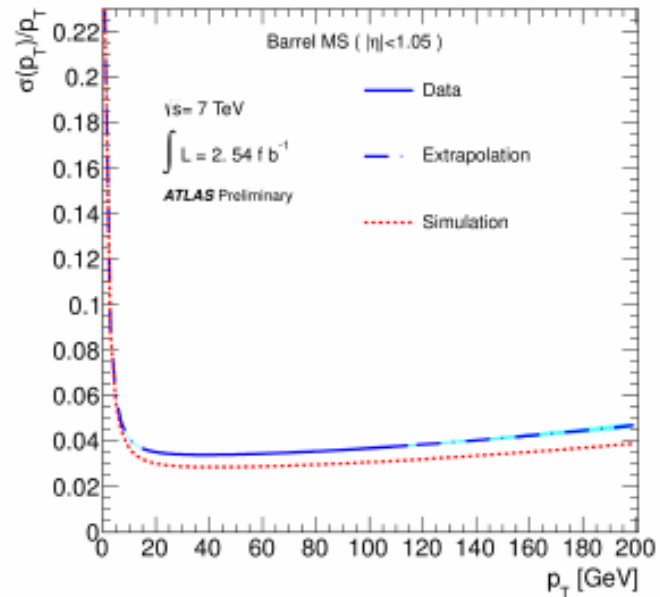
Necessite des mesures de position tres precises (alignement) a cause d’un “bending power” plus faible que retour de fer du solenoide de CMS

Atlas muon performance

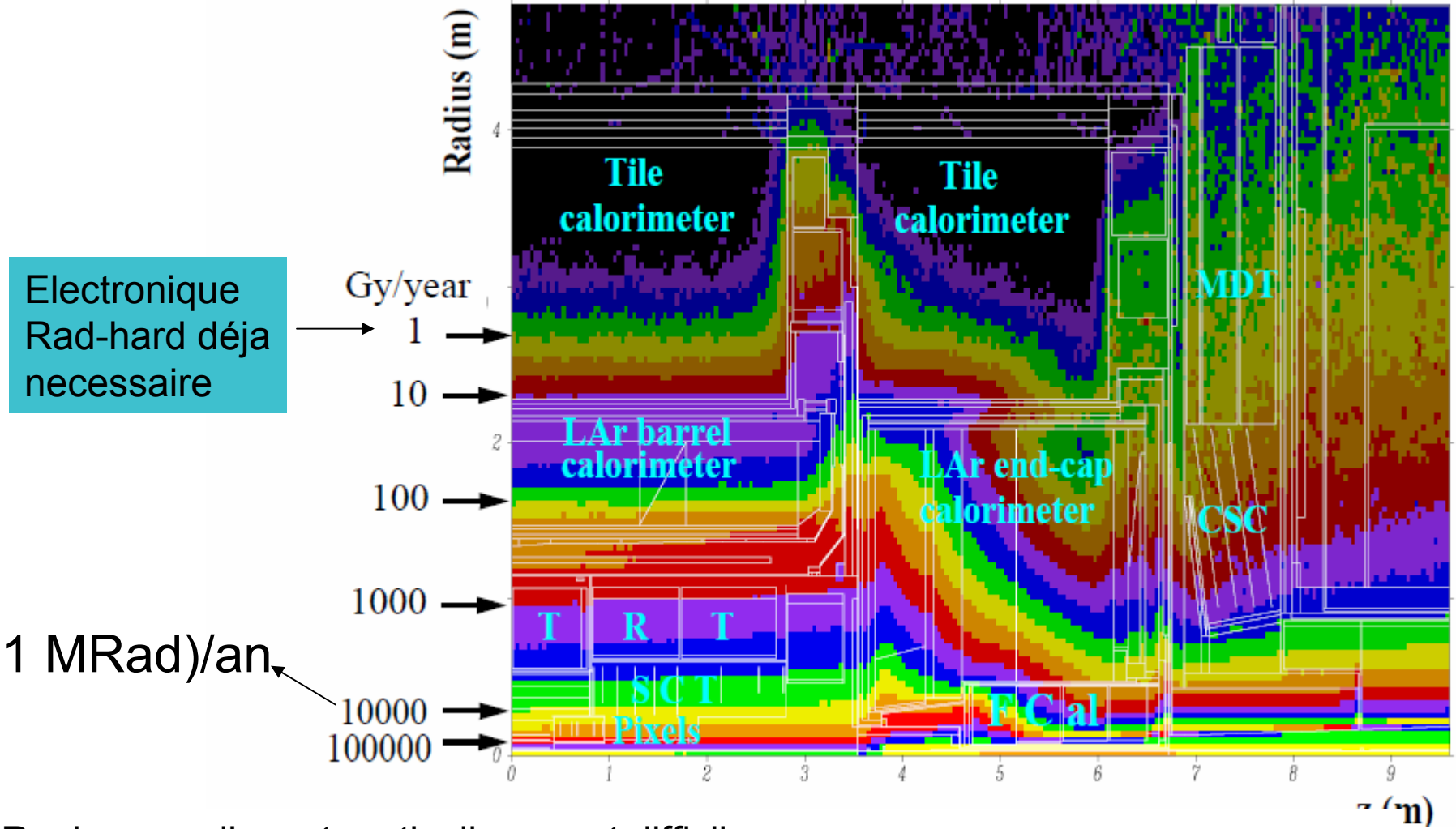
MC



Atlas “stand-alone”
spectrometer
better/CMS
CMS “combined”
better
(for $\eta < 1$)/Atlas



Concept:Radiations(14 TeV // 10³⁴//1 an)

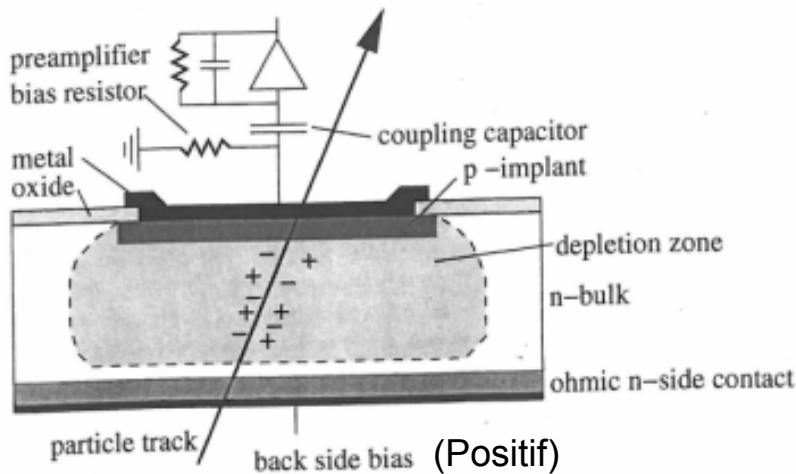


Region vers l'avant particulièrement difficile.

CMS a choisi de deporter son Hadronic Forward calo a 11m du point de collision

Technologies rapides et robustes?

- Tracking:
 - Straw tubes/ATLAS aux plus grands rayons .Choix du gaz critique pour eviter la polymerisation sur les fils : Xe-CO2-(Xe pour TR)
 - MSGCs considérées un temps pour CMS
 - Particulierement delicat: pixels/vertexing
 - Technologie faisant l'unanimité: detecteurs Silicium: “diodes désertées”



$$V_{dep} = eN_D d^2 / 2\epsilon$$

N_D = nb of donors/unit vol
 d = thickness
 ϵ = permittivity of Si

- Calorimétrie:
 - liquides nobles (Argon)
 - Scintillateurs inorganiques (cristaux)
 - fibres de quartz pour HF/CMS
- Performance du Calo EM “supercritique” pour $H \rightarrow 2$ photons
- canal a servi de “benchmark” pour le choix de la technologie
- A plus grand rayon, a cause des doses beaucoup plus faibles, un sandwich “plaque metallique-scintillateur plastique” a pu etre utilisé pour le calorimetre hadronique, dans ATLAS comme dans CMS.

2-Design et comportement

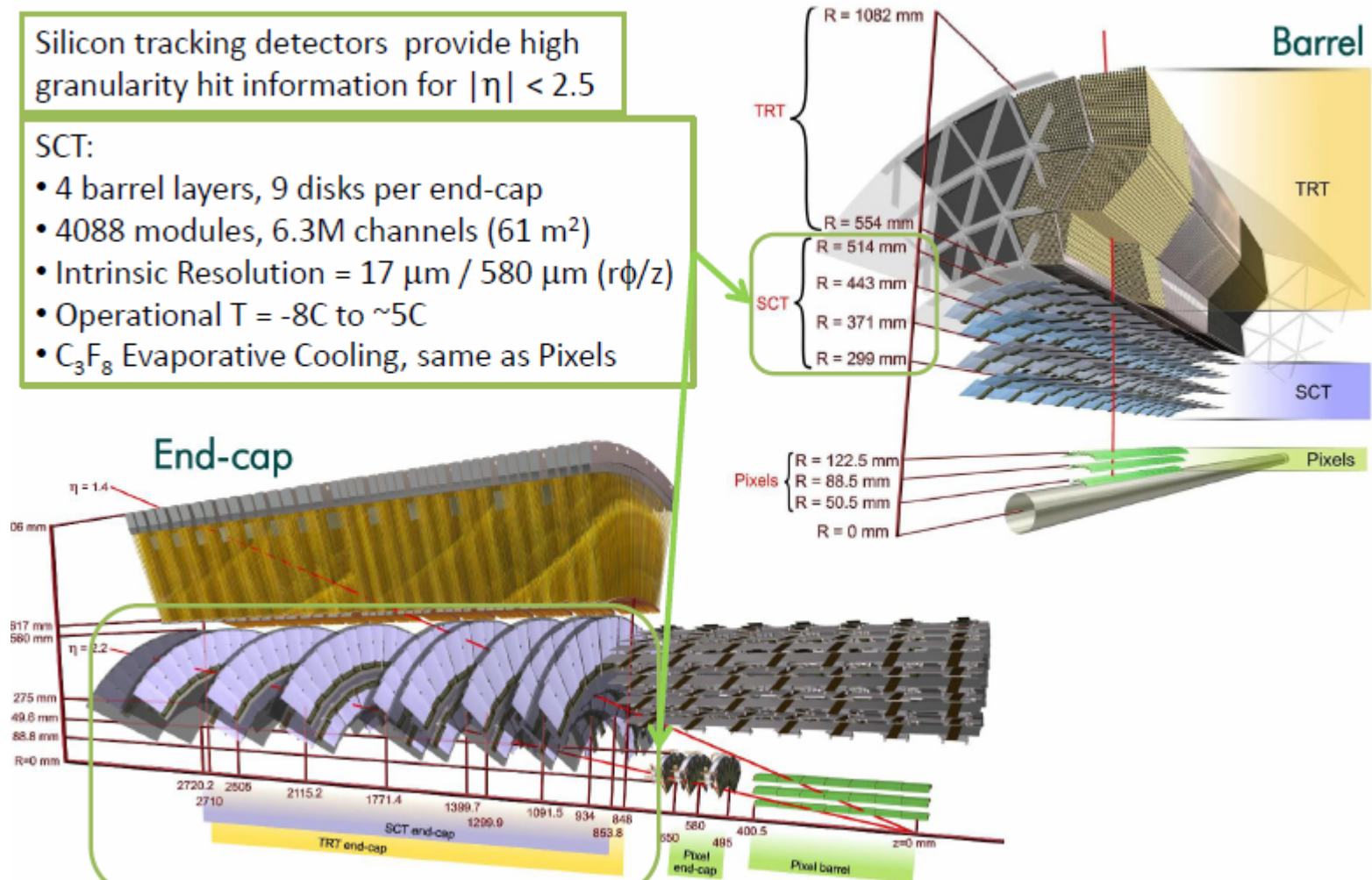
2-1 Détecteurs de traces (qques exemples)

Atlas tracking

Silicon tracking detectors provide high granularity hit information for $|\eta| < 2.5$

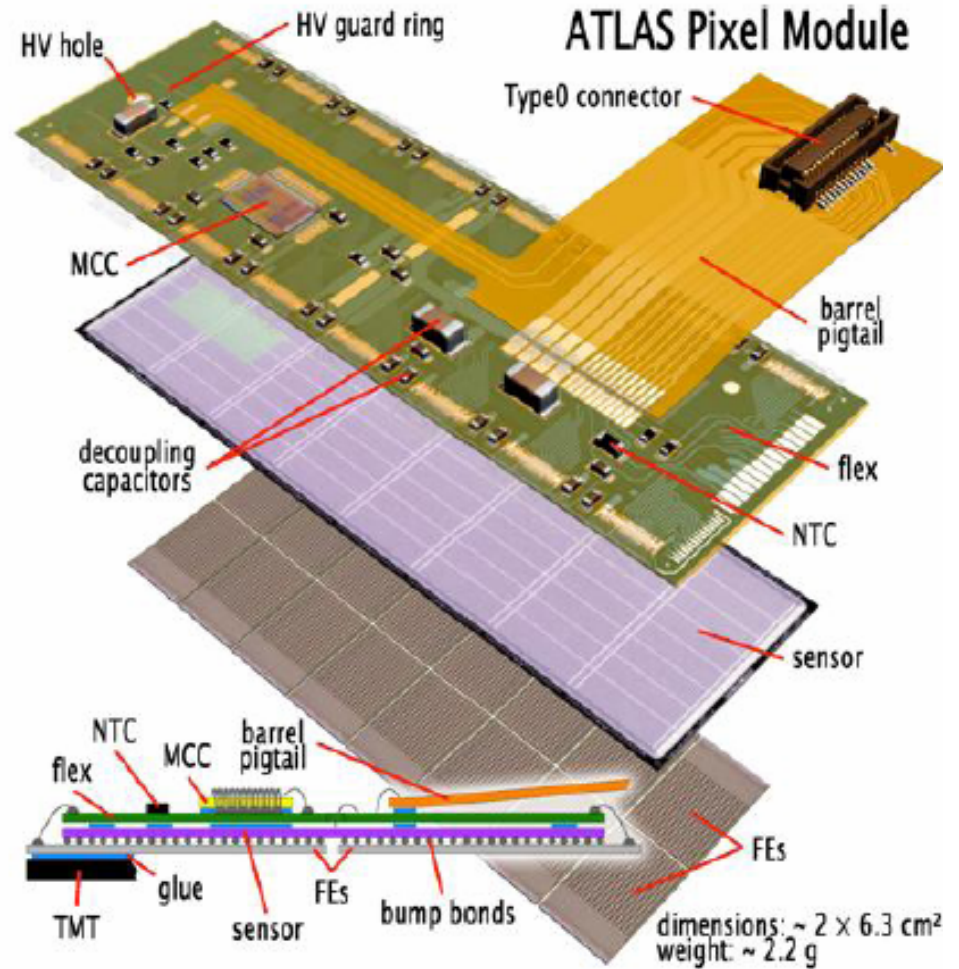
SCT:

- 4 barrel layers, 9 disks per end-cap
- 4088 modules, 6.3M channels (61 m²)
- Intrinsic Resolution = 17 μm / 580 μm (r ϕ /z)
- Operational T = -8C to ~5C
- C₃F₈ Evaporative Cooling, same as Pixels



Atlas-pixels

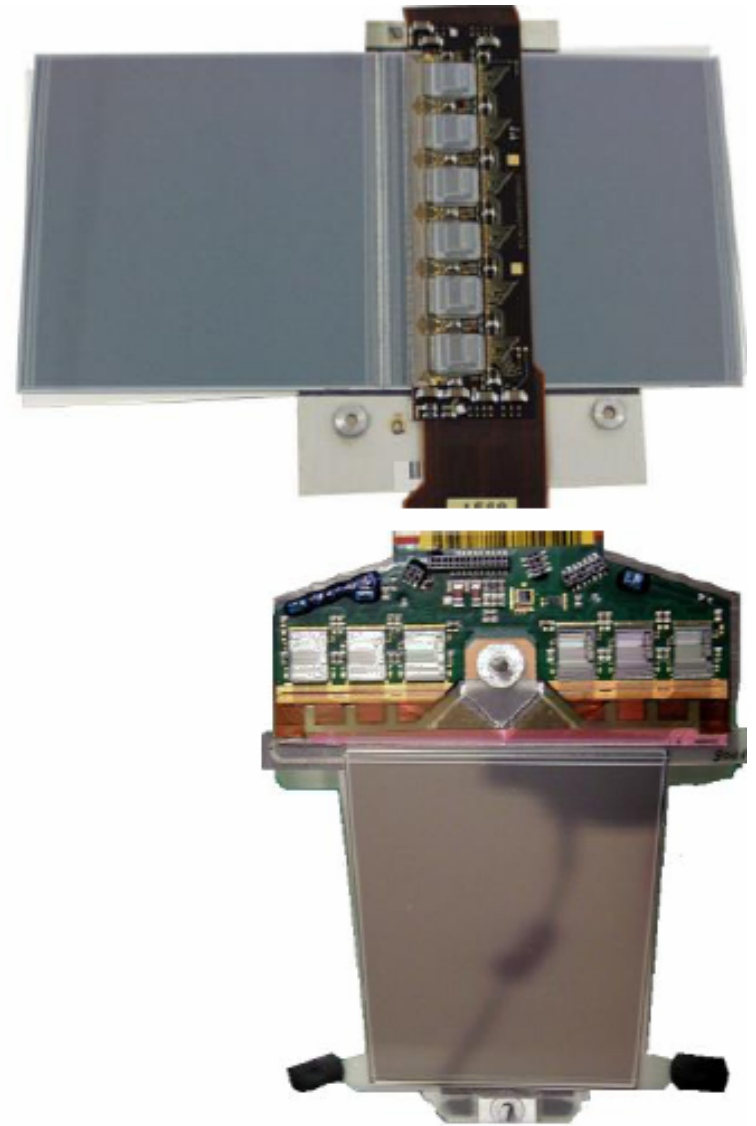
- 250 μm thick n⁺-in-n sensor with standard pixel dimension 50x400 μm
- 47232 pixels (46080 readout channels), 16 Front End chips bump bonded
- Flex hybrid glued to backside of sensor, voltage distribution, clock and configuration via MCC, event building via MCC, readout
- Radiation tolerance: 500 kGy, 10^{15} 1MeV n_{eq} cm⁻²
- 1744 modules in total

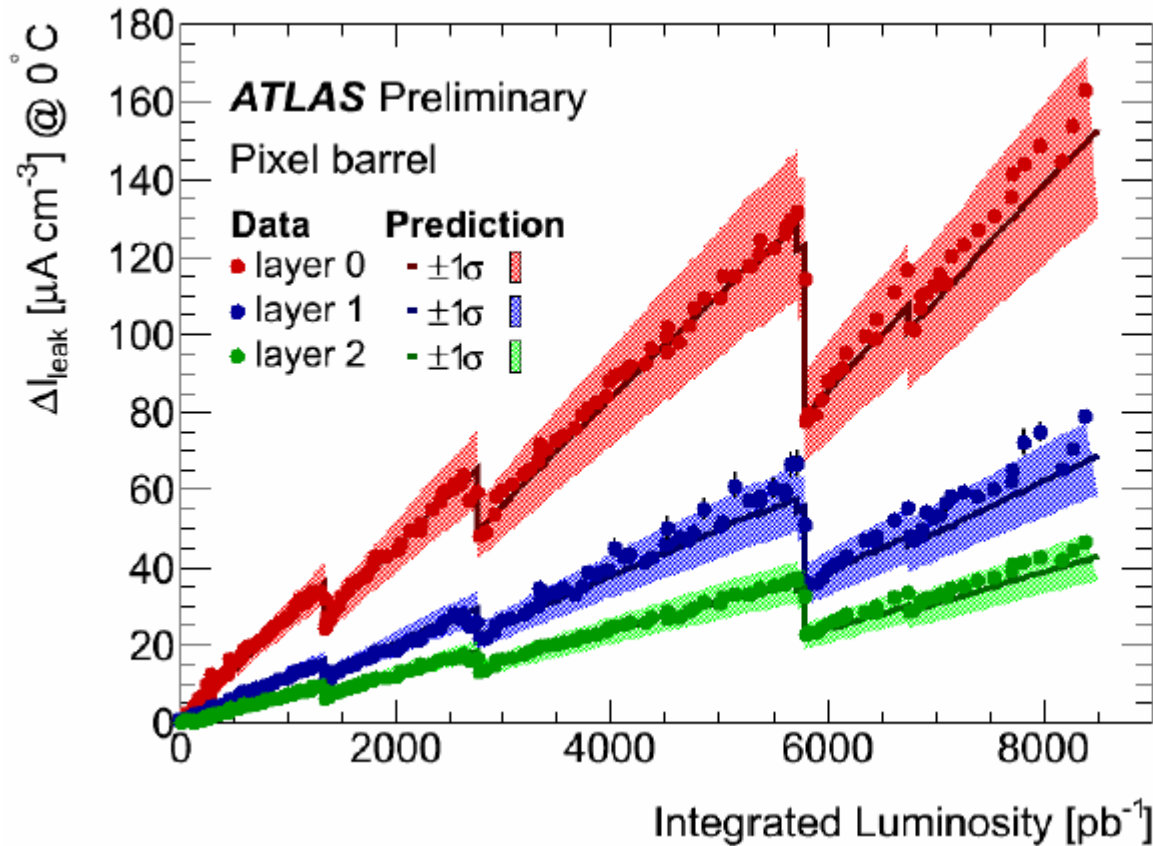


80 millions pixels au total

Atlas-SCT

- Barrel Modules
 - 1 design
 - 80 μm pitch
 - 2112 in total
- End-cap Modules
 - 5 different designs
 - 57 – 90 μm pitch
 - 1976 in total
- 2 planar sensors glued onto a thermally conductive support
- 40 mrad stereo angle
- 1536 channels per module
- Binary readout, 132 bit deep buffer

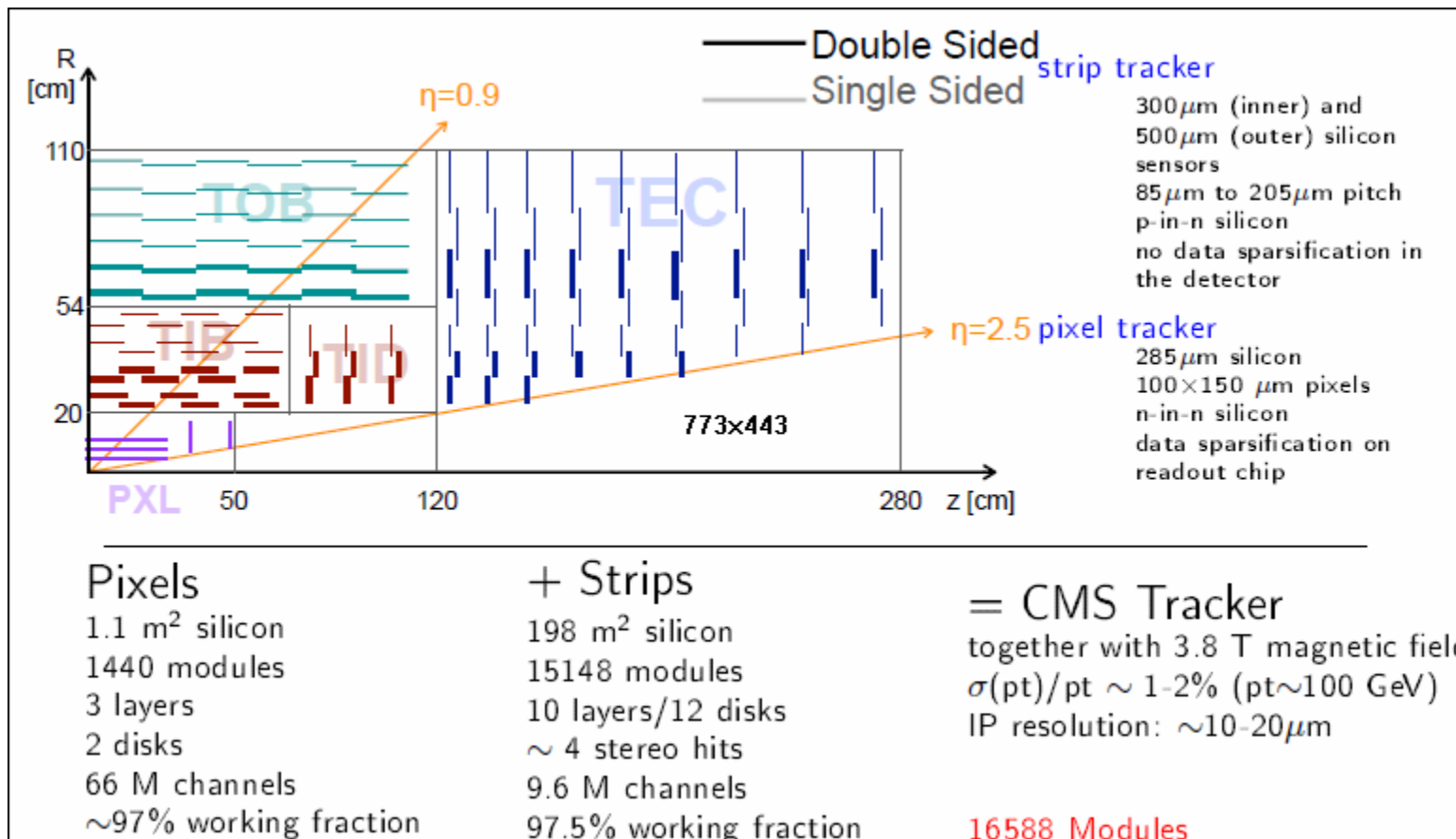


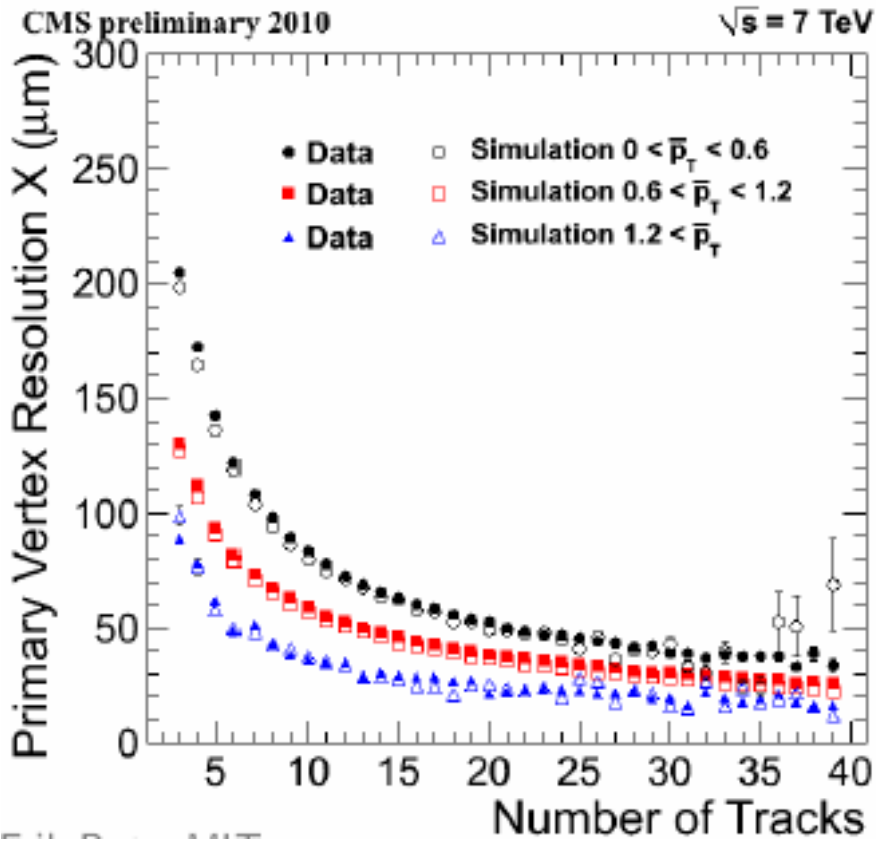


M. Keil,
RD50 Workshop,
30 May 2012

Courant de fuite conforme au modèle (rescaling de $+\sim 15\%$)
 Inversion attendue pour fin 2012 (inner layer)
 Fonctionne globalement de façon très satisfaisante:
 96% modules actifs ; soucis/VECSEL résolu

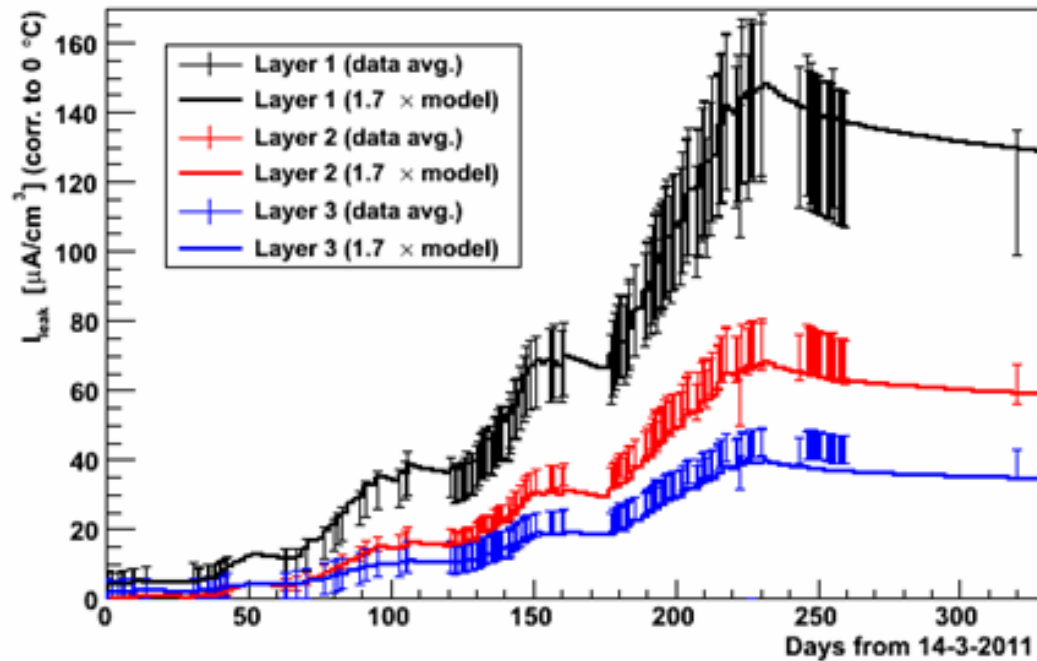
2-1 CMS tracking (qqes exemples)





En pratique, après alignement on utilise le centroïde du croisement des faisceaux et son rms ($15 \mu\text{m}$) comme erreur

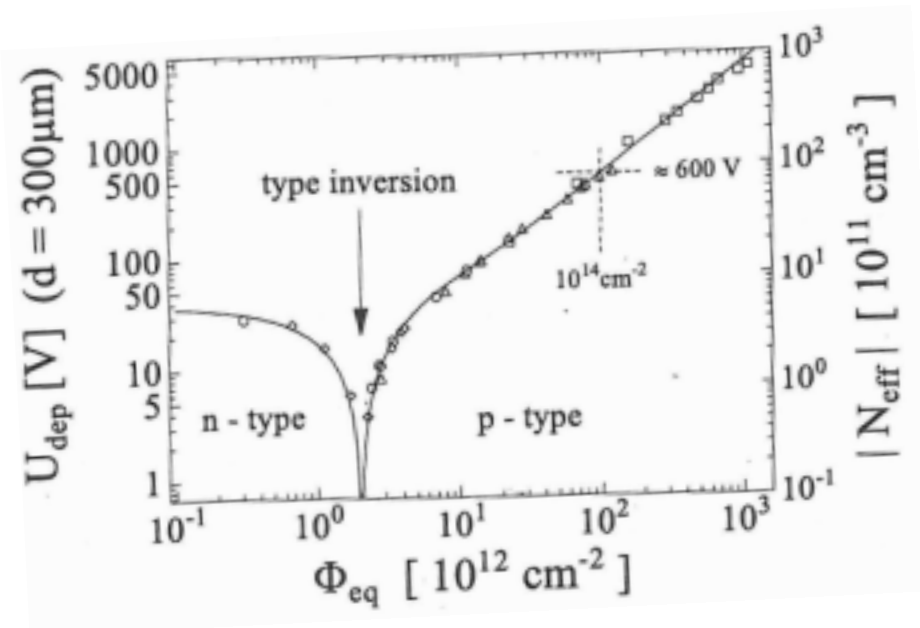
Courant de fuite-CMS



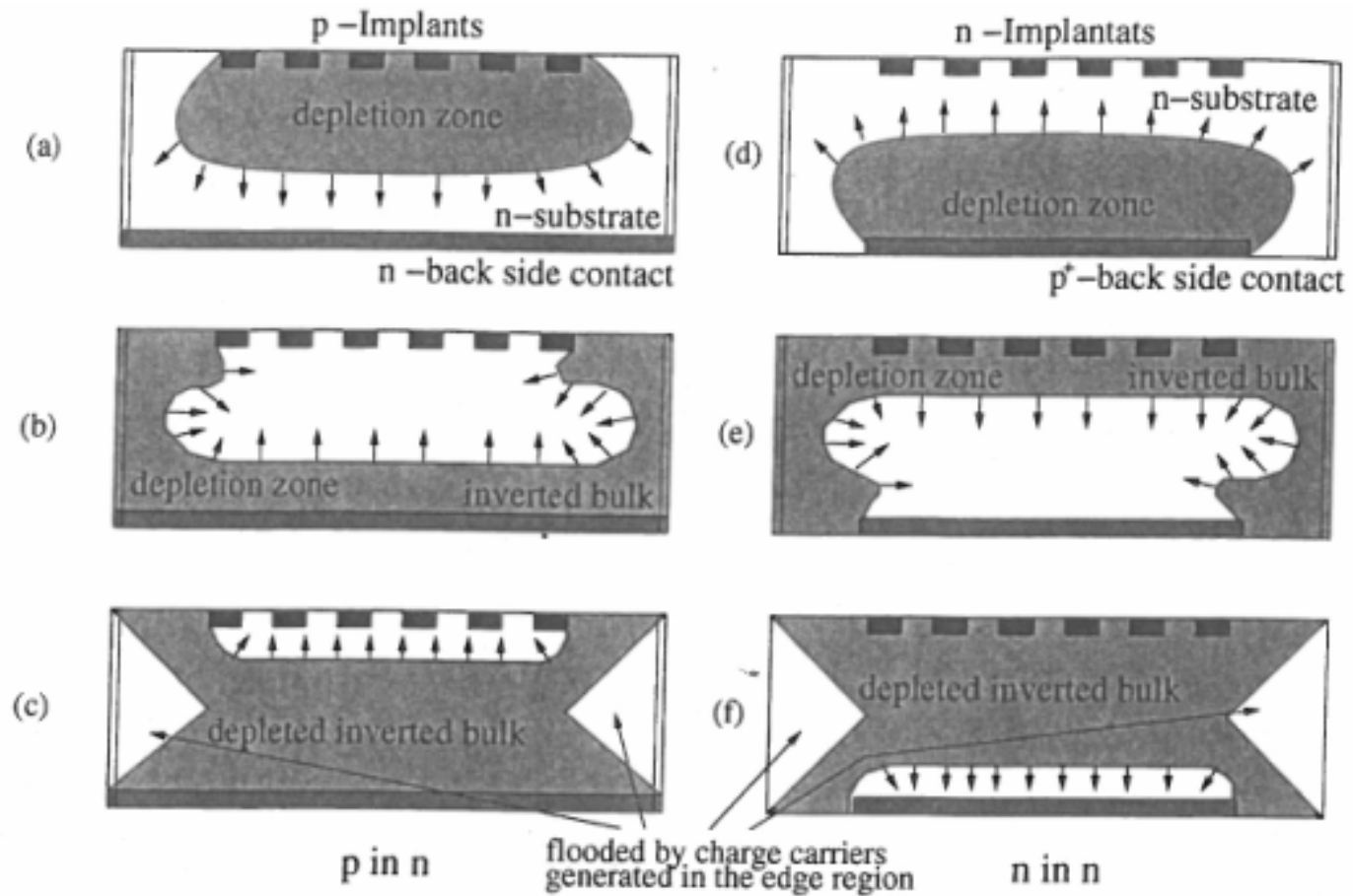
- Fair agreement between model and measurement, when a „cheating factor“ of 1.7 is applied

2-1- effet des radiations: generation de defauts cristallins

- Courants de fuite: defauts proche de la bande de conduction génèrent des paires electron-trous
- Les defauts créés sont principalement de type p:
→ inversion de type si on est parti d'un type n (bulk)

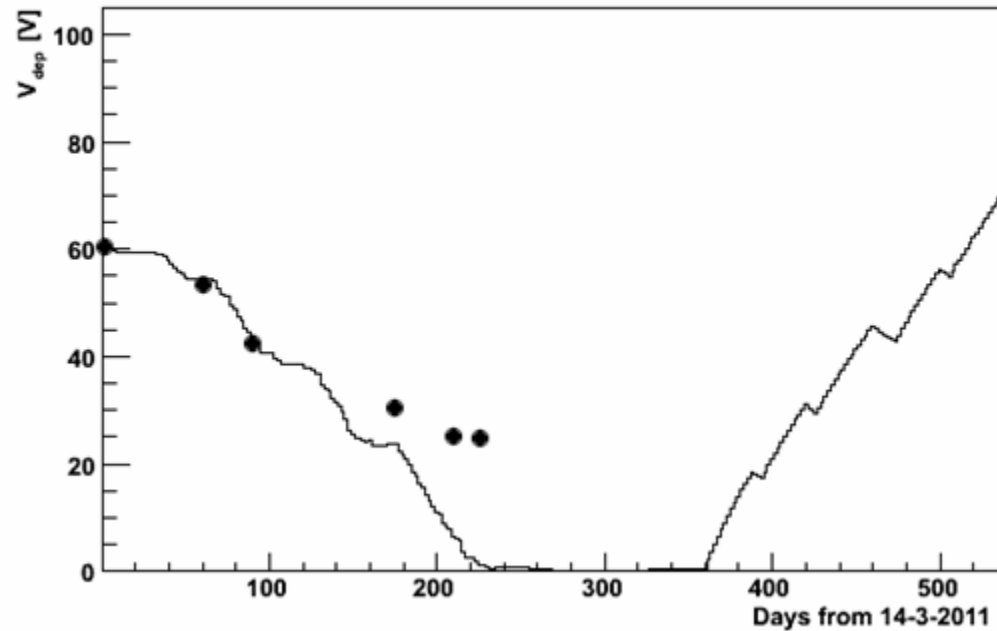


Hamburg's model

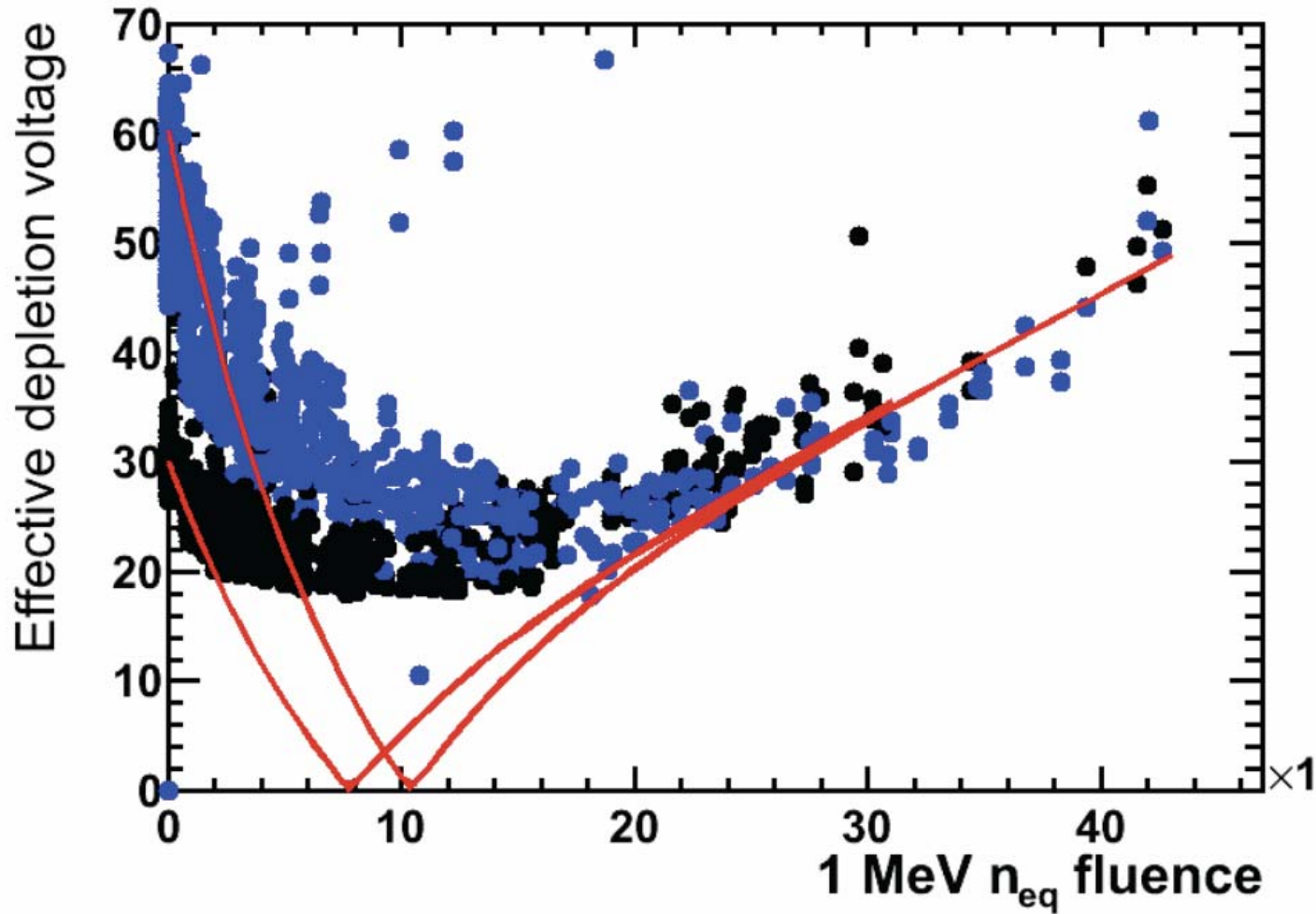


La transition change de coté

CMS-Layer 0 “en cours d’inversion”



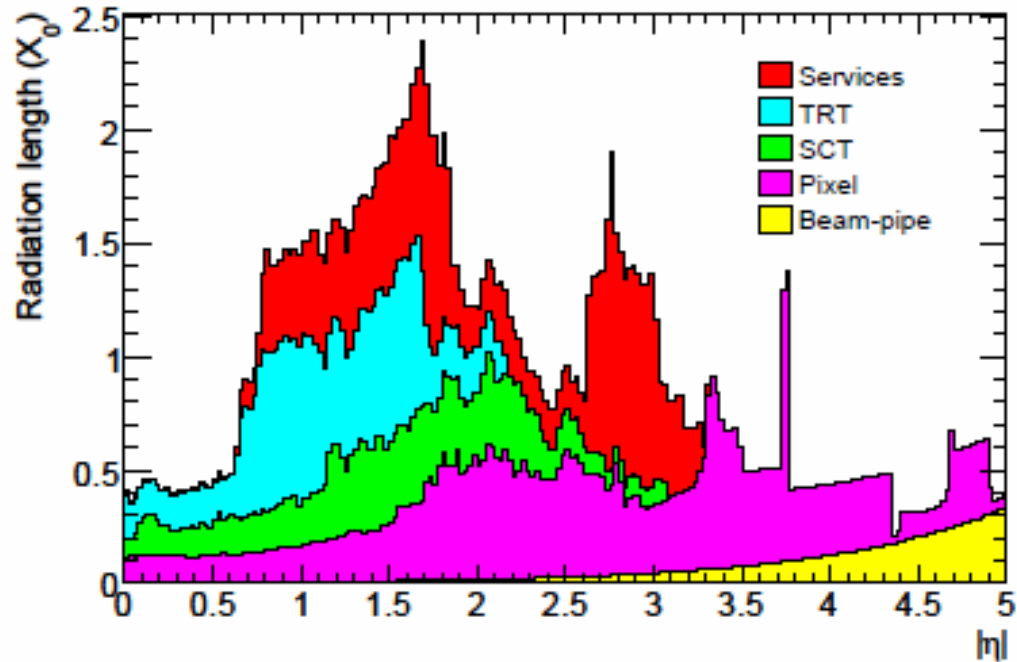
LHCb-VELO ..déjà inversé localement



Bilan “tracking”

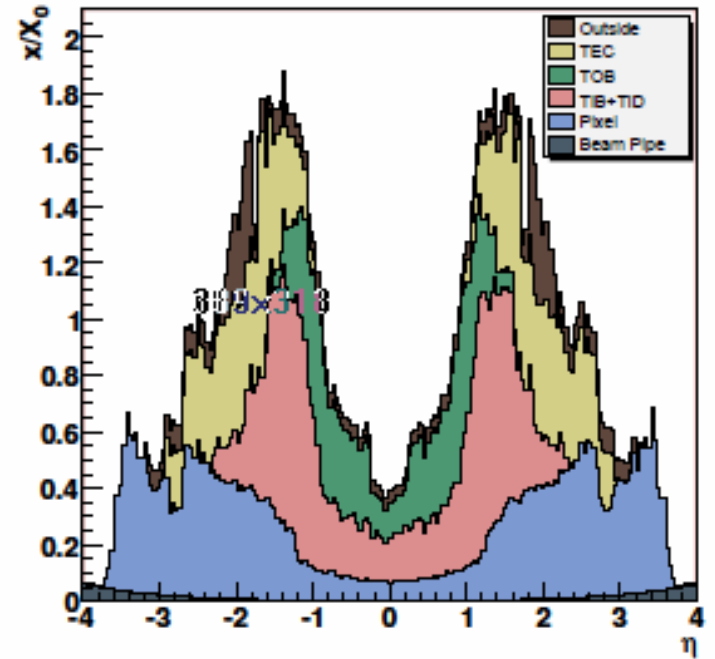
- Detecteurs de tracking/vertexing marchent remarquablement (cf performances plus tard)
- L’effet des radiations se manifeste comme attendu
- A moyen terme: augmentation des V_{dep} et des courants de fuite. Courant de fuite:
 - croit rapidement avec la temp de fonctionnement
 - génère du bruit prop $\sqrt{2el}$
 - génère de la chaleur (prop a $I \times V_{op}$)->risk of “runaway”
- Nécessité de maintenir les detecteurs froids pendant les arrêts/upgrades apres une dose élevée... (LS1?)

Ombre au tableau: matiere...



ATLAS/JINST

Tracker Material Budget



CMS/JINST

2-2 Calorimètre à cristaux de PbWO₄ dans CMS

- Lead Tungstate (PbWO₄) homogenous crystal calorimeter

- Barrel (EB):

- 36 Supermodules (SM), each 1700 crystals
- $|\eta| < 1.48$
- APD photodetectors

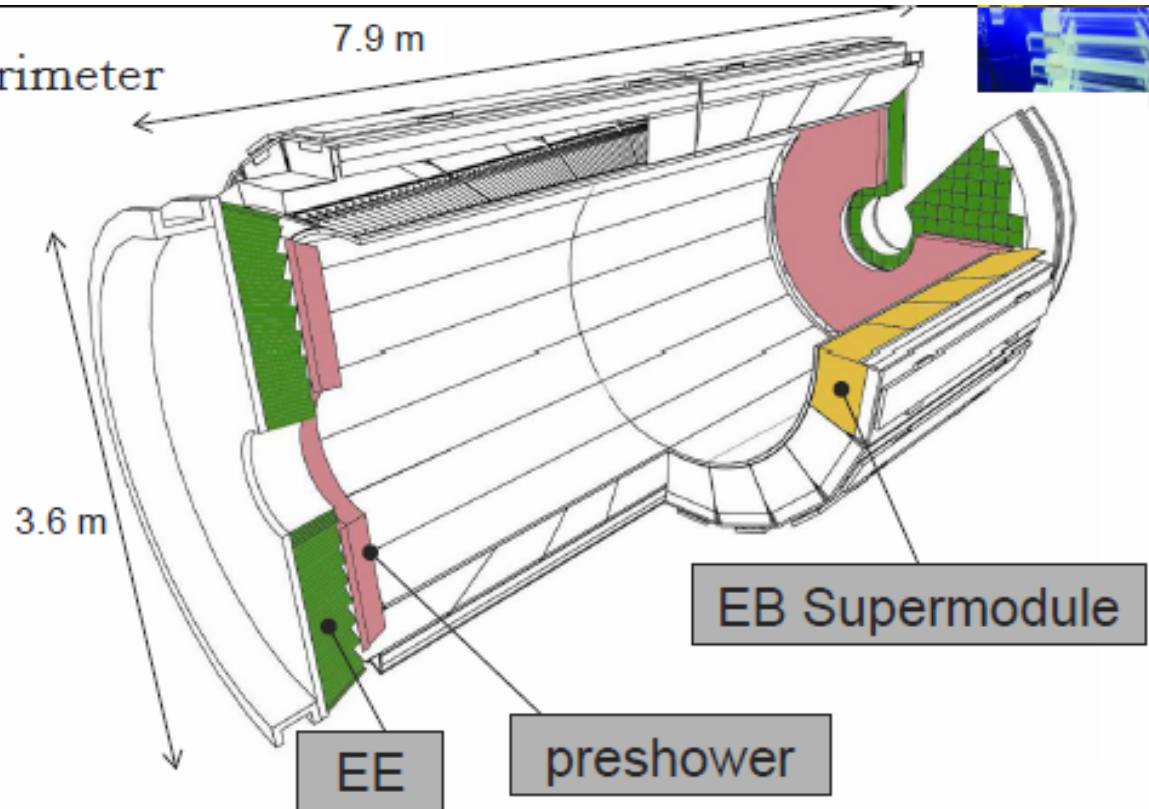
- Endcaps (EE):

- 2 Endcap sides, each 7324 crystals
- $1.48 < |\eta| < 3.0$
- VPT photodetectors

- Preshower (ES):

- sampling calorimeter (lead, silicon strips)
- $1.65 < |\eta| < 2.6$

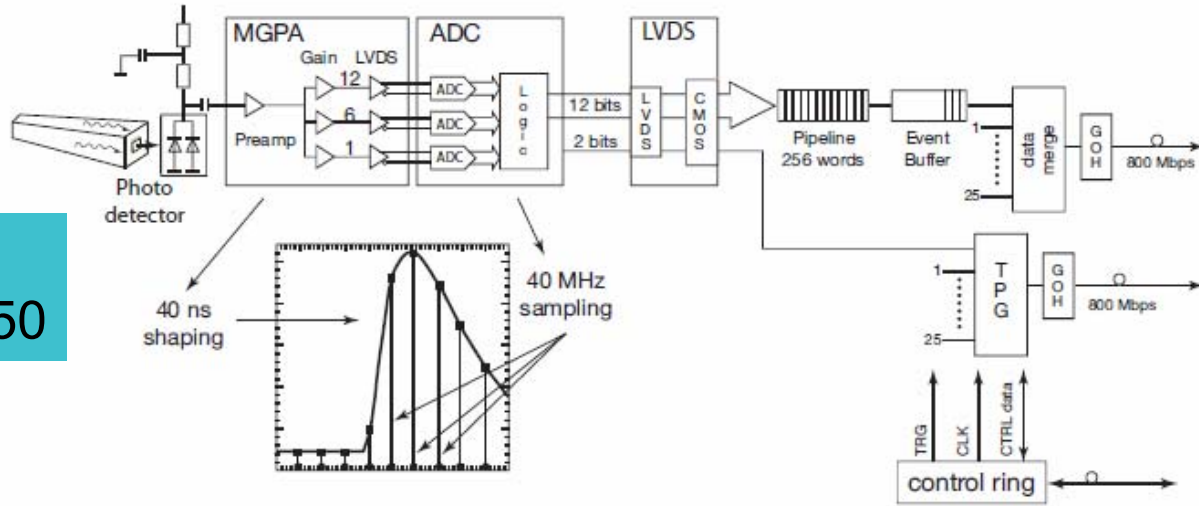
- Fraction of working channels stable in the last three years:
EB 99.2%, EE 98.5%, ES 96.9%



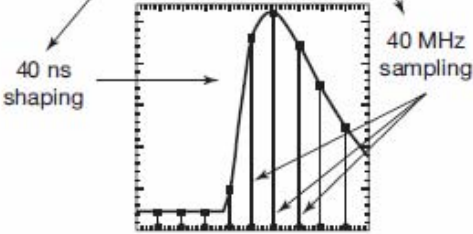
Properties of scintillating crystals applied in particle physics experiments.

	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BaF ₂	CeF ₃	BGO	PbWO ₄
Density [g cm ⁻³]	3.67	4.51	4.51	4.89	6.16	7.13	8.30
Radiation length [cm]	2.59	1.85	1.85	2.06	1.68	1.12	0.89
Molière radius [cm]	4.8	3.5	3.5	3.4	2.6	2.3	2.0
Interaction length [cm]	41.4	37.0	37.0	29.9	26.2	21.8	18.0
(dE/dx) _{mip} [MeV cm ⁻¹]	4.79	5.61	5.61	6.37	8.0	8.92	9.4
Refractive index [at l _{peak}]	1.85	1.79	1.95	1.50	1.62	2.15	2.2
Hygroscopicity	Yes	Slight	Slight	No	No	No	No
Emission spectrum, l _{peak}							
Slow component [nm]	410	560	420	300	340	480	430
Fast component [nm]			310	220	300		430
Light yield relative to NaI							
Slow component	100	45	5.6	21	6.6	9	0.3
Fast component			2.3	2.7	2.0		0.4
Decay time [ns]							
Slow component	230	1300	35	630	30	300	50
Fast component			6	0.9	9		10

Electronique, résolution idéale



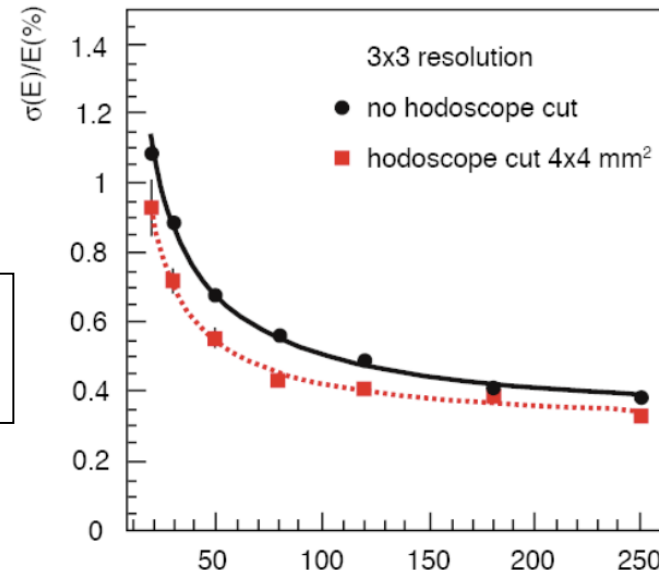
APD:
Gain~50



Test beam resolution(3x3),local:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{12\%}{E(\text{GeV})} \oplus 0.3\%$$

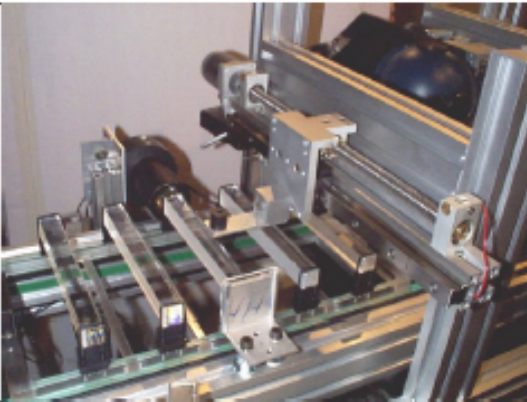
Terme constant devient dominant a haute energie
→ calibration de la réponse de chaque cristal



Calibration initiale (rms at prod ~6%)

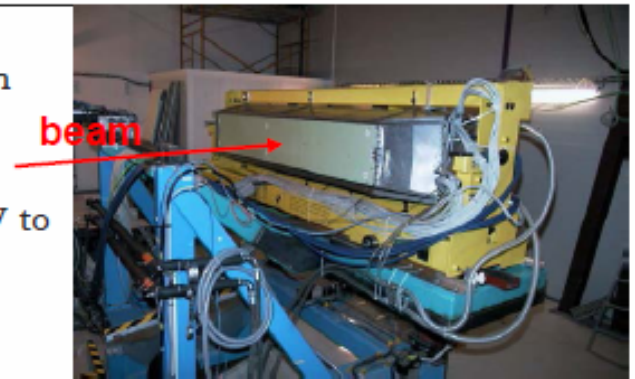
A very intense 10 years long pre-calibration campaign. Several orders of magnitude in energy: from 1 MeV of Co⁶⁰ source to 120 GeV electron beam.

Laboratory measurements during crystal qualification phase.
(2000-2006)

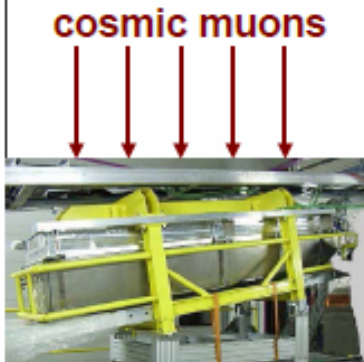


Test Beam:
Cern electron beams.

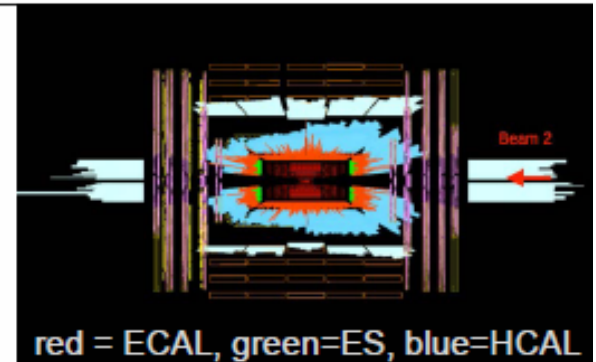
From 15 GeV to 250 GeV.
(2004-2007)



Channel intercalibration with cosmic muons (only Barrel SMs)
(2006-2007)



Beam Splash:
In September 2008 and November 2009, beam was circulated in LHC, stopped in collimators 150m away from CMS

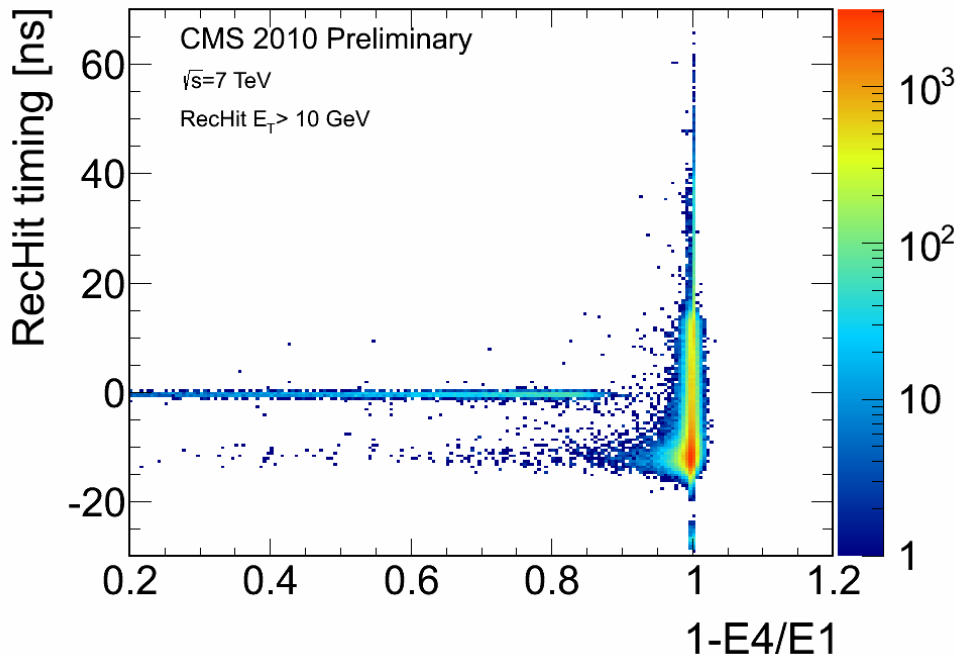


red = ECAL, green=ES, blue=HCAL

Et finalement "in situ" avec données de collision+laser

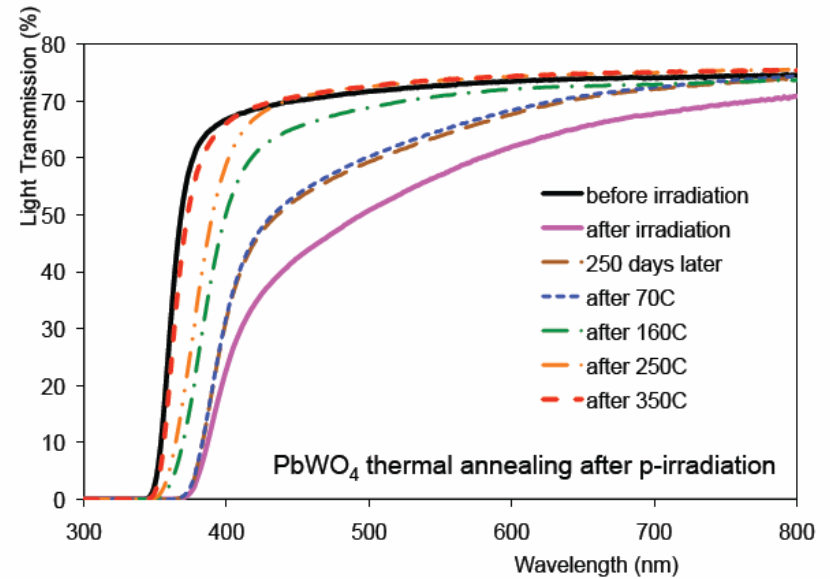
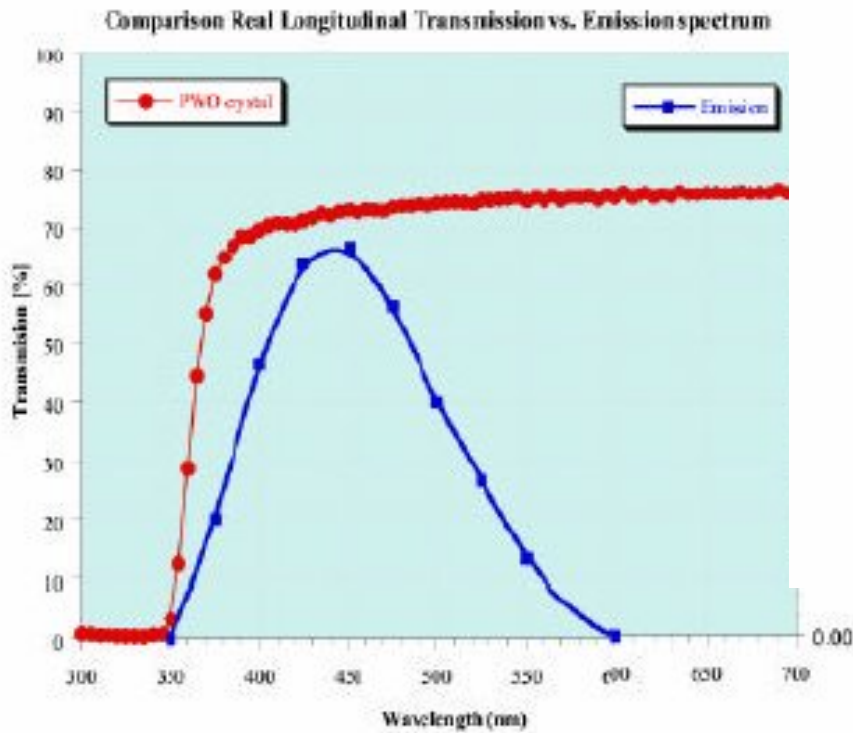
Soucis : reculs nucléaires dans les APD

- Origine: grand signal dans APD du a un proton de recul causé par une interaction de neutron (présent dans les gerbes hadroniques) avec noyau hydrogene (couche epoxy de protection??)
- Un seul cristal touché, timing (un peu) off
- Taux (ET>3 GeV/c) à 7 TeV : $3 \cdot 10^{-3}$ /min bias [~ 1 MHz à $5 \cdot 10^{33}$]



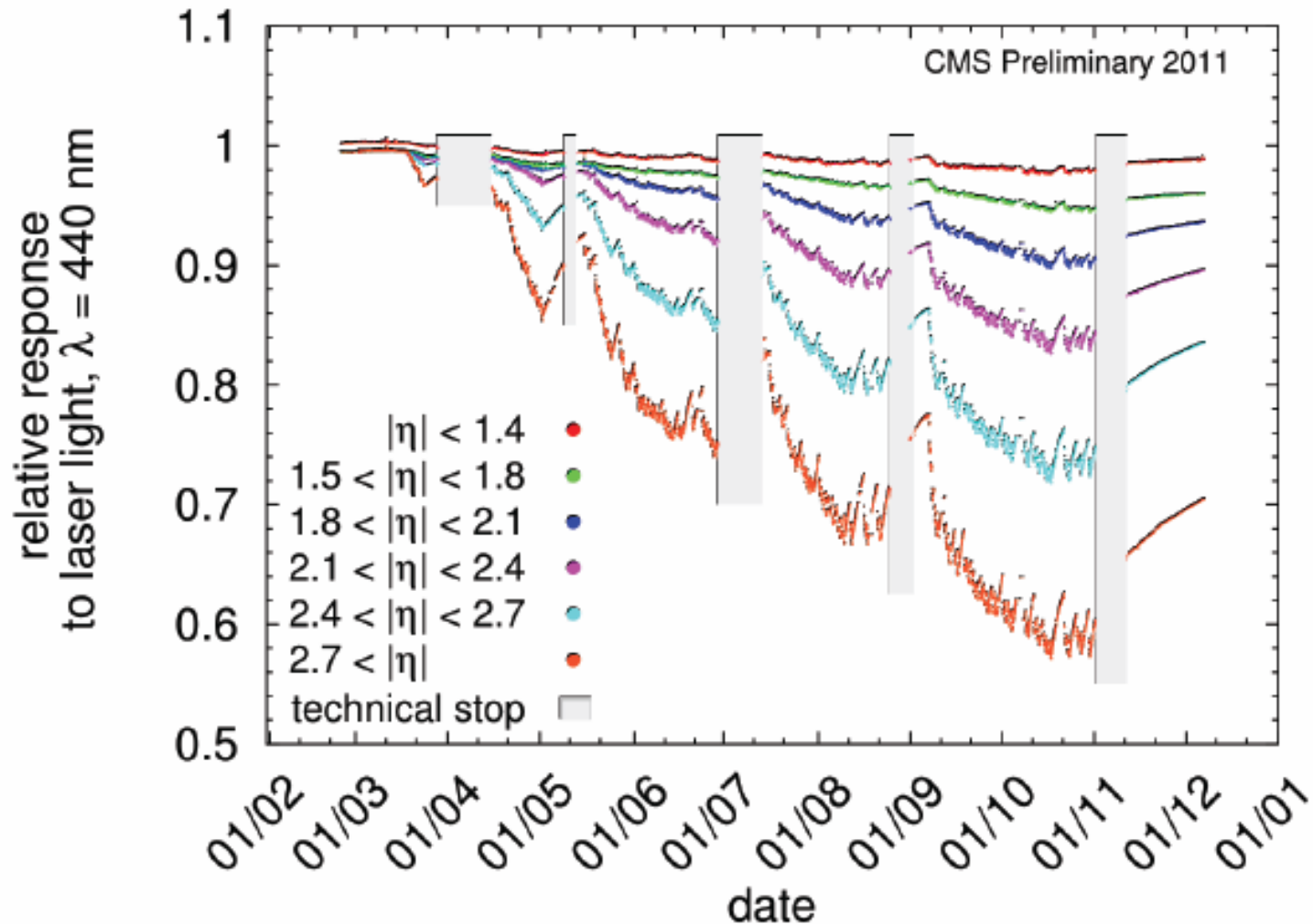
Éliminé au niveau trigger
et analyse par jeu de coupures

Effet des radiations : centres colorés



Irradiation a des doses “HL-LHC”

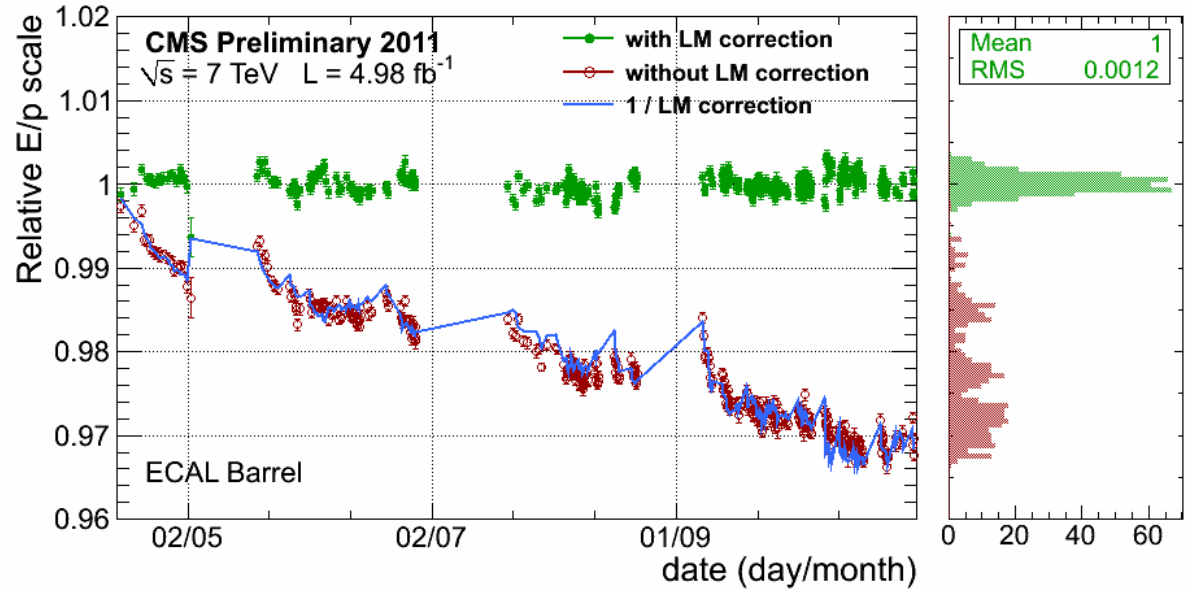
Suivi de la réponse par laser (440 et 796 nm)



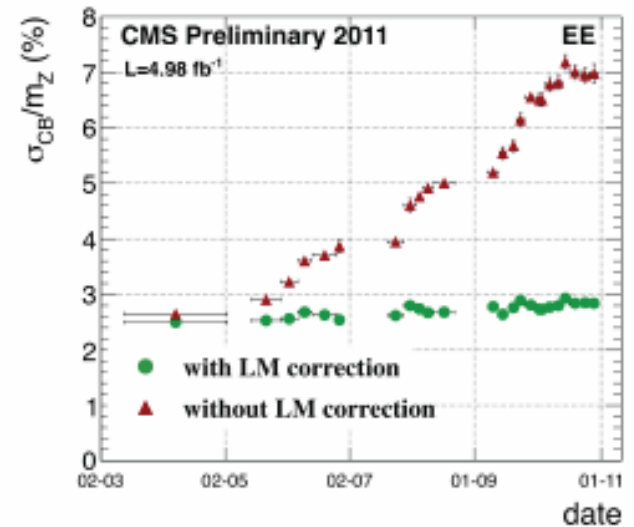
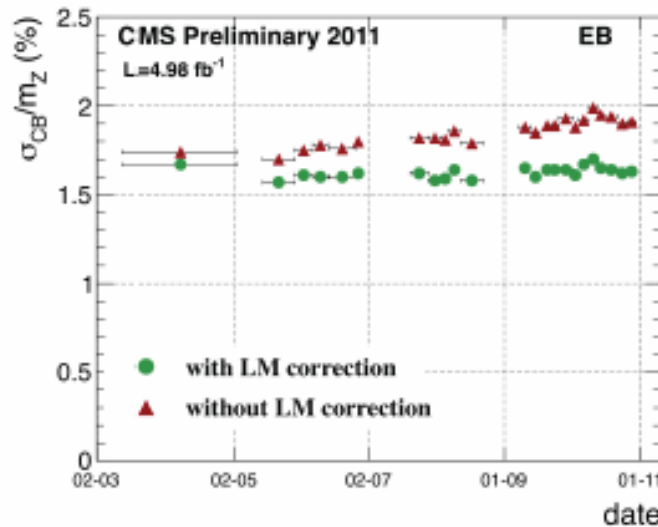
Pulses laser envoyés continument pendant l' "abort-gap"

Effet de la correction laser sur le pic du Z

Échelle de masse

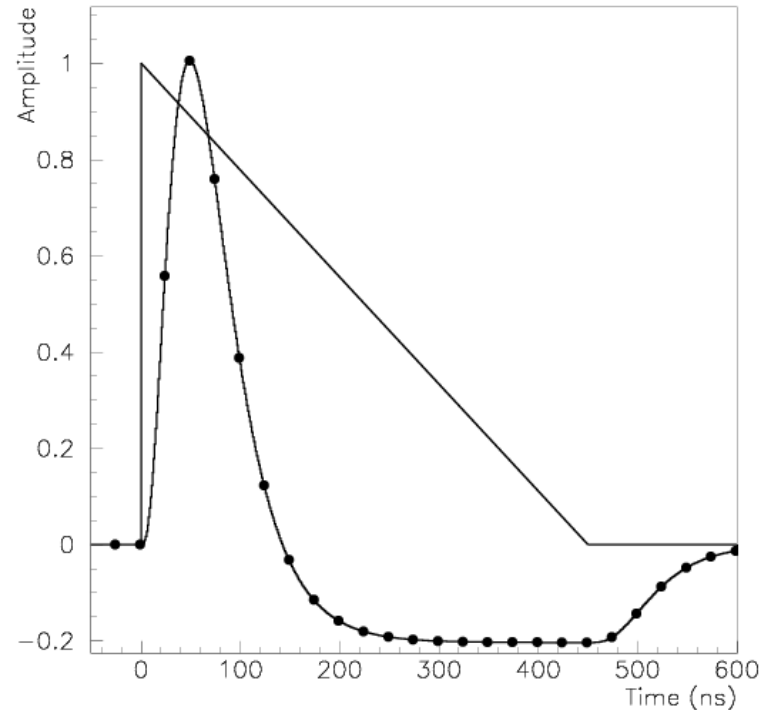
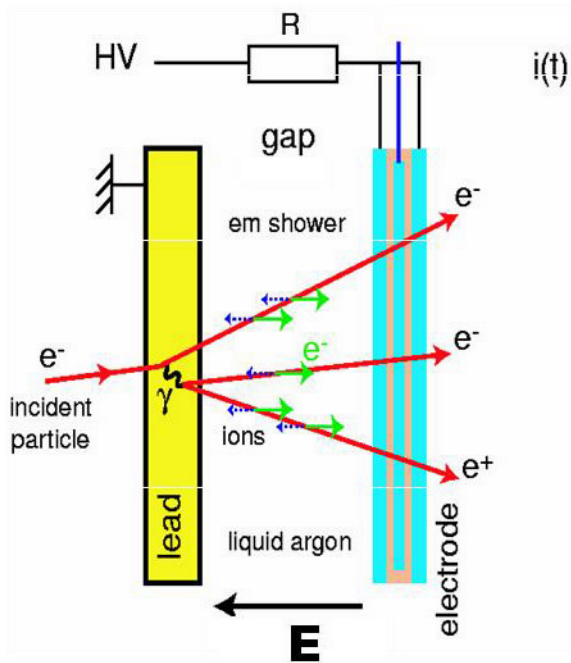


largeur



2-3 LAr EM-calorimeter dans ATLAS

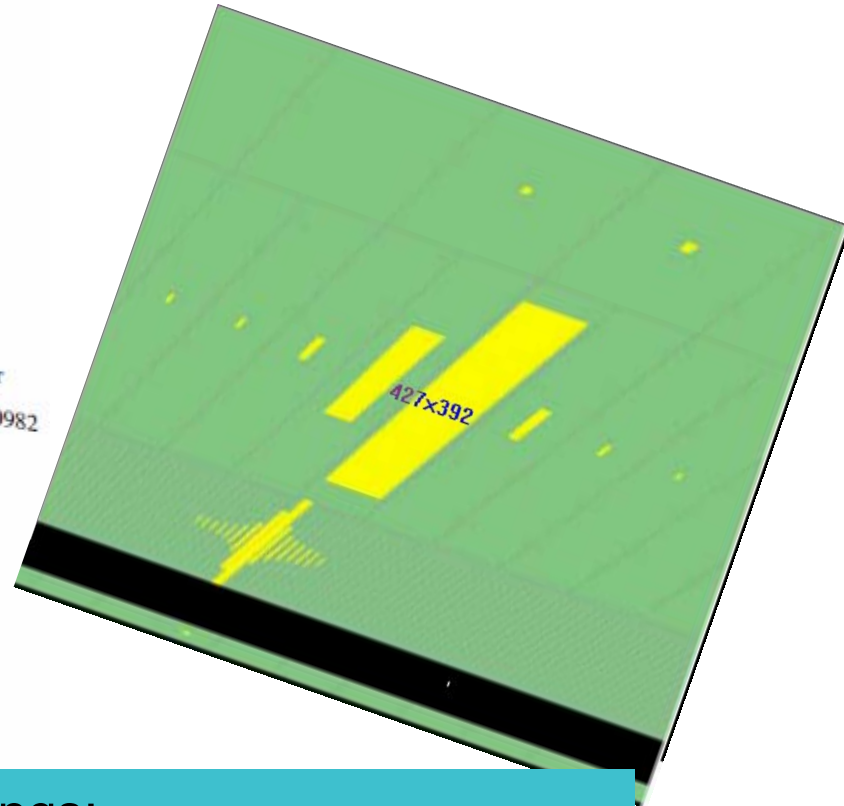
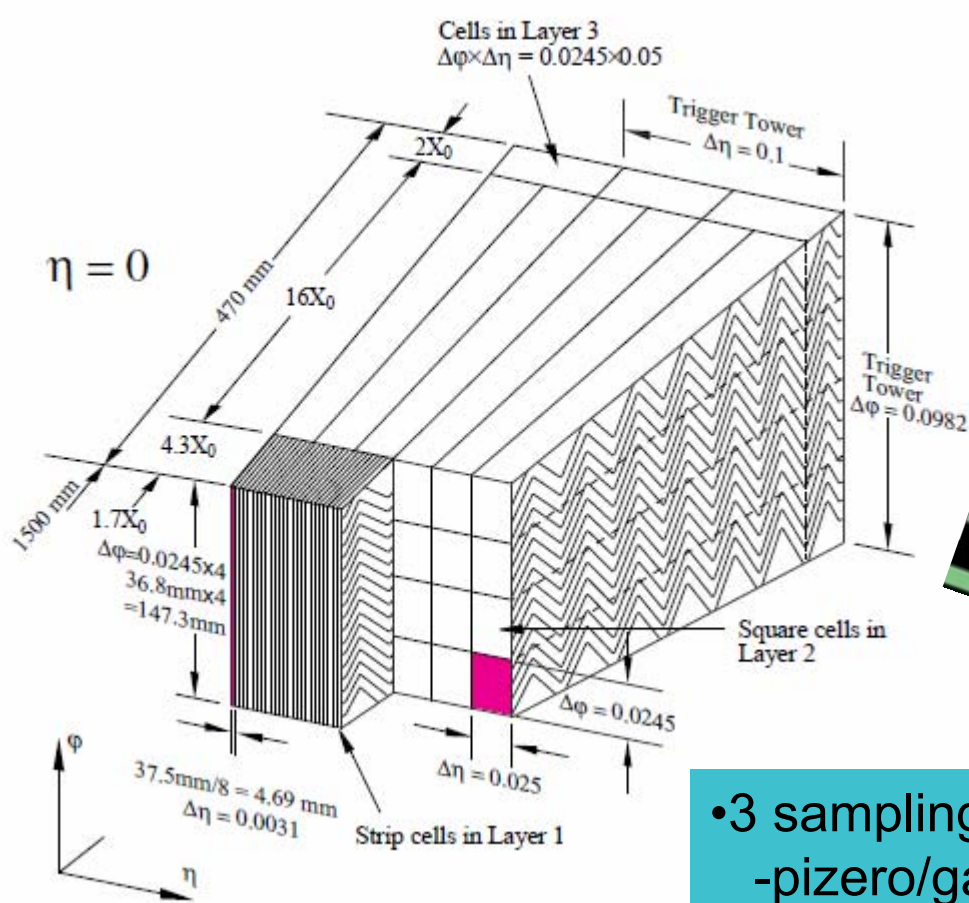
Signal rapide a partir d'un temps de dérive long ??...
→ profiter du front de montée rapide (ns) et utiliser la dérivée



Challenge: combiner cela avec une granularité élevée et une structure en “tours” pointant au vertex ??

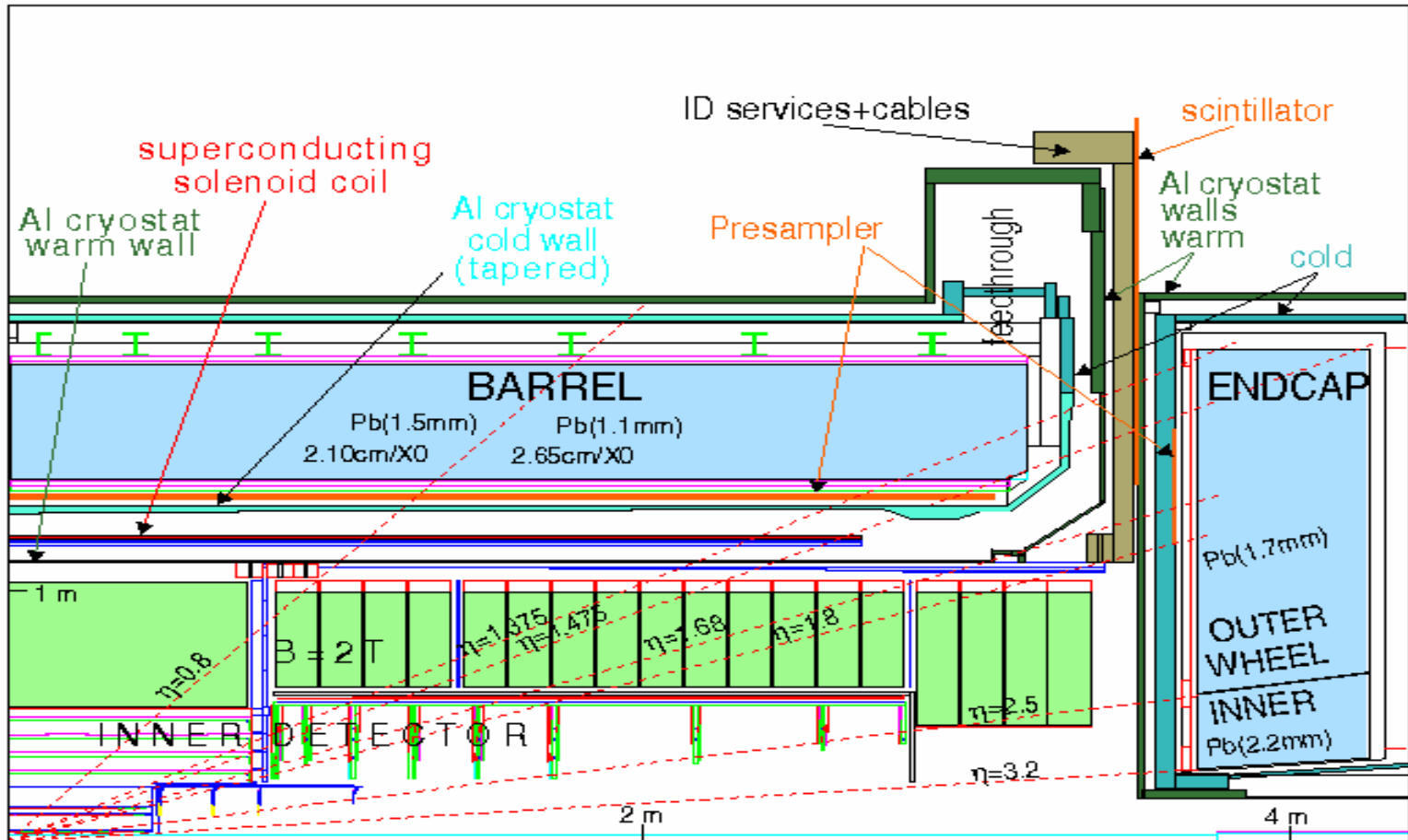
D.Fournier –GIF-Sept 2012

Structure “accordéon”

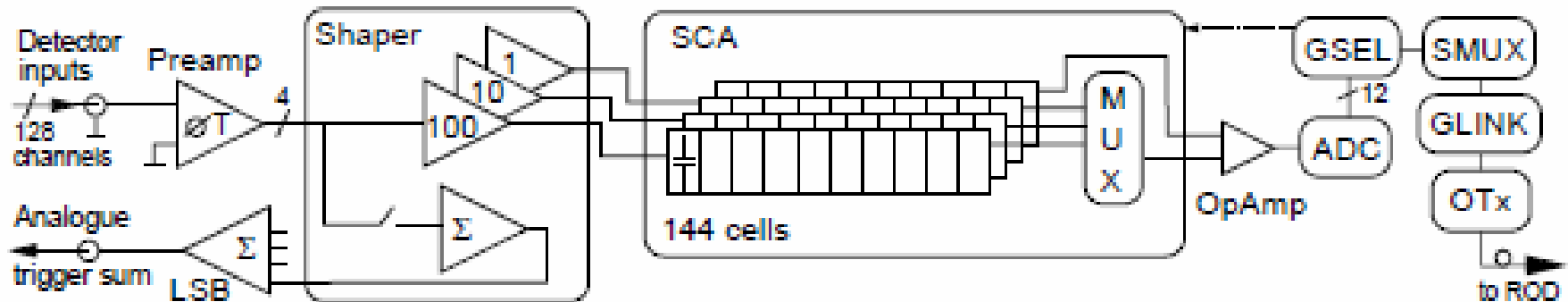


- 3 samplings:
 - pizero/gamma separation /strips
 - mesure de direction des photons
- moins dense que cristaux

Layout



LAr-electronique



PS+3 samplings en profondeur

Granularité: $.025 \times .1$

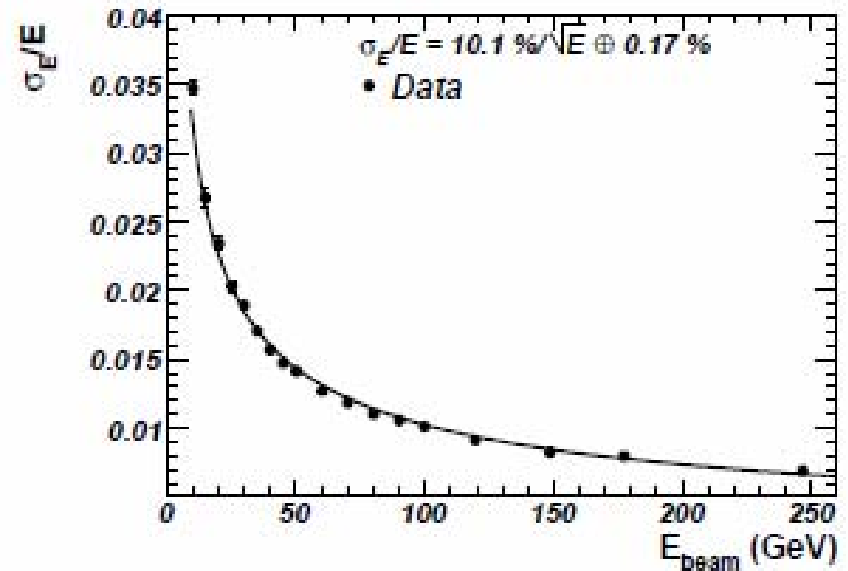
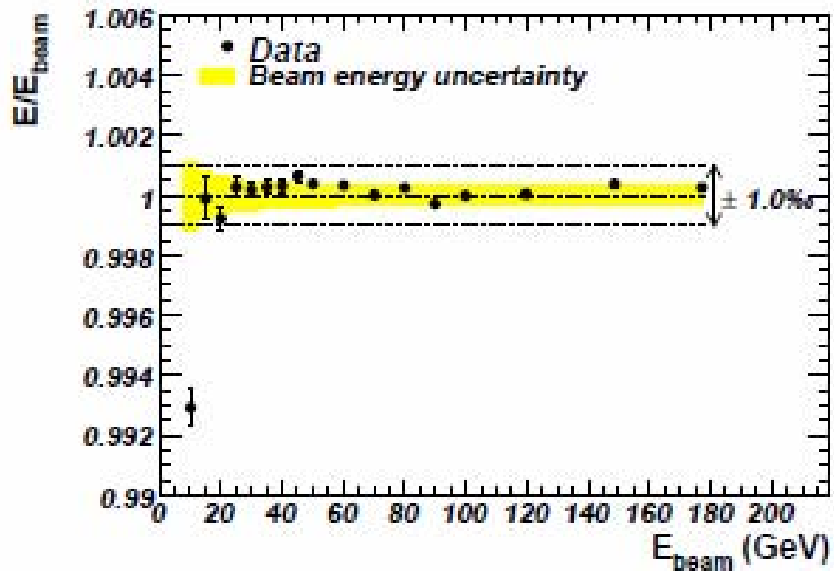
$.008 \times .1$

$.025 \times .025$ main sampling

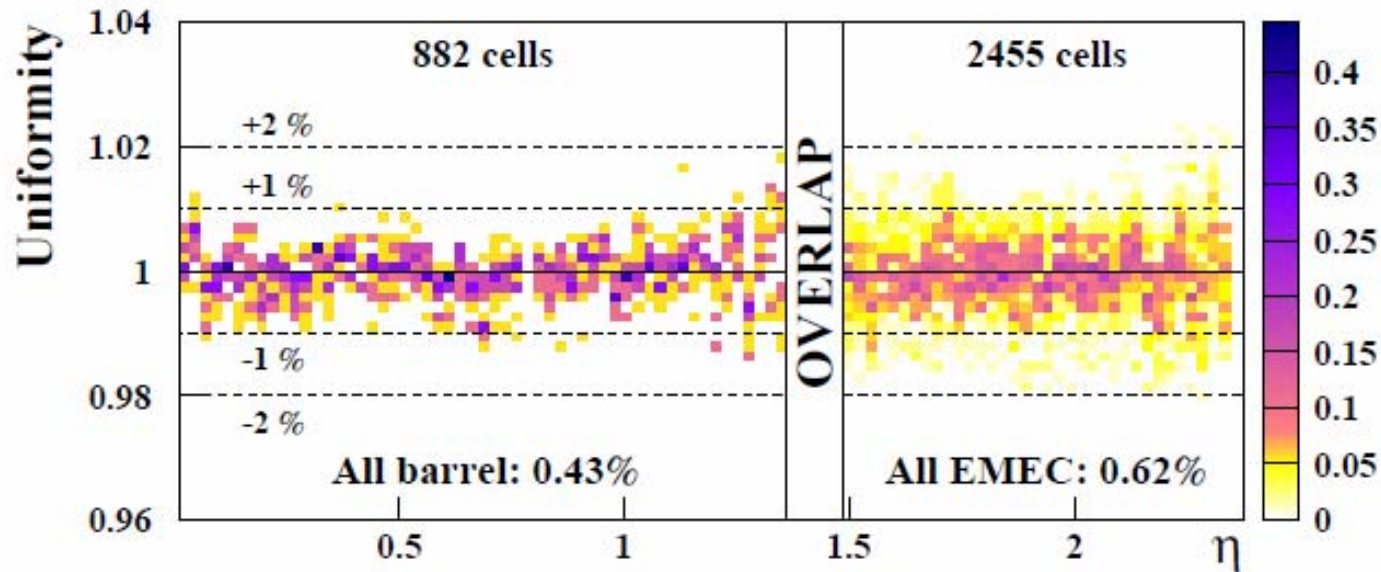
$.05 \times .025$

~180 000 canaux, sur 16 bits....(12 bts x 3 gains)

Test beam : résolution, linéarité



Test beam : uniformité



Detecteur uniforme “par construction”

(vérifié aussi in-situ par mesure de drift time(gap dispersion))

→le système de calibration ne sert qu’à calibrer l’électronique

En pratique: effets de la matière,...

→ $E=f(\text{param}_{ij}; S_{ijk})$ param_{ij} déterminés par MC simulation
performance vérifiée par pic du Z (plus E/p, Jacobien,..)

Terme constant/2011 ~1% (jusqu’à 2% dans $1.5 < |\eta| < 1.8$)

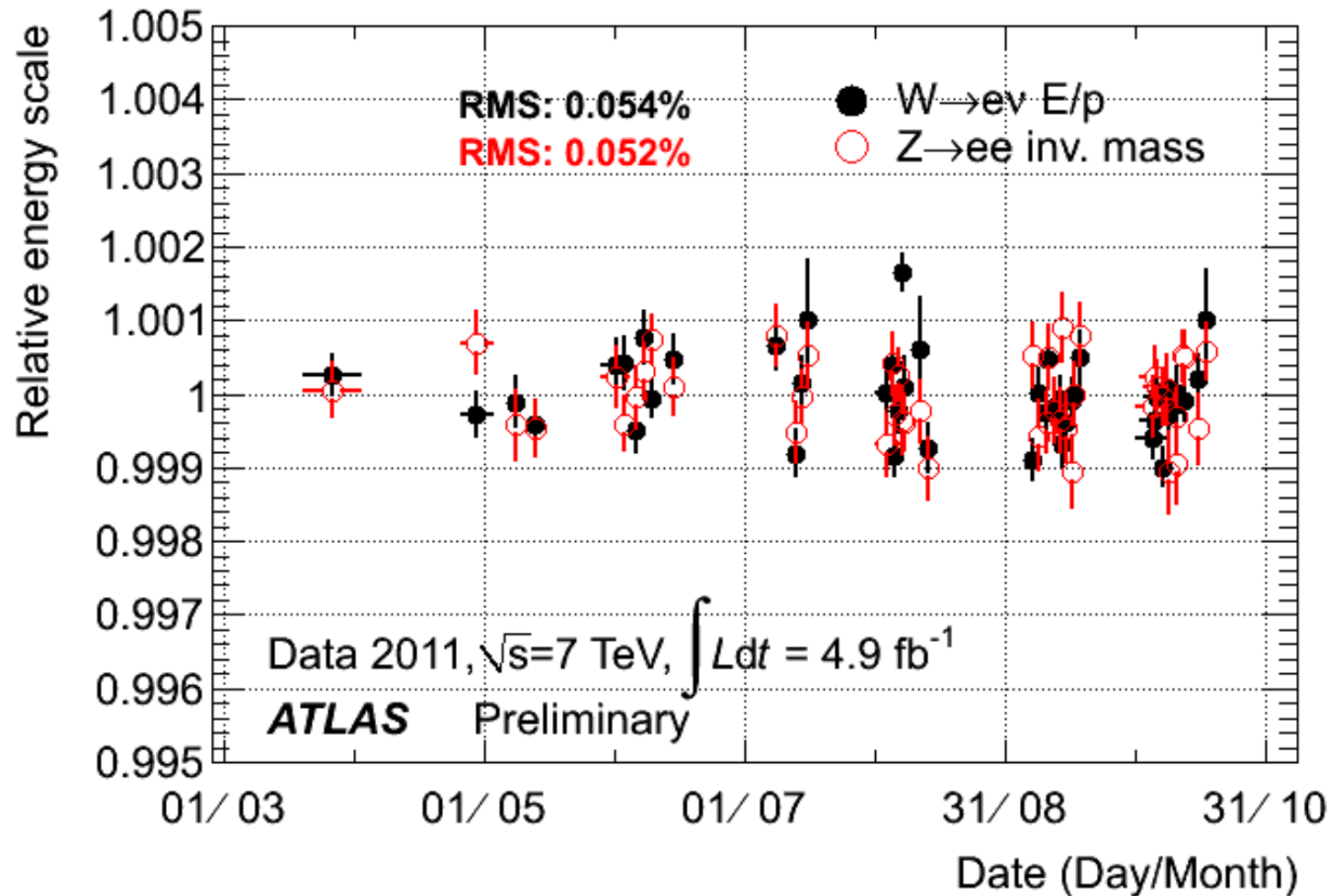
LAr calo: fonctionnement

- Fiabilité OTX : réglé(6% canaux perdus fin 2010,et récupérés apres acces)
- Faiblesses “locales” de tenue en tension (prévu.... 2 cotés du gap independants)
 - ~10% des voies HT opérées a une tension reduite (compensé par fudge factor-signal croit comme $v^{0.3}$). Petit nombre en cc debitent un courant (<2 mA) stable sur des mois.
- Noise bursts: probablement au moins 2 origines
 - “spike of electromagnetic noise” emis par un autre detecteur
 - decharge HV quelque part dans LAr detector
- HV trips: chaque fois que L augmente, observe qqes trips aléatoires qui ensuient disparaissent peu a peu (like “scrubbing” for the beam)

Tout ensemble correspond a une rejection de ~2% de Lint

- Cells “temporarily noisy” in PS,“HEC spikes” in HEC : pas tres bien compris. isolants qui se chargent? Traitement adapté “au cas par cas”

Effet des radiations: rien de visible(pour l'instant)



2-4 Trigger/DAQ

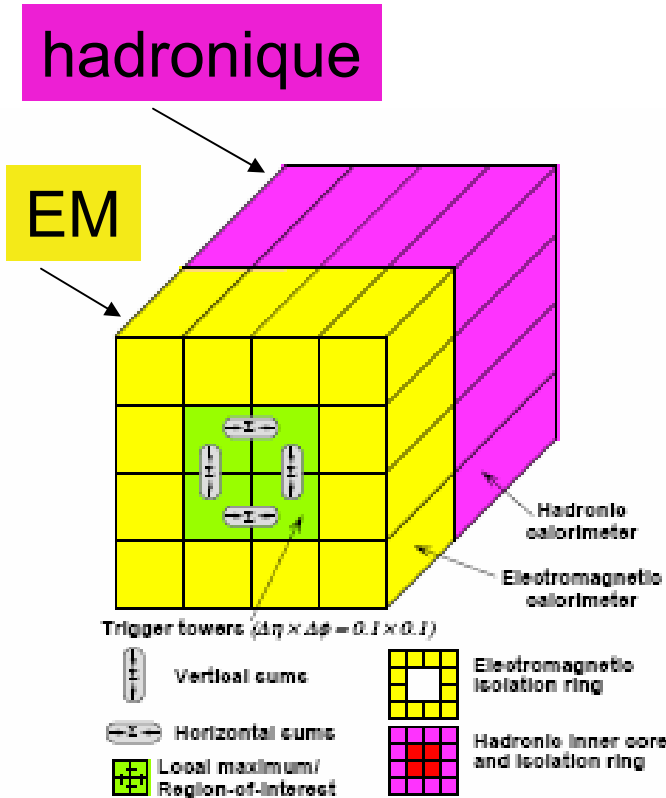
- Données échantillonnées /25ns et stockées dans un “pipe-line” de longueur>latence LVL1($\sim 4\mu\text{s}$)
 - LVL1 activé en présence de 1 ou plusieurs “objets” d’intérêt
 - EM cluster (->electron ou photon) ($ET > ET_{th} \sim 25 \text{ GeV}$)
 - candidat muon/spectro ($p_T > p_{T_{th}} \sim 25 \text{ GeV}$)
 - Jet (EM+Hcal) $ET > ET_{th}$
 - $ET_{miss} > ET_{miss_{th}}$
- LVL1 rates : Atlas<75kHz, CMS<100kHz, LHCb<1MHz**
- LVL2 : electron, photon, taus, dans une “ RoI”
 - EF: reconstruction complete, equivalente a off-line
(CMS L1+EF = HLT)

Menus finals $> \sim 400$ combinaisons

efficacité mesurée par “prescaling” et/ou “tag and probe”

2-4 Trigger-DAQ

CMS "menu" pour 3×10^{33}



Cellules et logique de déclenchement calorimétrique dans ATLAS

Cluster EM :

- $E(\sum 2 \text{ cell vertes}) > E_{th}$,
- « rien » dans jaune
- « rien » dans rose

Trigger objects	Offline Selection (p_T thresholds in GeV)	Trigger Selection		L1 Rate (kHz) 3×10^{33}	HLT Rate (Hz) 3×10^{33}
		L1 (GeV)	HLT (GeV)		
Single leptons	1 mu (e) > 35 (70)	14 (20)	24 (32)	6 (6)	34 (10)
Two leptons	2 mu (e) > 20, 10	2x3.5 (12,5)	17, 8	5 (7)	8 (5)
	mu & e > 20, 10	12,5 (0,12)	17,8 (8,17)	2 (2)	4 (9)
	$2\tau \rightarrow h > 50$	2x44	2x45	3	2
Two photons	2 photons > 40, 30	12,5	26,18	7	8
E_T^{miss}	$E_T^{miss} > 150$	30	120	4	3
Multi-jets	4 jets, > 80	4x28	4x70	2	9
1 jet + E_T^{miss}	Both > 100	$E_T^{miss} > 30$	80, 80	4	9
3 jets + e or mu	Jets > 40, e/mu > 30/20	e/mu > 20/14	J=30, 25/17	7/5	3/1
Peak [rate]				80	400

Demain...

- Performances
- LHCb (bref)
- Ugrades(bref)