

Upgrades Phase II de CMS : Introduction & calorimétrie HGCAL

Christophe Ochando
(LLR/Ecole Polytechnique/CNRS)

pour la communauté HGCAL

22 Juin 2017
CS IN2P3



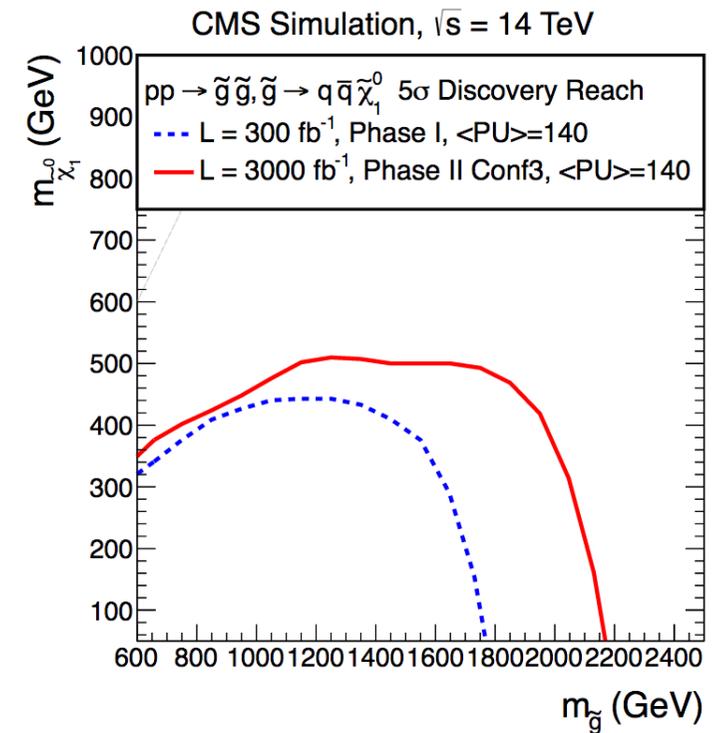
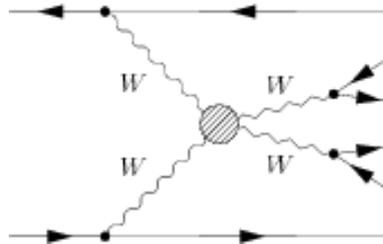
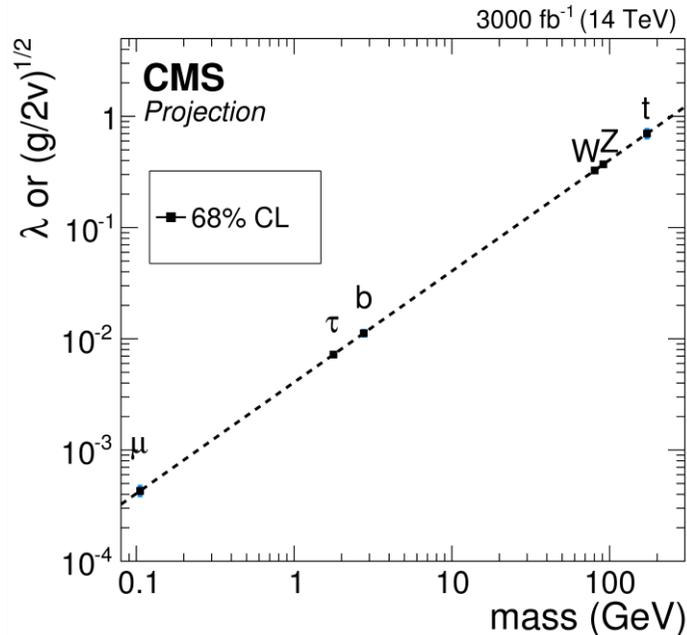
(quelques) Objectifs de Physique

➤ Dévoiler la nature exacte de EWSB(*)

- Mesures de précisions dans le Secteur du Higgs
- Observation de la production HH
- contraintes sur l'auto-couplage
- Désintégrations rares ($\mu\mu$, $Z\gamma$...) ou interdites ($\tau\mu$...) de H_{125}
- Unitarité via Diffusion de Bosons Vecteurs

➤ Recherche de nouvelle physique et/ou mesures sur les nouvelles particules (si trouvées...)

- Secteur scalaire étendu,
- SUSY, Matière Noire, ...

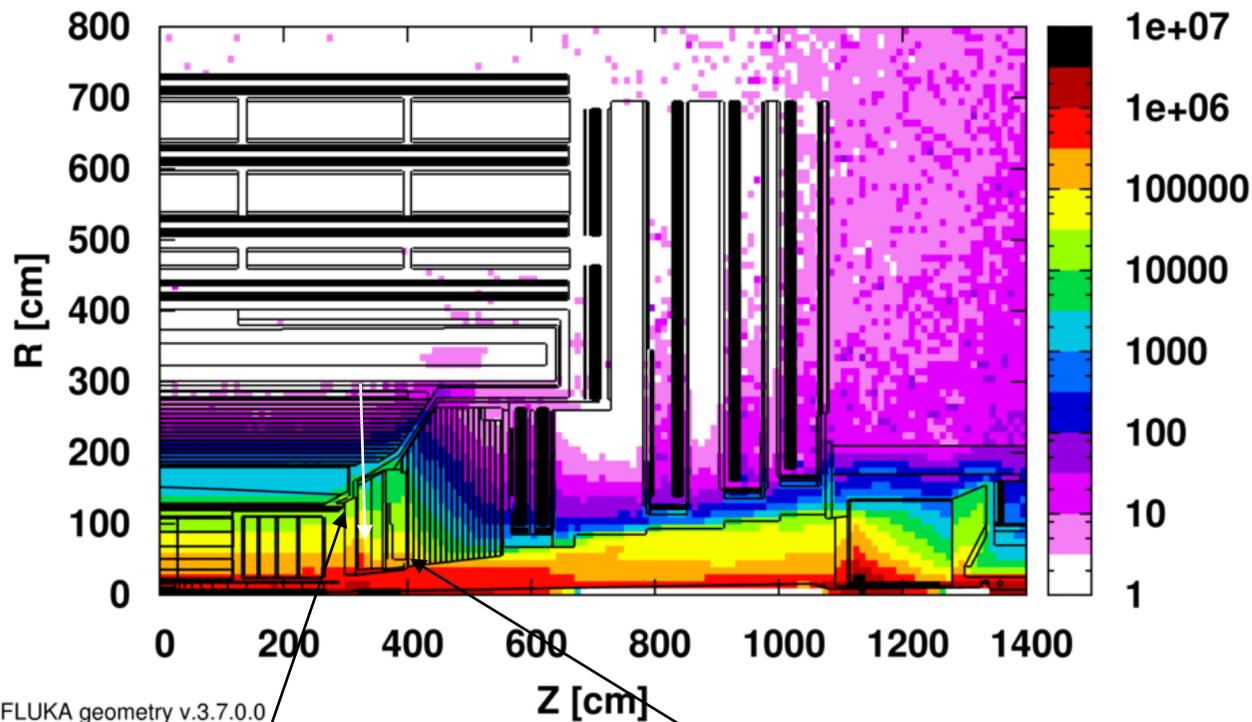


Forte demande en luminosité
 => HL-LHC (2026-2035): 3000 fb⁻¹ (**x10 par rapport à LHC**)

(*) ElectroWeak Symmetry Breaking

Challenges: Dégâts dus aux radiations

3000 fb-1 Absolute Dose map in [Gy] simulated with MARS and FLUKA

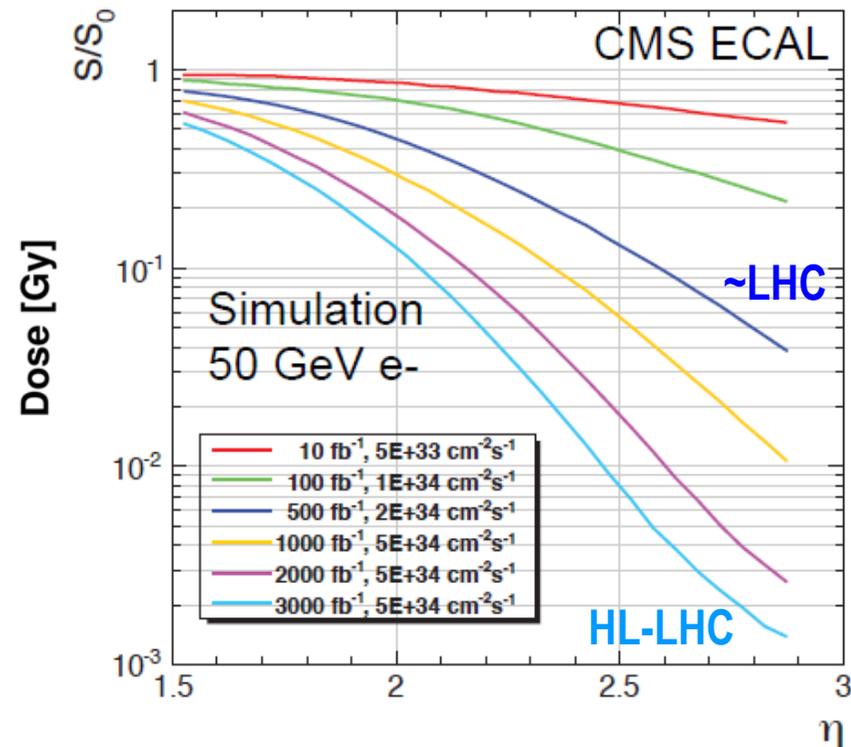


CMS FLUKA geometry v.3.7.0.0

Pre-Shower + ECAL Endcap
at $\eta \sim 3$: 1.5 MGy, 10^{16} n/cm²

HCAL Endcap
up to 30 kGy

ECAL crystal relative light output



HL-LHC: Réduction d'un facteur > 10 en collection de lumière des cristaux du ECAL dans les bouchons

Les études de vieillissement montrent que le Trajectographe et la Calorimétrie à l'avant doivent être remplacés

Challenges: Empilement ou Pile-Up (PU)

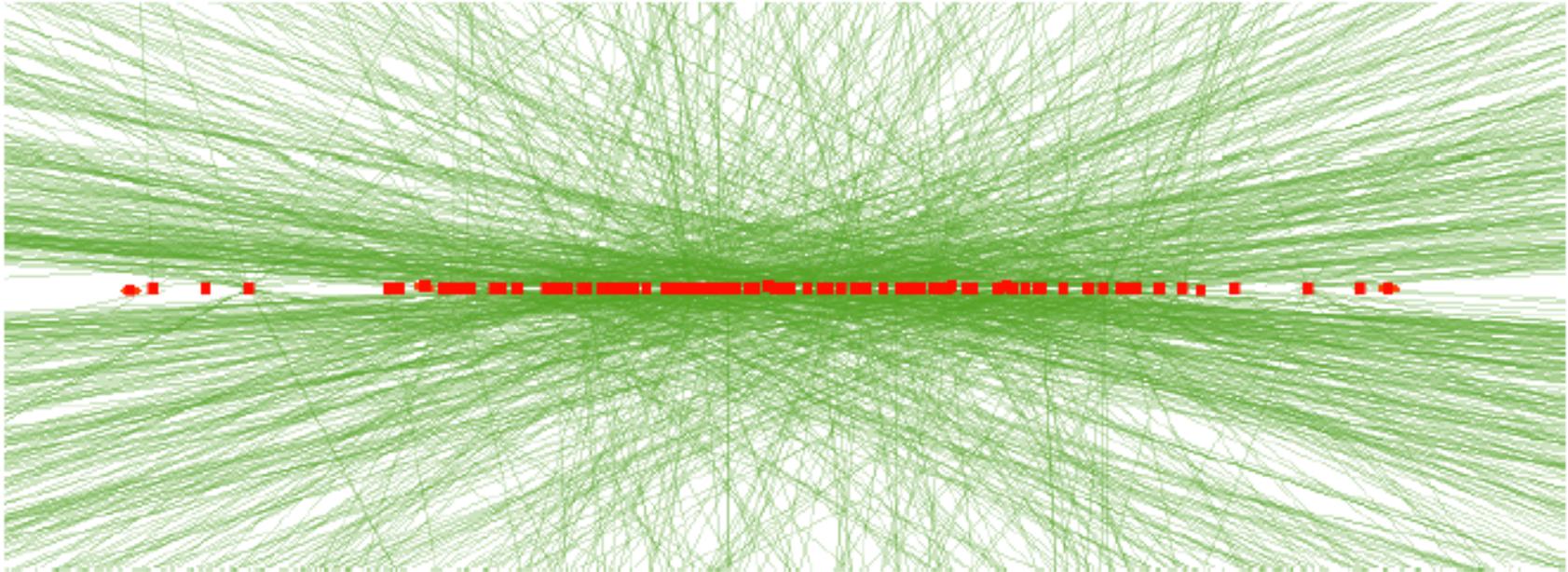


Figure 9.1: An event display showing reconstructed tracks and vertices of a simulated top-pair event with additional 140 interactions overlaid for the Phase-II detector.

- Paramètres nominaux du HL-LHC:
 - 140 à 200 interactions additionnelles par croisement de faisceaux (**x5 LHC**) (toutes les 25ns) + PU « hors-temps »
 - Pic de Luminosité Instantanée : $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (**x 2-3 LHC**)
- Challenges pour le Trigger (en particulier le Niveau 1), la reconstruction hors-ligne et le calcul (30xLHC)

Besoin de détecteurs à (très) haute granularité, à réponse rapide, résistants aux radiations !
=> maintenir/améliorer les performances de CMS mais dans un environnement plus rude

CMS Upgrades Phase II & France

Trigger/HLT/DAQ

- Track information at L1-Trigger 
- L1-Trigger: 12.5 μ s latency - output 750 kHz
- HLT output \approx 7.5 kHz

Barrel EM calorimeter

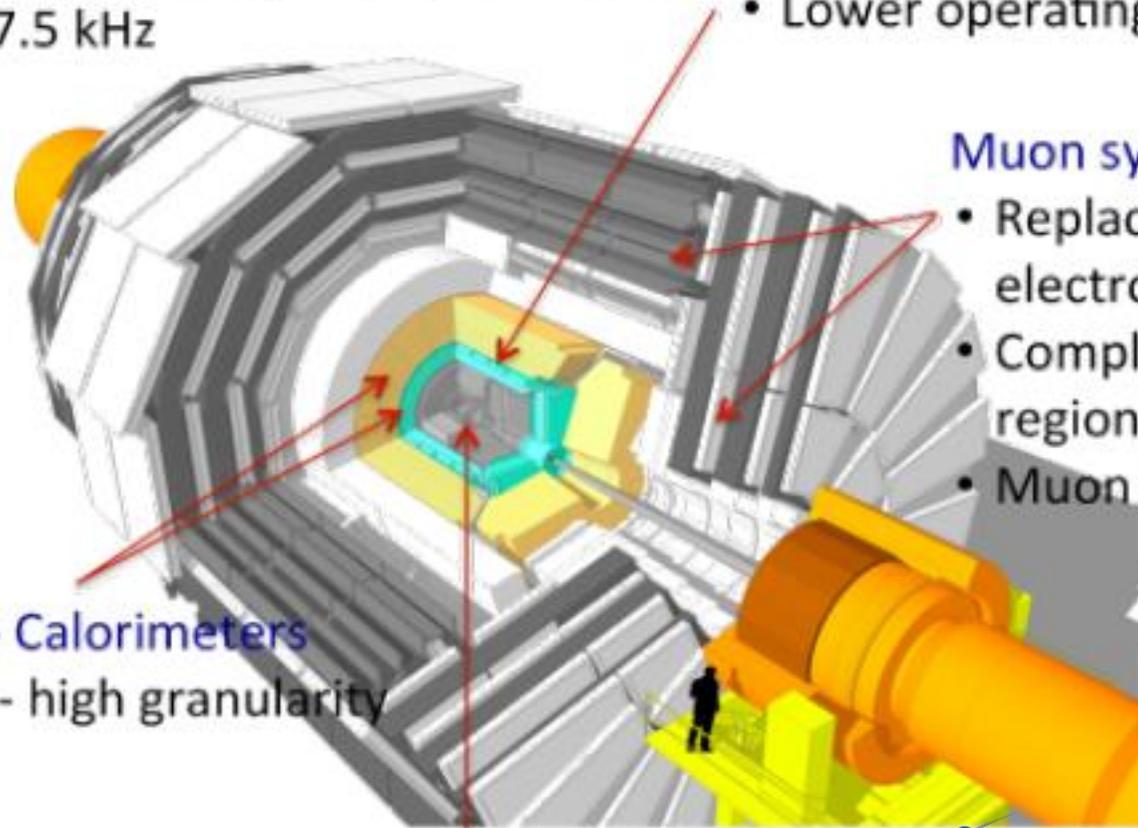


- Replace FE/BE electronics
- Lower operating temperature (8°)

Muon systems



- Replace DT & CSC FE/BE electronics
- Complete RPC coverage in region $1.5 < \eta < 2.4$
- Muon tagging $2.4 < \eta < 3$



LMR

Replace Endcap Calorimeters

- Rad. tolerant - high granularity
- 3D capability



Replace Tracker



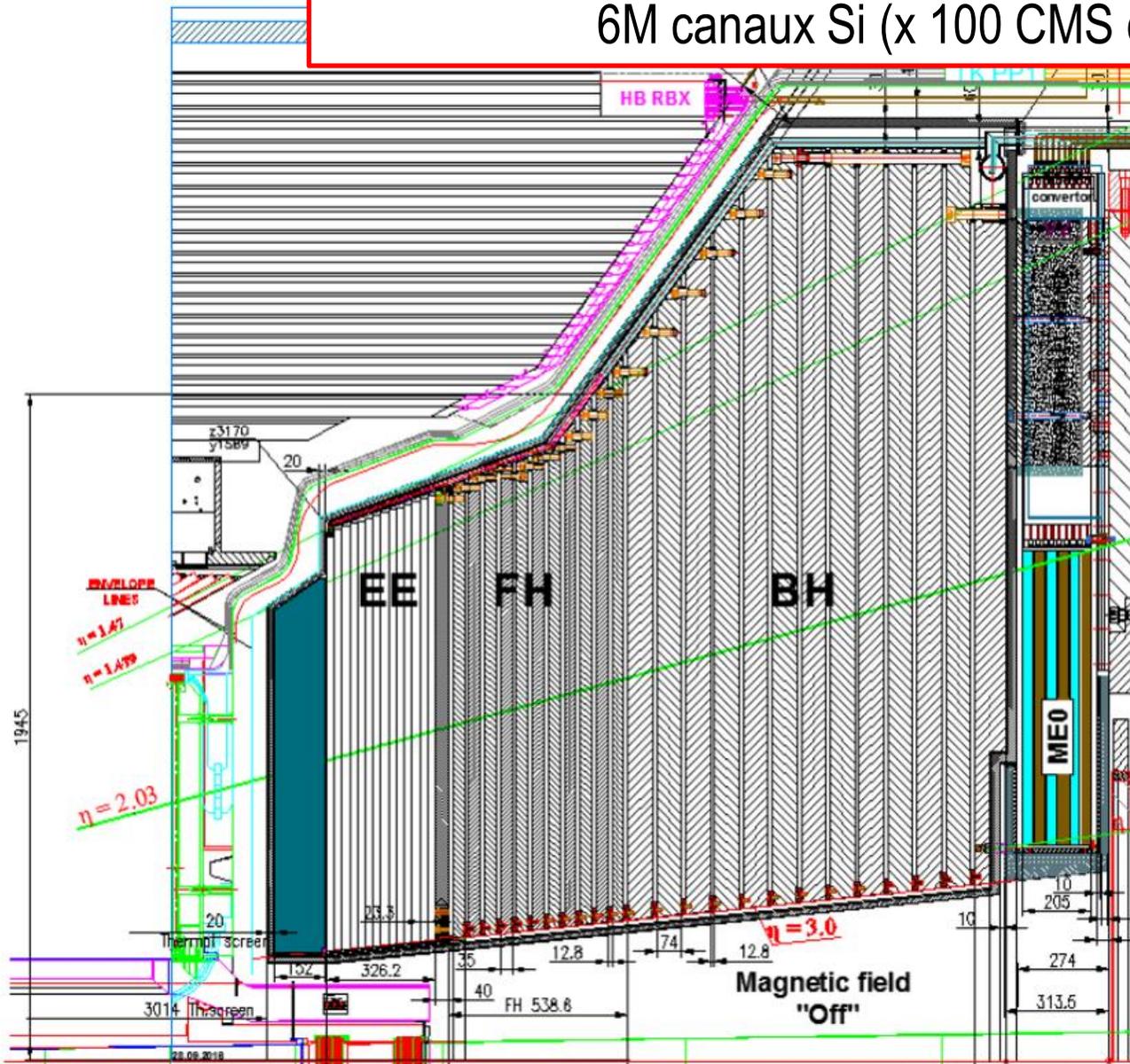
- Rad. tolerant - high granularity - significantly less material
- 40 MHz selective readout ($P_t \geq 2$ GeV) in Outer Tracker for L1-Trigger
- Extend coverage to $\eta = 3.8$

Calorimétrie à l'avant et HGCAL (High Granularity CALorimeter)



HGCAL : vue d'ensemble

HGCAL: Calorimètre à échantillonnage de **très haute granularité**
6M canaux Si (x 100 CMS calorimétrie)



Détecteur hybride de nouvelle génération.
Mesure:

- Energie (calorimétrie)
- Position 3D (« tracking »)
- Temps (résolution 50ps/cell)

Fonctionne à -30°C
via refroidissement diphasique CO_2
(pour atténuer les courants de fuites du Si)

EE: calorimètre électromagnétique. 28 couches Si – Pb (+Cu,Cu/W)

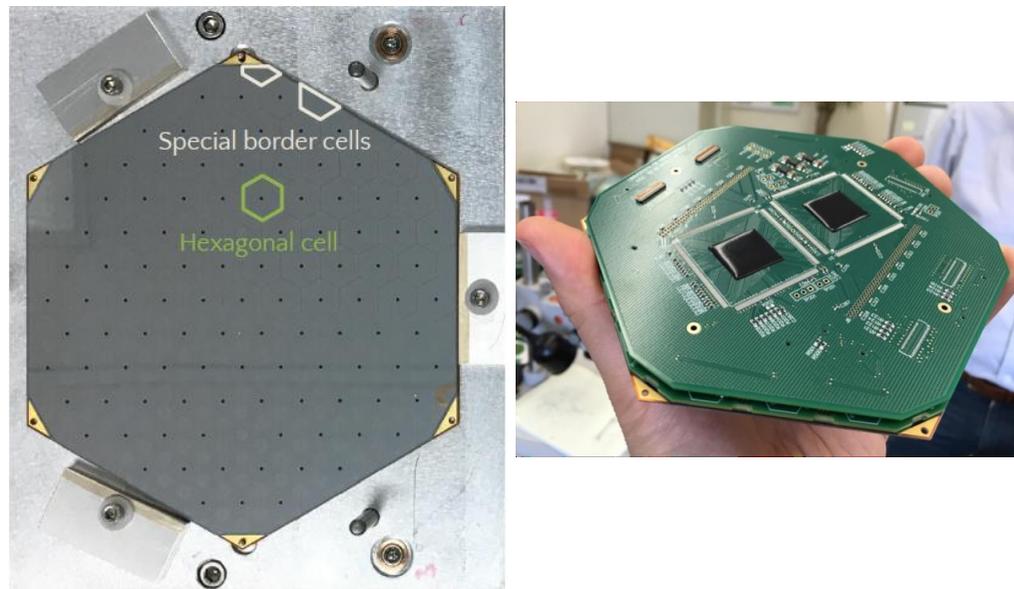
FH/BH: calorimètres hadroniques. 24 couches Si/Scintillateurs - Acier

Dans les bouchons: $1.5 < \eta < 3$

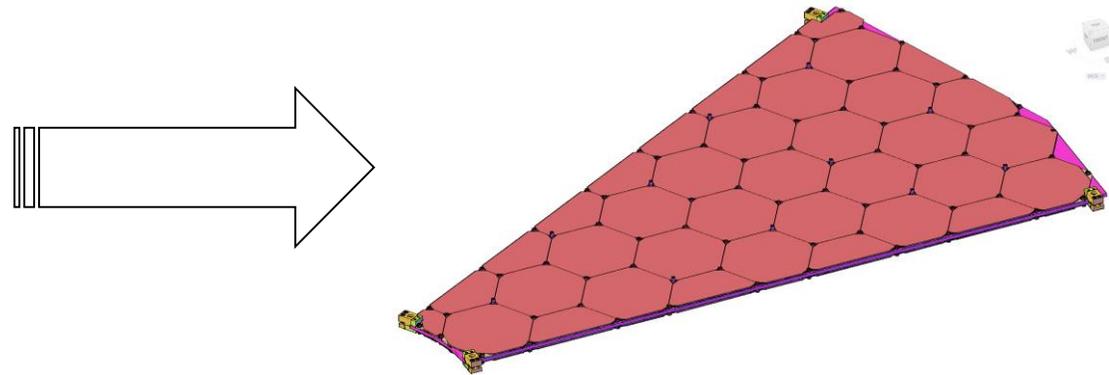
HGCAL: modules & cassettes

Modules

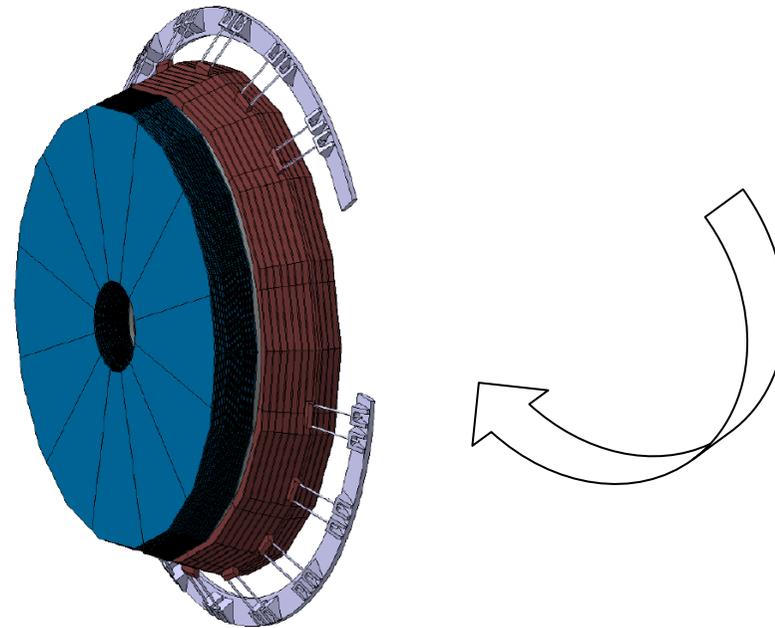
Senseurs Si hexagonaux,
PCB, FE chip, sur support W/Cu



Modules montés sur
Plaque en Cu avec tuyaux intégrés
(refroidissement) == **Cassettes**



Cassettes:
Partie intégrante (EE) ou insérées (FH/BH)
dans la **structure mécanique**
(contenant l'absorbeur)



Personnel à l'IN2P3

Personnes impliquées à divers degrés à **ce jour**
du projet HGICAL pour HL-LHC:



physiciens: F. Beaudette (**Reconstruction, Pflow**), C. Ochando (**Mécanique + Général**), JB Sauvan (**Trigger/Back-end**), Y. Sirois (Général)

S. Baffioni, P. Busson, C Charlot, A. Lobanov, M. N'guyen, G. Ortona,
M. Prvan^(*), J. Rembser, R. Salerno, T. Sculac^(*)

Ingénieurs: E. Becheva, Y. Geerebaert, T. Pierre-Emile, T. Romanteau

Financement R&D Calorimètres ultra-granulaires LLR/LAL/IRFU
(HGICAL-CMS, HGTD-ATLAS, SiW-CALICE) par « Projet Emblématique » LABEX P2IO



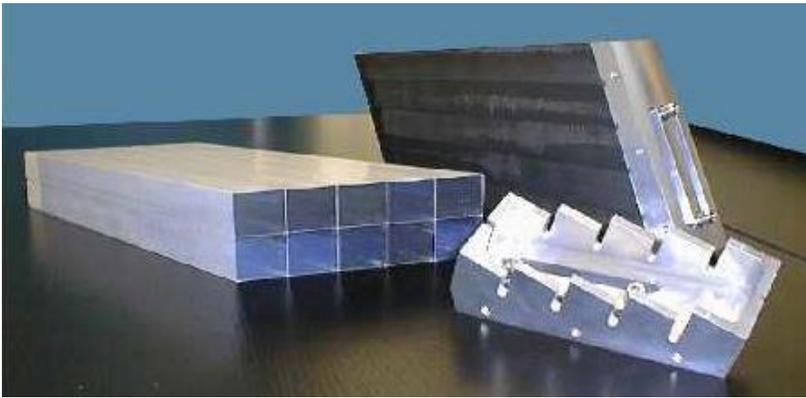
Electronique Frontale (ASIC)

S. Callier, Ch. de la Taille, P. Dinaucourt, F. Dulucq, L. Raux, D. Thienpont

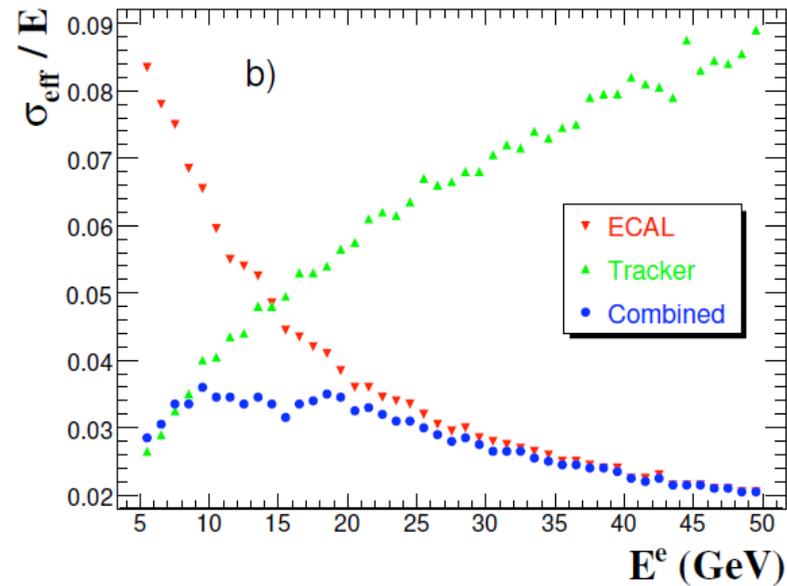
(*) co-tutelle FESB Split

IN2P3 : Réalisations & expertise

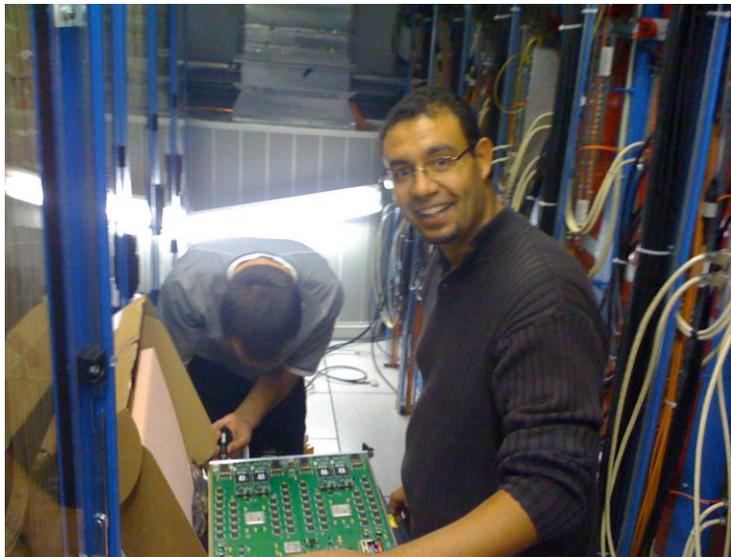
(quelques) réalisations du LLR pour CMS



Conception et fabrication de **la structure mécanique** du ECAL

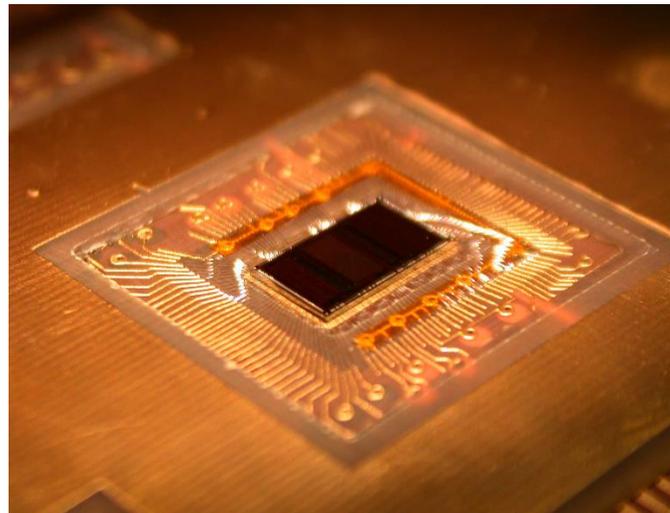


Reconstruction
et Identification des électrons
Particle Flow



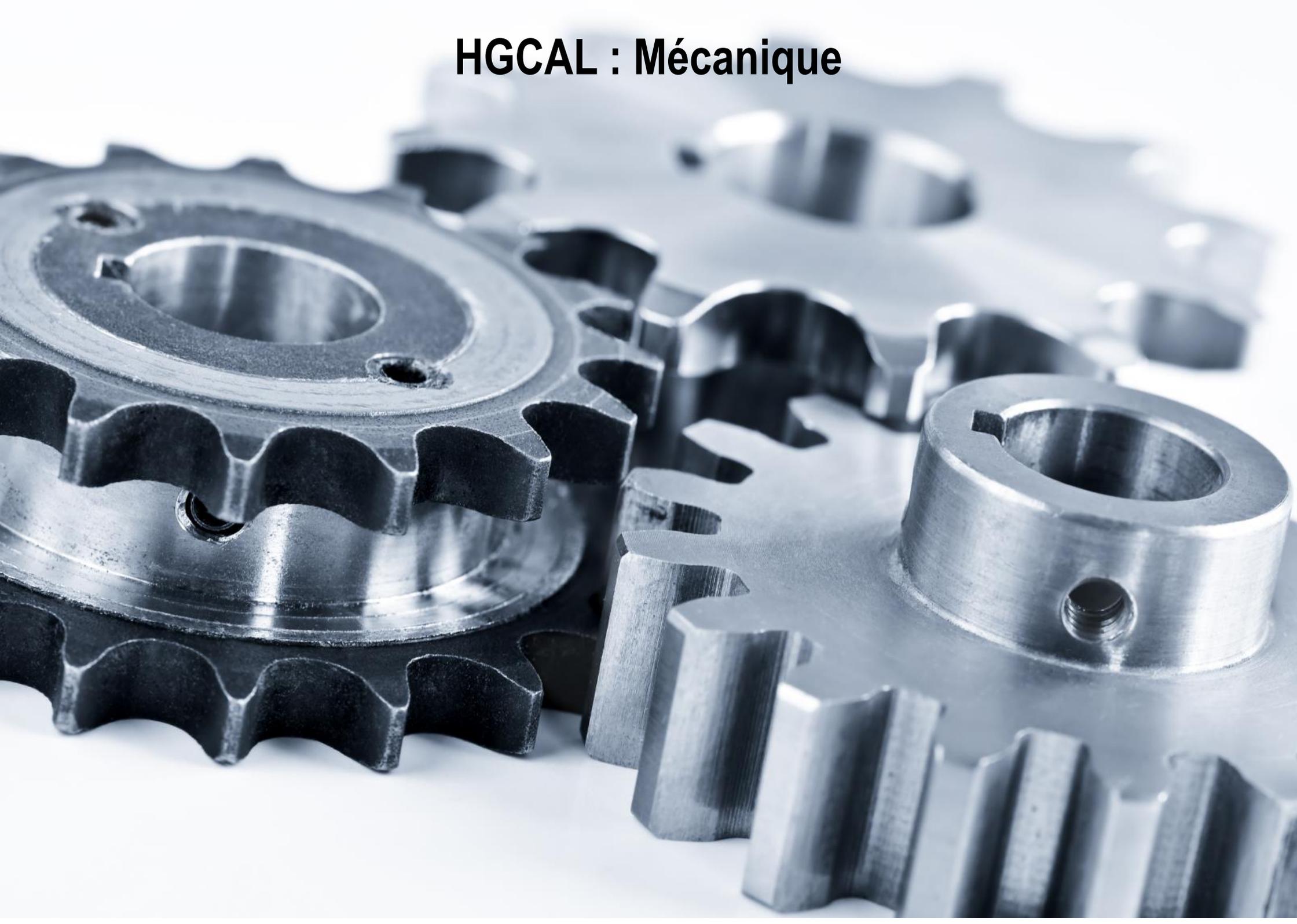
- Conception, fabrication, responsabilité du **L1 ECAL** (cartes TCC)
- Algorithmes, Firmware & performance pour Upgrade Phase I (e/γ , τ)

(quelques) réalisations de OMEGA :



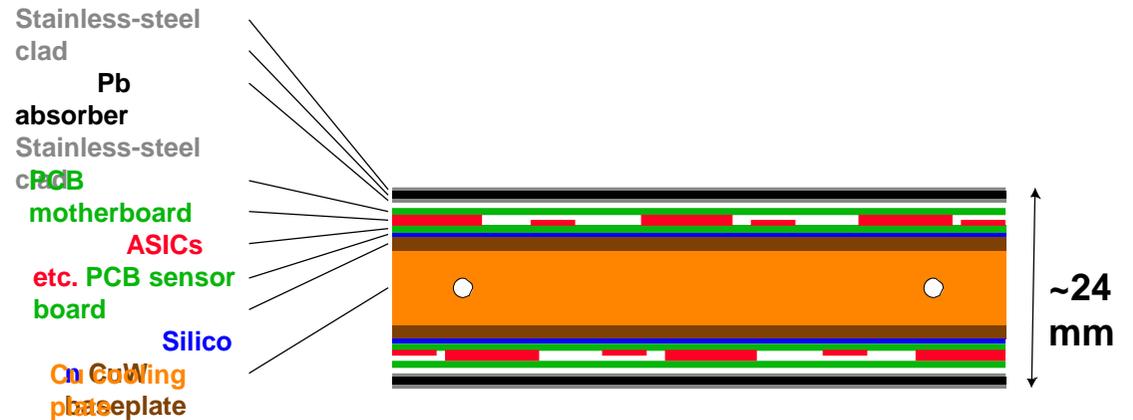
Conception d'ASICS
pour **la calorimétrie en HEP**
(ATLAS LAr, prototypes CALICE,...)

HGCAL : Mécanique

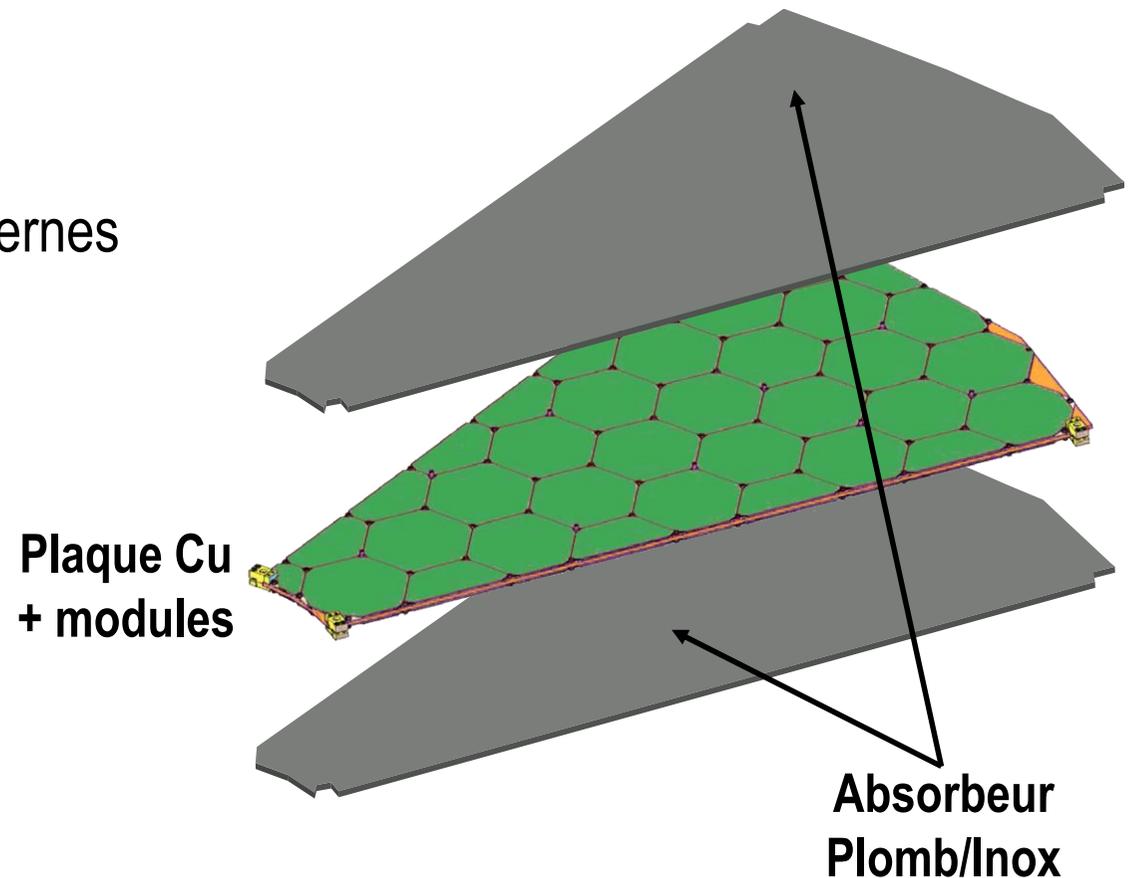


Mécanique: concept EE

- Plaques de Cu de 30° (or 60°), avec modules des deux côtés.
- Absorbeurs Pb/inox de chaque côté



- Cassettes connectées en périphéries internes et externes pour former des disques
- Disques empilés pour former le ECAL
- En position verticale, les disques reposent sur un cône interne (plus de détails en back-up)

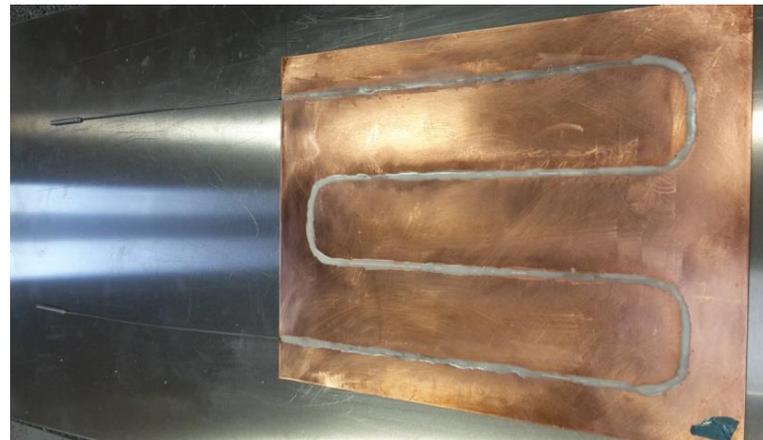
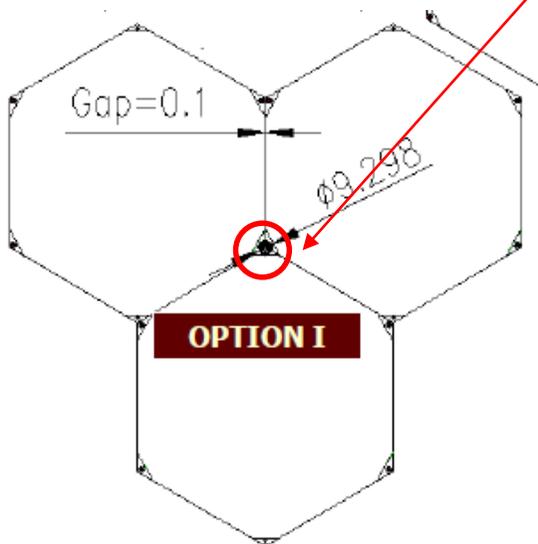
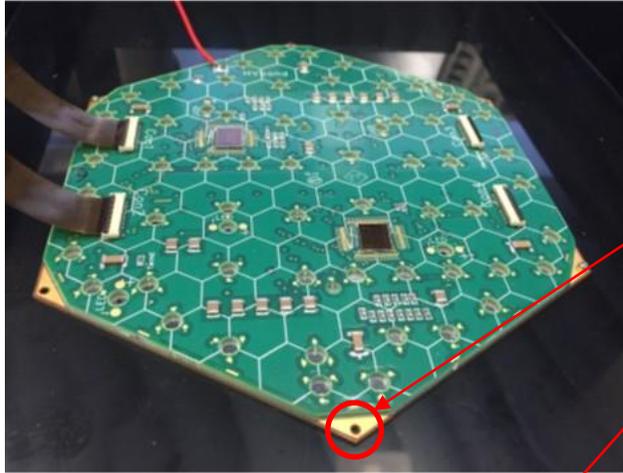


LLR : responsabilité (avec CERN) de la conception de la mécanique du ECAL

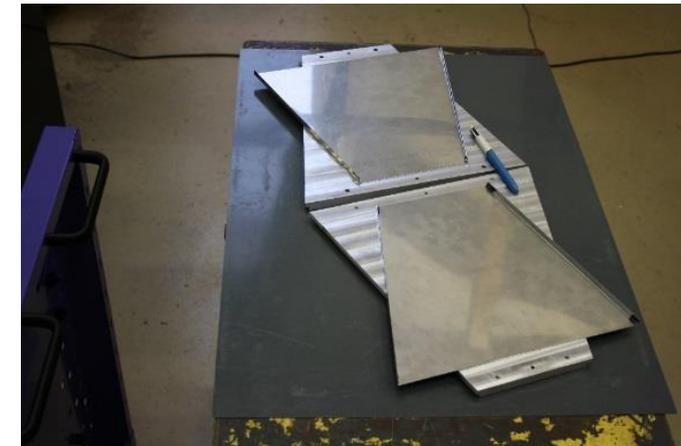
Mécanique : Casette

Intérêt principal du LLR : **casette**

Attache des modules sur cassettes via les « mouse bites »
(localisation, orientation, fixation)
+ boulons d'espacement pour l'empilement des cassettes

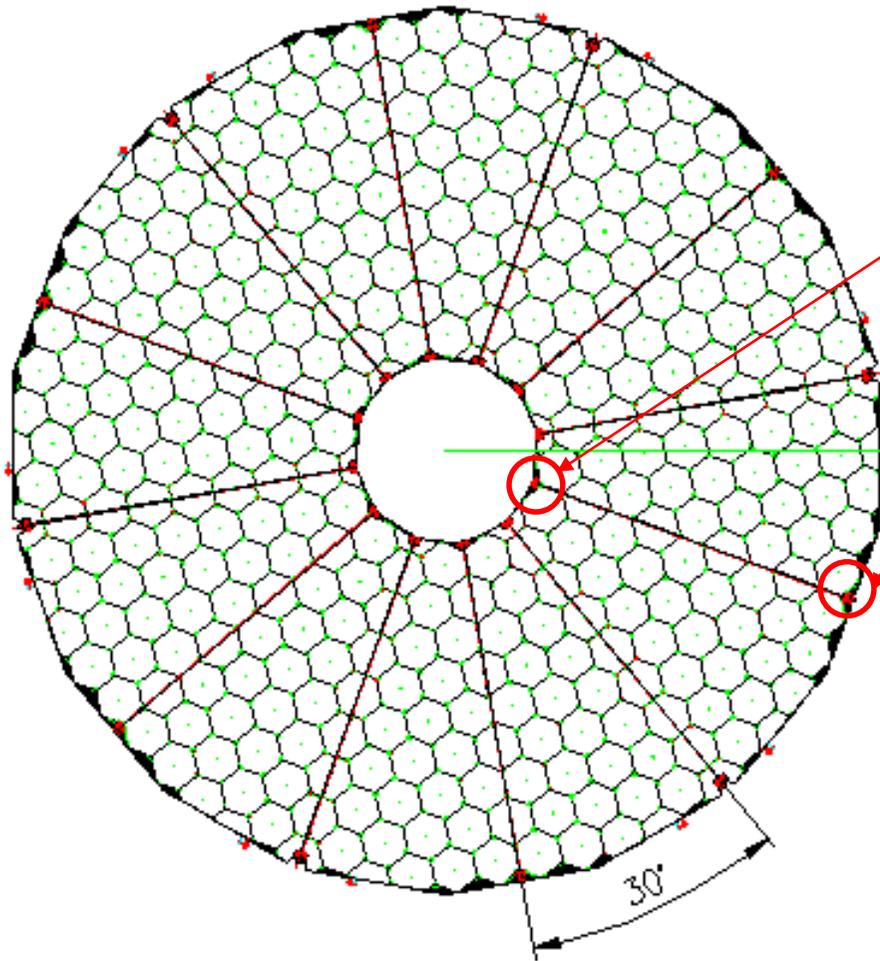


Circuit de refroidissement
intégré à la plaque de Cu



Conception Absorbeur Plomb/inox
+ fixation sur cassette

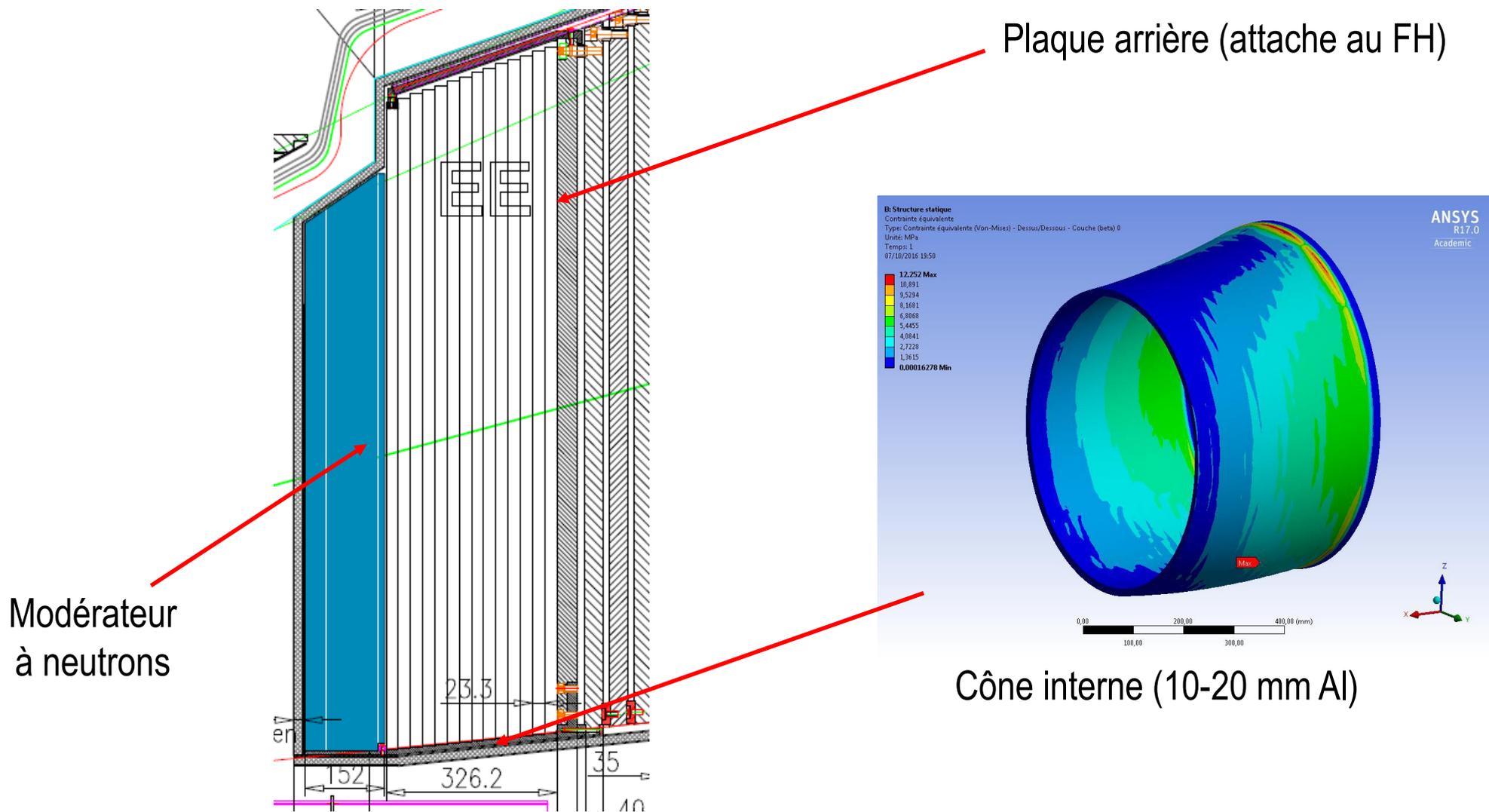
Mécanique : Disques de cassettes



- Interconnexion des cassettes en périphérie,
- Assemblage des cassettes
- Outillage de manipulation des cassettes

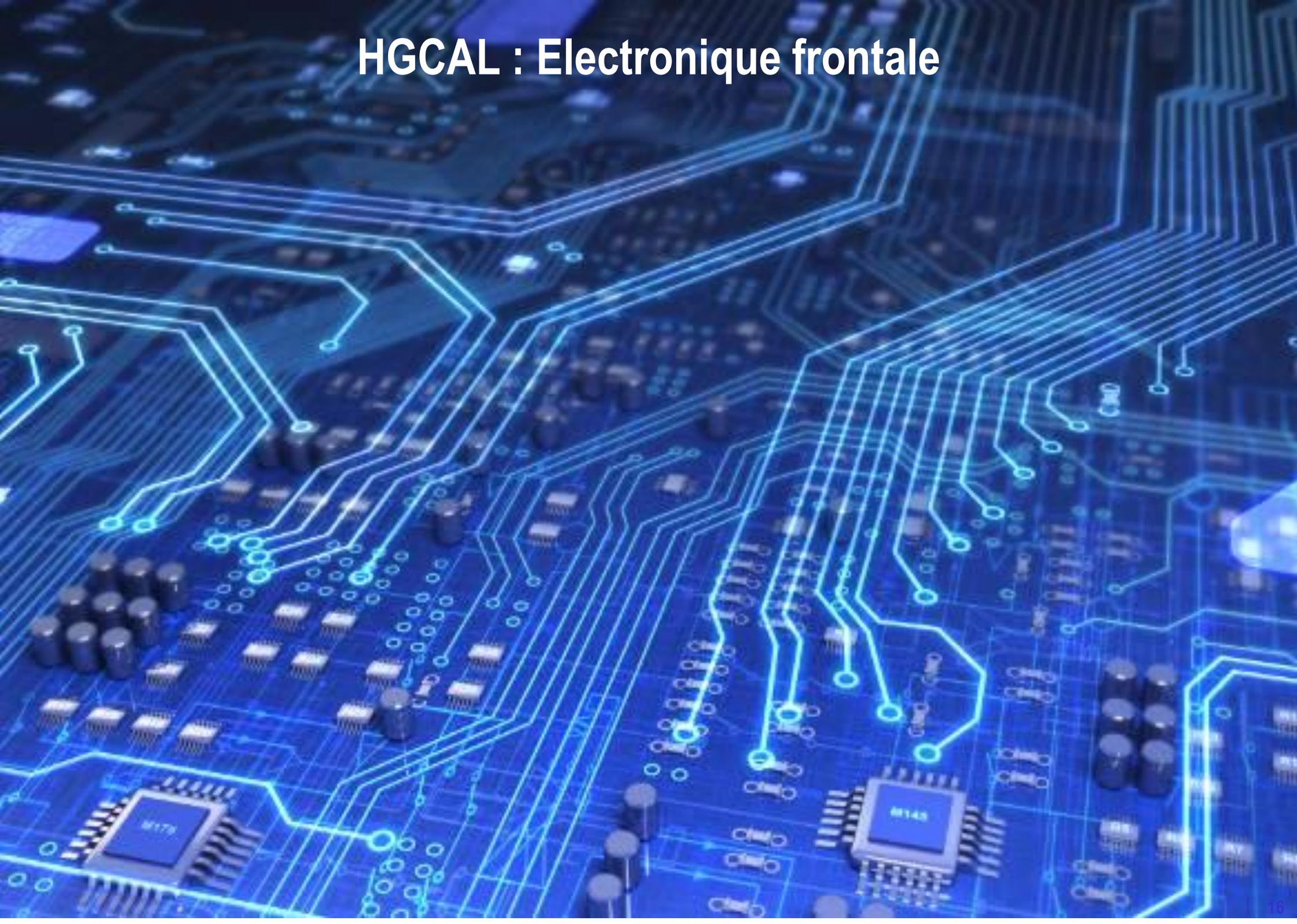
LLR : supervision, intégration à la maquette
Conception détaillée : autres instituts (CERN,...)

Mécanique : éléments structurels et modérateurs à neutrons



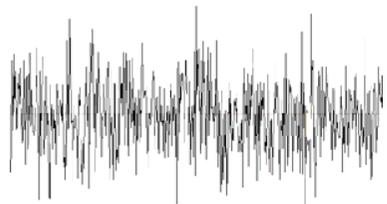
LLR : supervision, intégration à la maquette
Conception détaillée : autres instituts (Protvino, ...)

HGCAL : Electronique frontale

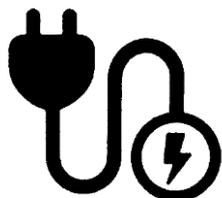


Electronique Frontale "HGROC" (ASIC)

Un des aspects les plus exigeants du projet



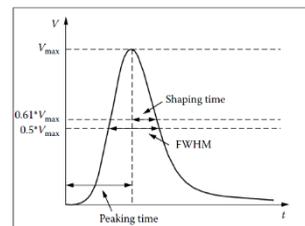
Large gamme dynamique
(0.4 fC -> 10 pC)
Bas bruit



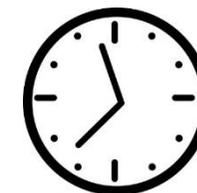
Basse puissance
(~10 mW / canal)



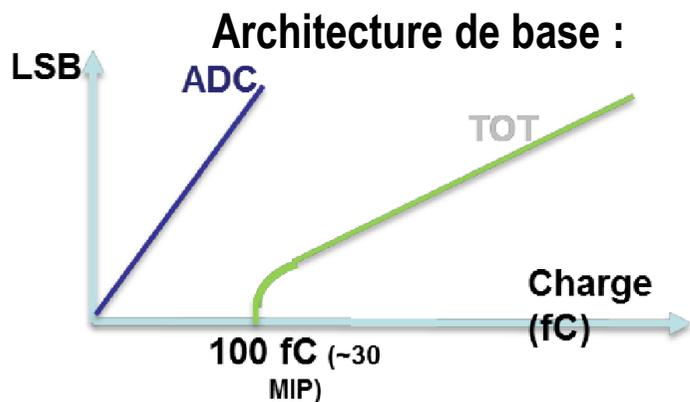
Résistant
aux radiations



Shaping time : 10-20 ps
(peaking time: 1-2 ns)

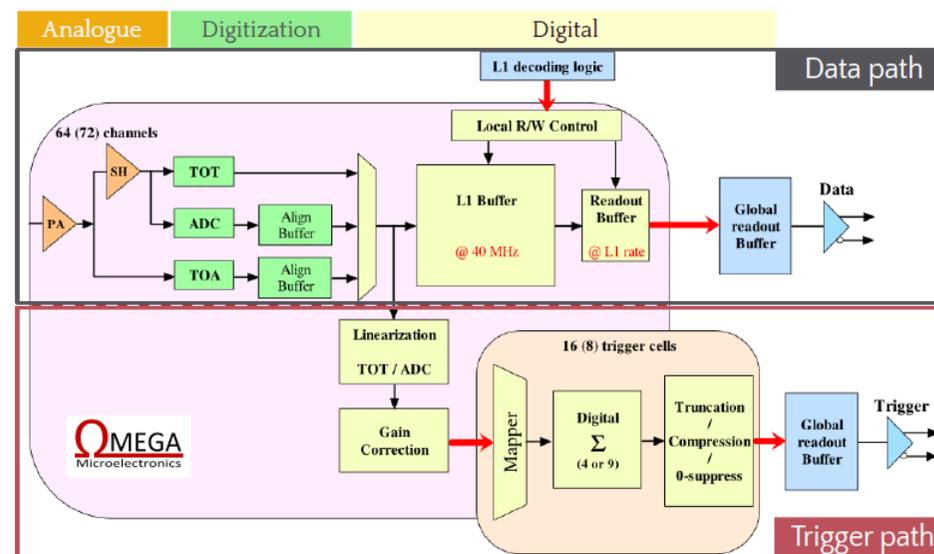


Résolution en temps :
50 ps / cellule



Charge + Time-over-Threshold (ToT) [*]

- Transition vers ToT : ~100 fC
- ADC (10 bits) charge and TDC (12 bits)



(analog+digital, high-speed readout)

OMEGA: responsabilité/maitre d'œuvre de l'ASIC l'électronique frontale
(architecture globale, floor planning, intégration des différents composants)

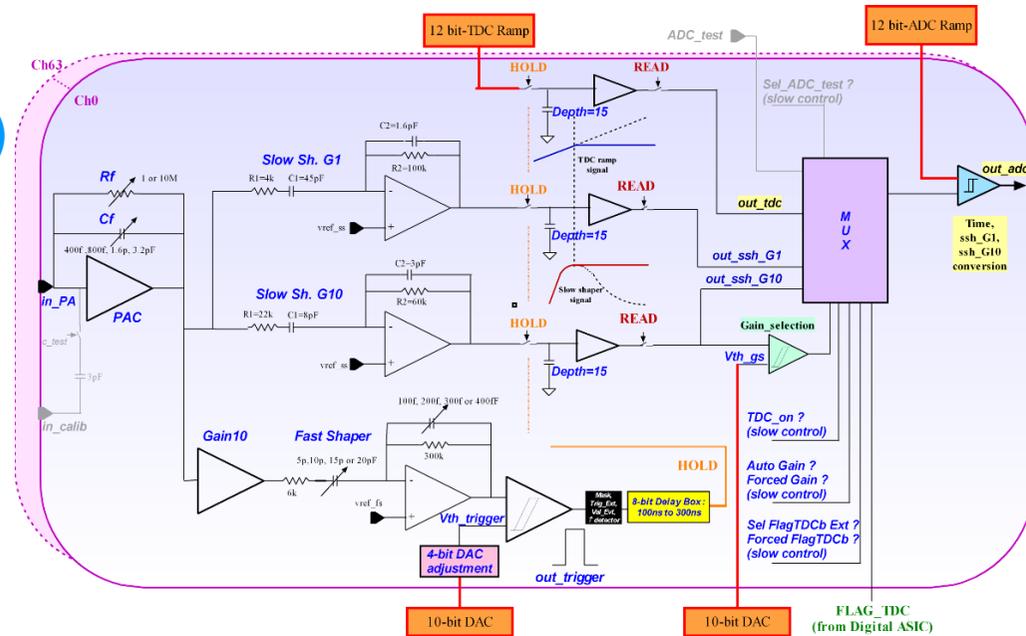
CERN, IRFU, Imperial College: fournissent des blocs

[*] alternative: more classical readout (bi-gain) or switched feedback

SKIROC2_CMS

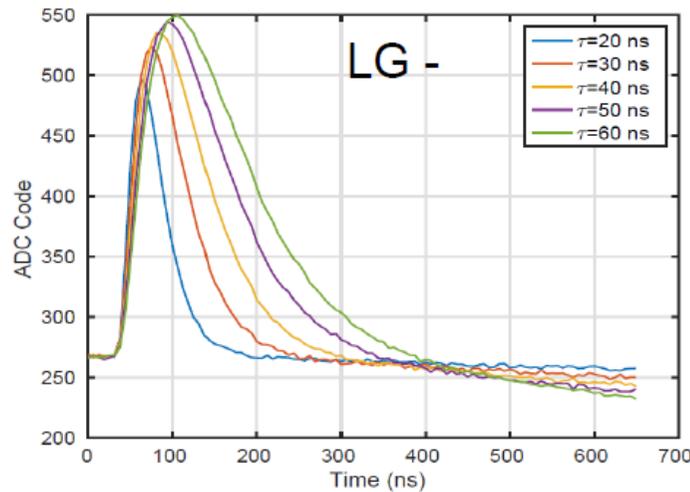
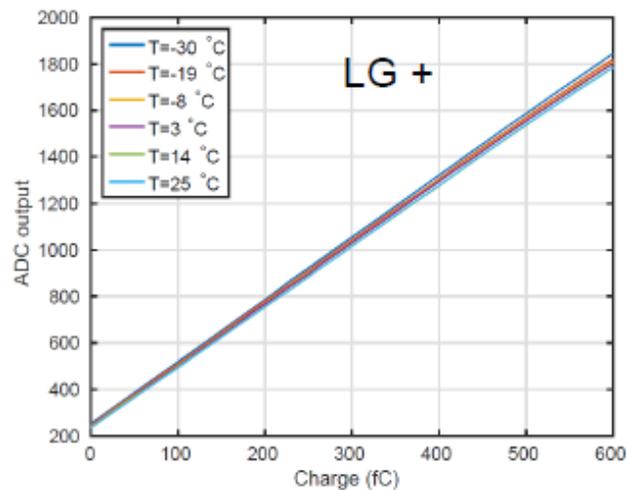
➤ Première réalisation : SKIROC2_CMS (Janvier 2016)

- Nouveau chip SKIROC (utilisé pour calorimètre SiW CALICE):
- Optimisé pour CMS
- Shaper plus rapide (25 ns vs 200 ns)
- TDC pour Time Of Arrival (ToA) et ToT
- **But : tester la calorimétrie avec ToT**



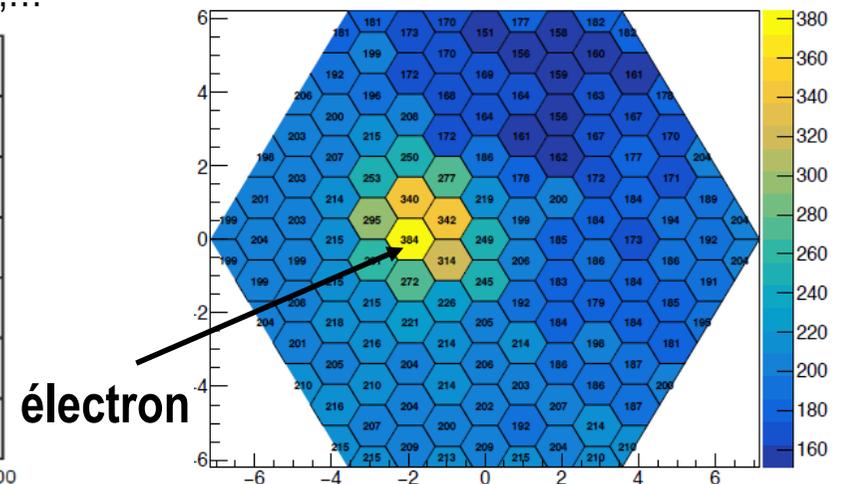
Tests en laboratoire

All channels functional, Noise measurements according to simulations, Good linearity,...



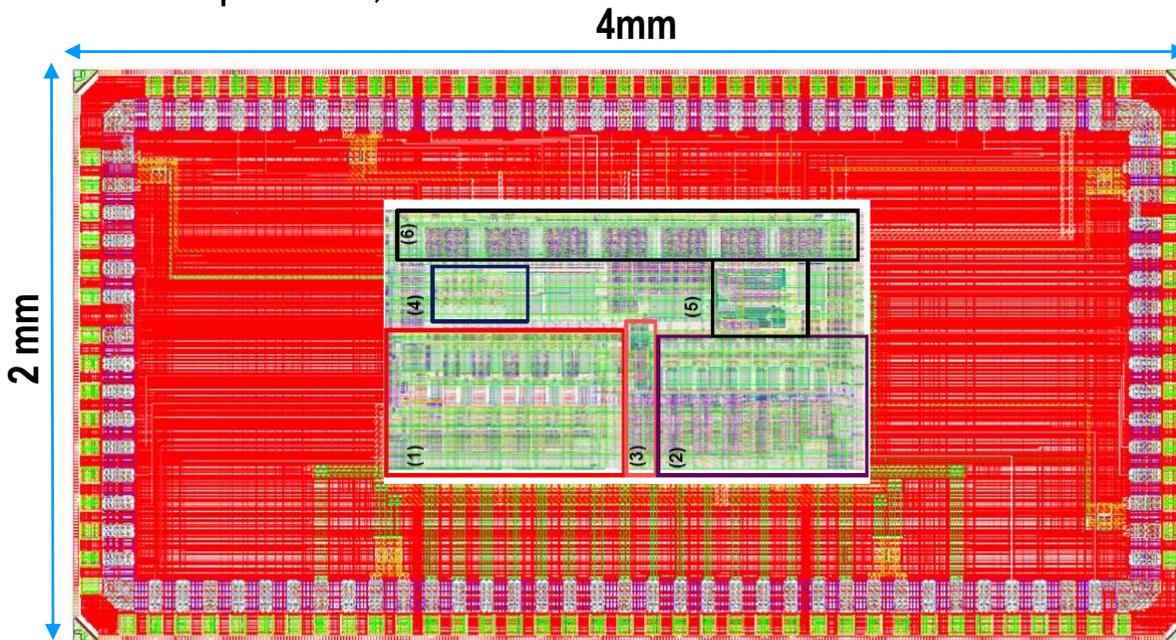
Utilisé en tests en faisceaux 2017

ADC hg timesamp 3



TV1 / TV2

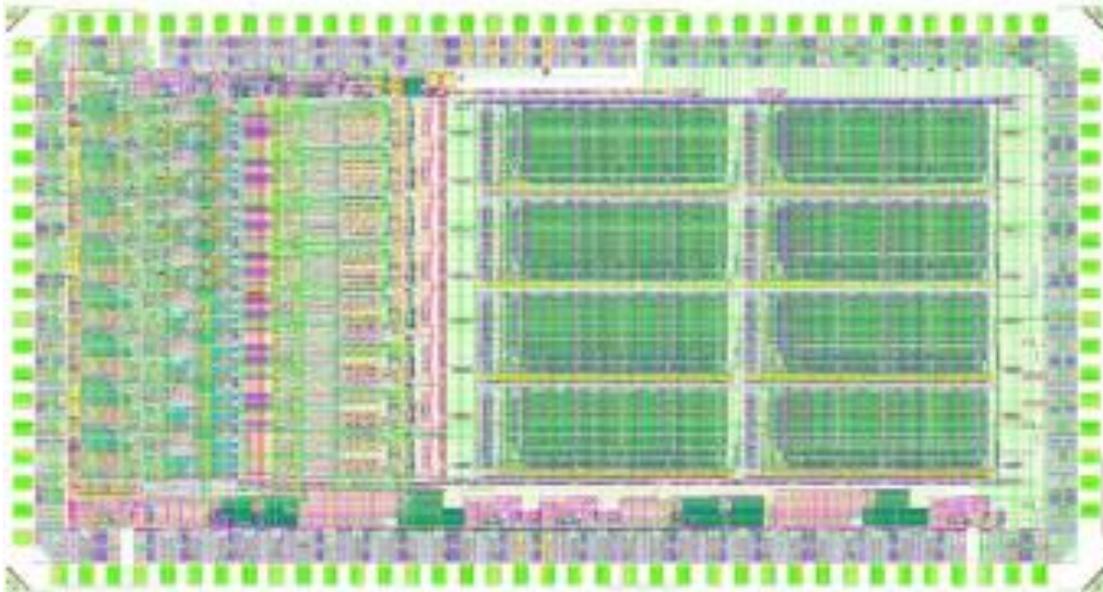
- En vue de la première itération de HGROC, plusieurs « tests de véhicules » (TV) pour **tester différents options** (pre-amp, shaper, ADC, etc...), résistance aux radiations des différents composants, ...



TV1 (mi-2016)

Floorplan

- (1) positive input preamps x6
- (2) negative input preamps x6
- (3) baseline channel (CERN) x1
- (4) discriminators x4
- (5) CRRC shapers: HG and LG
- (6) digital part



TV2 (Printemps 2017)

8 canaux analogues + ADC
+ 32x512 RAM

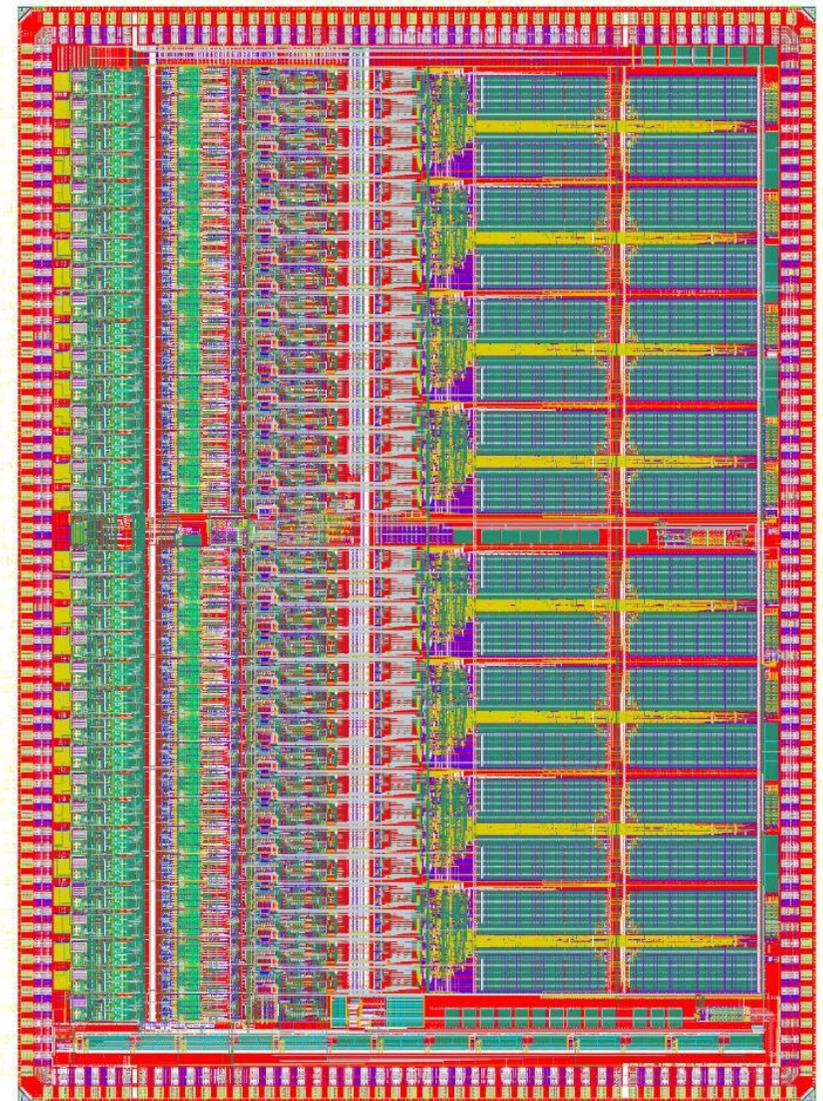
➤ HGROC v0 prévu pour Juillet 2017

- 32 canaux
- Double polarité
- **Analogique:** différentes variantes:
 - Time Over Threshold: 2 variantes (IC, OMEGA)
 - Time Of Arrival : CEA-IRFU
 - 11-bit SAR ADC (OMEGA)
- **Numérique**
 - Version simplifiée de la voie trigger
- Data readout « à la SK2-CMS » @ 320 MHz
- Slow control,
- Services, ...

➤ **Version finale pour ~2020**

(1-2 itérations supplémentaires nécessaires)

7x5 mm², TCMC 130 nm

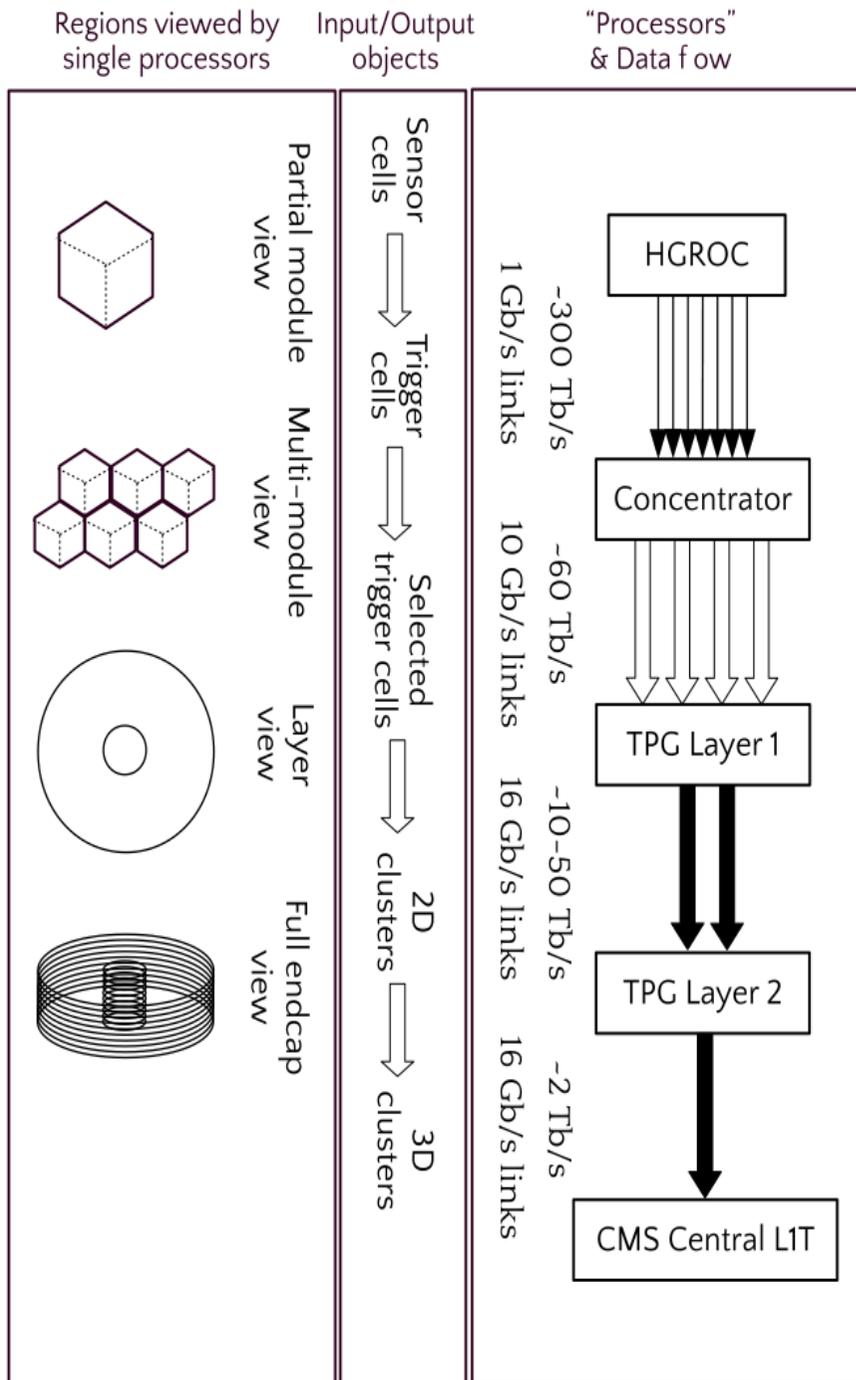


HGROC v0 floorplan

HGCAL : Electronique dorsale et declenchement



Level 1 Trigger & Back-end electronics



Front-End

(« Meilleure info vs bande passante »)

➤ ASIC HGROC:

- Regroupement de cellules -> « cellules de trigger TC » (2x2, 3x3...): Perte en granularité, résolution

➤ Concentrateur:

- Sélection d'une fraction des TC

LLR : Etudes voie « trigger » du Front-end :

- HGROC (avec OMEGA)
- Concentrateur (avec FESB Split)

Back-end :

- 2D clustering
- 3D cluster linking

LLR : Développement Algorithmes de « primitives de déclenchement » du Back-End

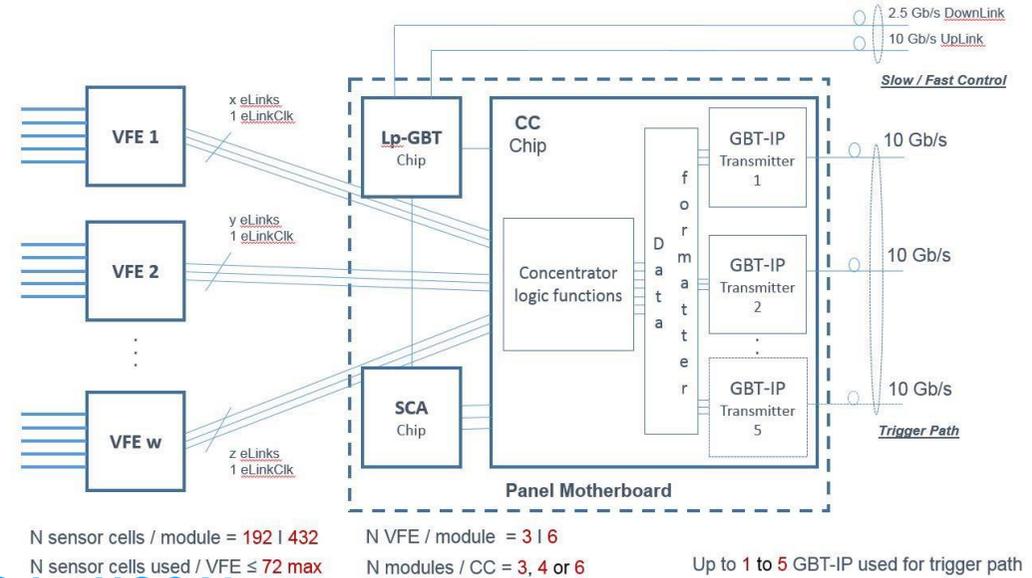
: briques de base pour objets physiques (e, γ, τ)

Outils : Simulation de toutes les étapes du L1 (software/firmware) + banc de test @ LLR

L1 Trigger : Etudes Front-End

➤ Etudes sur l'architecture de l'électronique

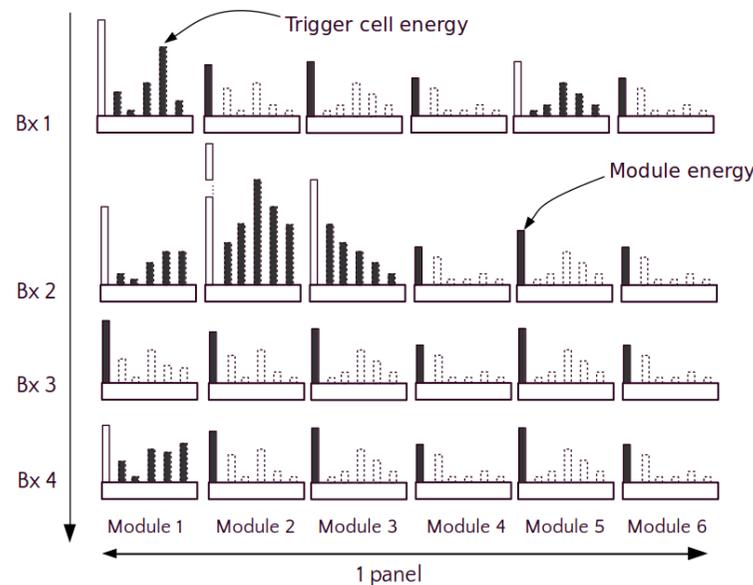
- Taux d'occupation, géométries des senseurs, ...
- Nombre d'e-links (HGROC->Concentrateur)
- Nombre de liens IpGBT optiques (Concentrateur->Back-end)



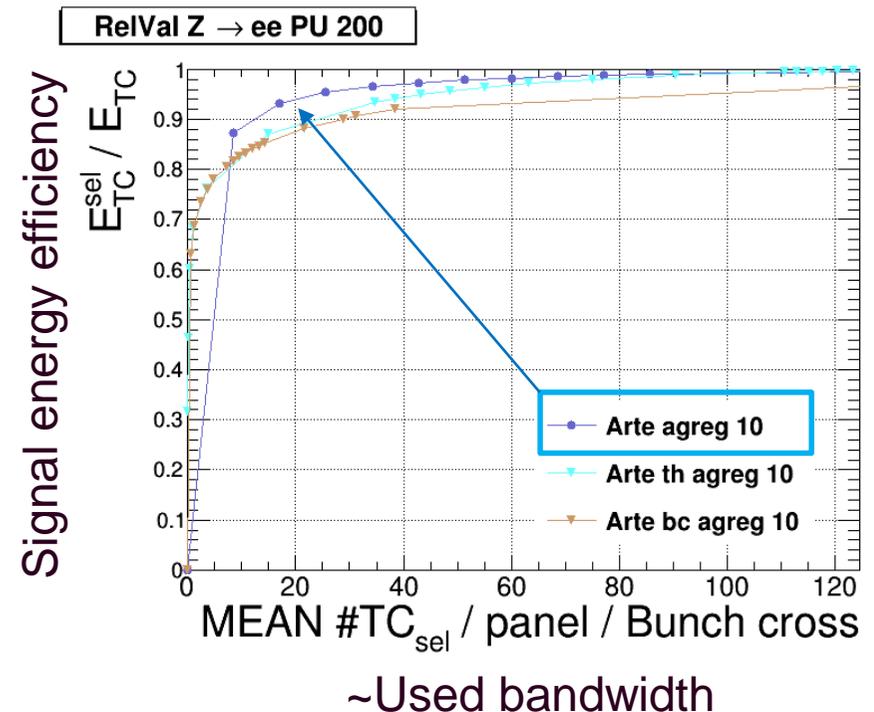
➤ Develop new selection strategies in the front-end of the HGCal

- Select "Modules of Interest" (most energetic)

➤ More efficient in selecting signal compared to methods selecting trigger cells individually



Selection performance

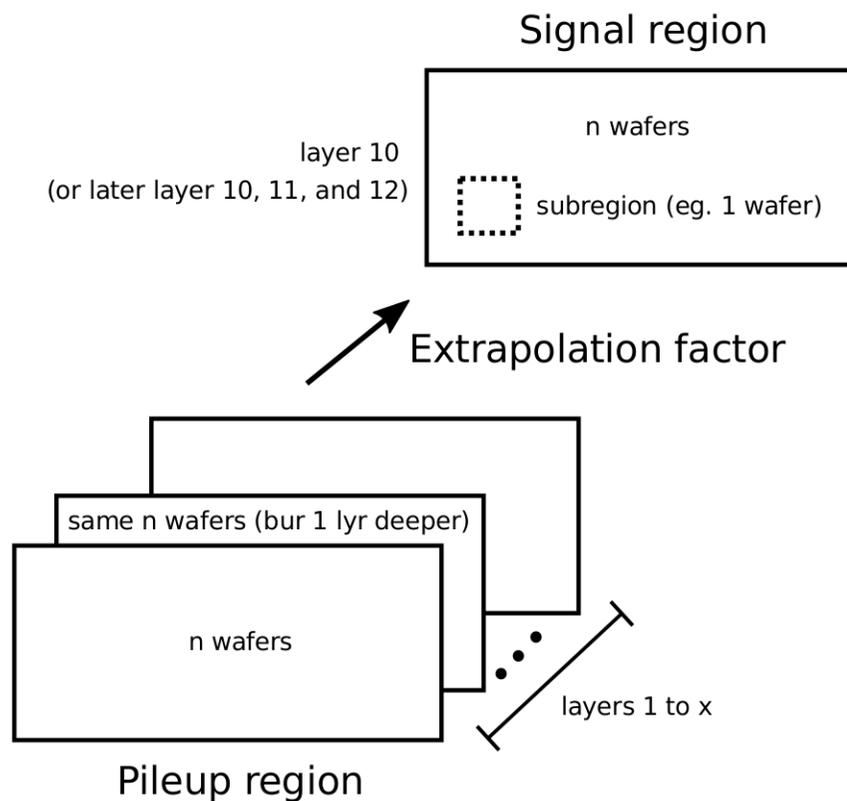


L1 Trigger: Back-end studies

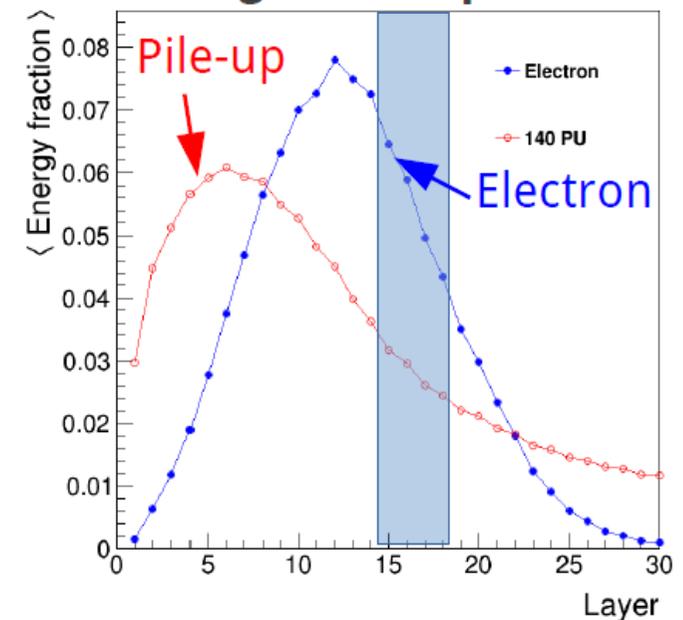
➤ Developments on three aspects

- Clustering/tracking algorithms
- Electron/photon and tau identification
- Pile-up estimation and mitigation techniques

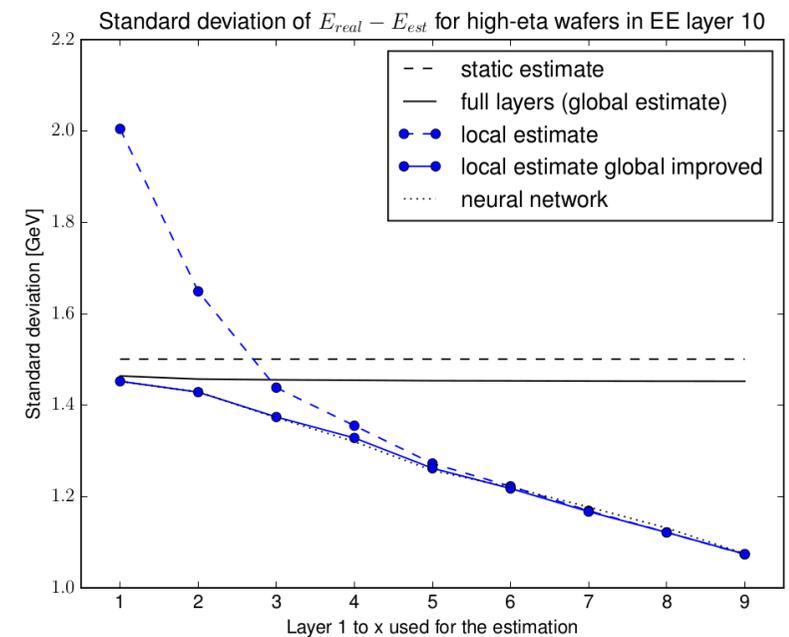
Pile-up estimation using the longitudinal information



Longitudinal profiles



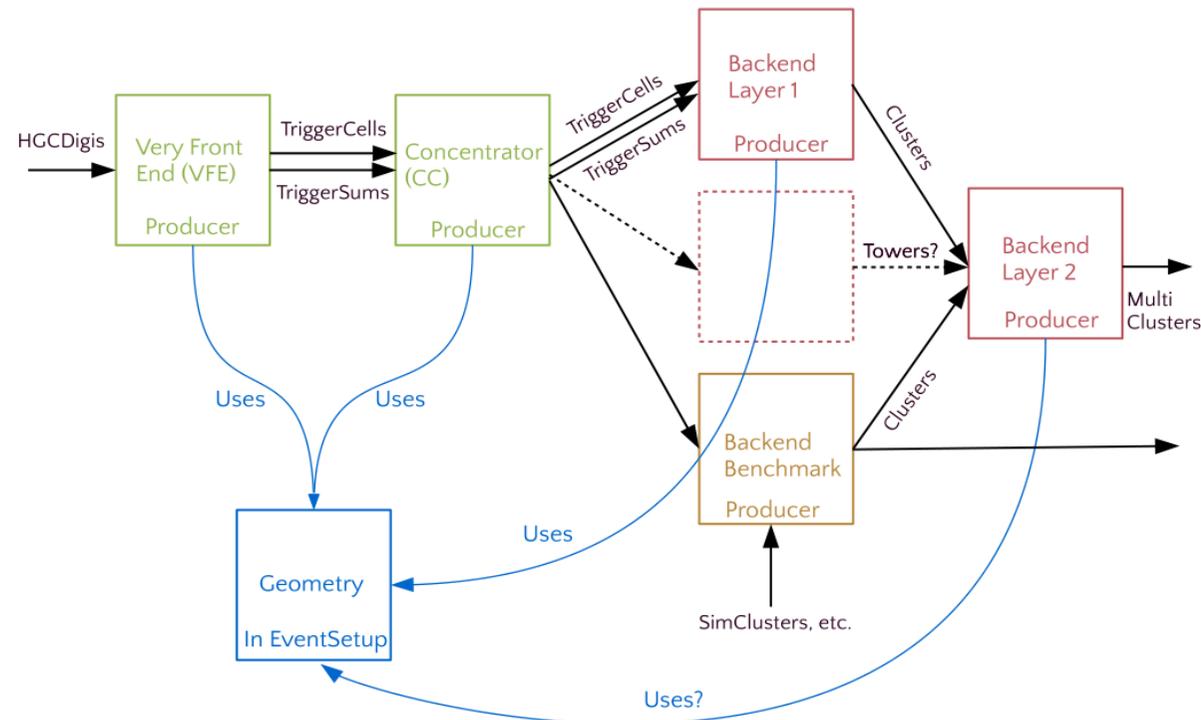
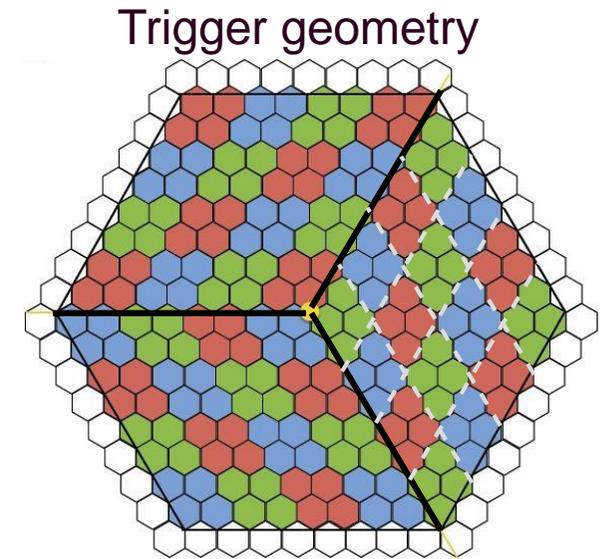
Impact of using local longitudinal information on pile-up estimation



L1 Trigger: Software & Emulation

➤ Activités software : Développement de tous les ingrédients nécessaires aux études de performances

- **Infrastructure software, management**
- **Géométries**
 - Cellules et modules de trigger,
 - Navigations entre voisins
- **Emulation du Front-End**
 - Encodage/décodage de l'énergie
 - Algorithmes de sélection
- **Emulation du Back-end**



L1 Trigger : Banc de test

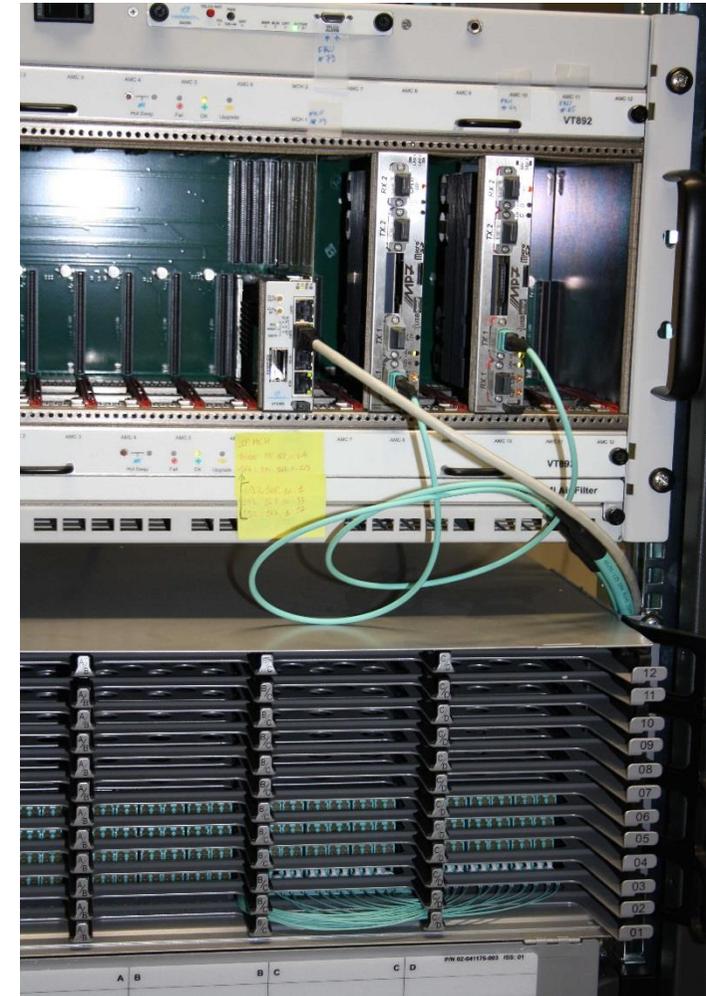
➤ Implémentation et test de la chaine de trigger sur un banc de test

- Chassis microTCA avec cartes MP7 (Imperial College)
 - Déjà largement employé dans CMS
 - Plateforme « PRIVAT » financé en partie par Labex P2IO
- **Carte MP7 utilisees**
 - pour émuler et tester le bloc trigger du concentrateur (front-end)
 - Tester Communication concentrateur-back-end (codage/décodage)

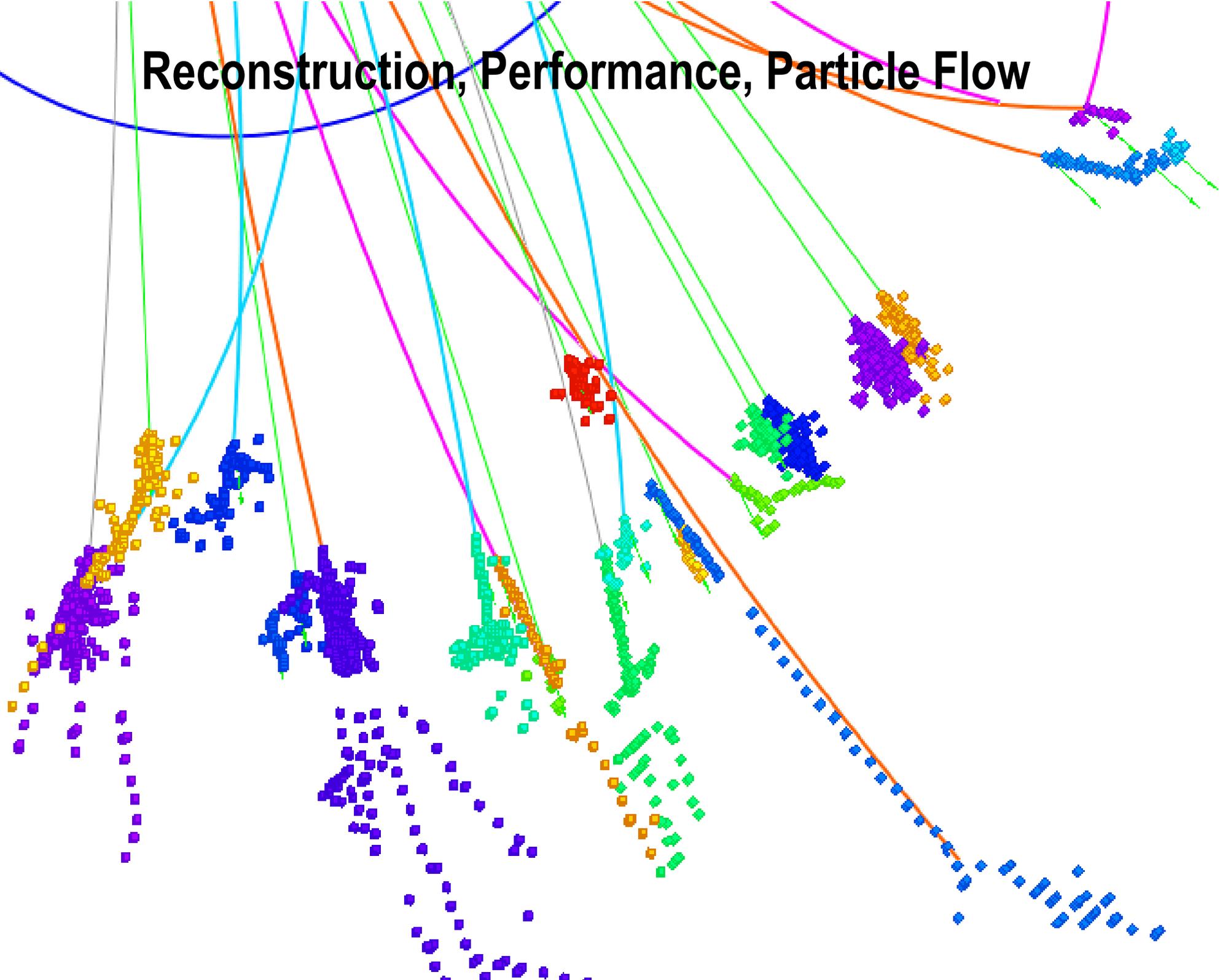
➤ Développement algorithmes

- D'abord version « prototype » sur MP7
- Puis sur système final

➤ Comparaison aux simulations

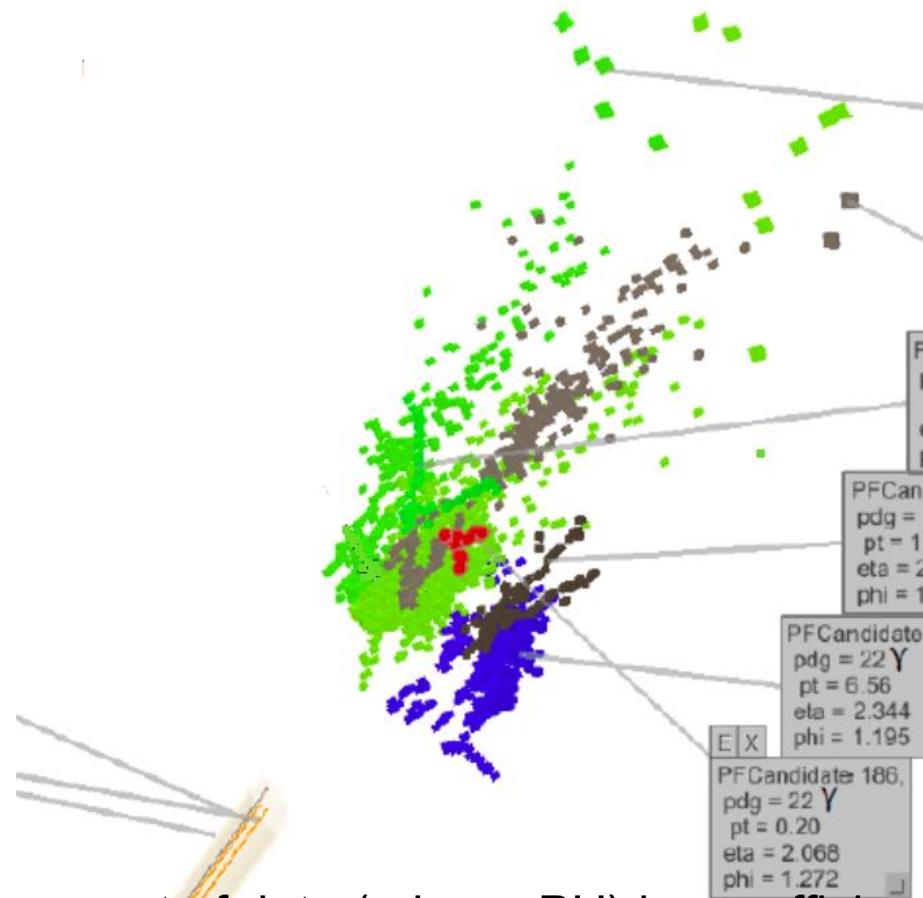


Reconstruction, Performance, Particle Flow



Reconstruction & Performance (1)

- **High-Granularity (in all directions) + Timing opens up many exciting possibilities !**
 - including additional handles to deal with background rejection and Pile-Up



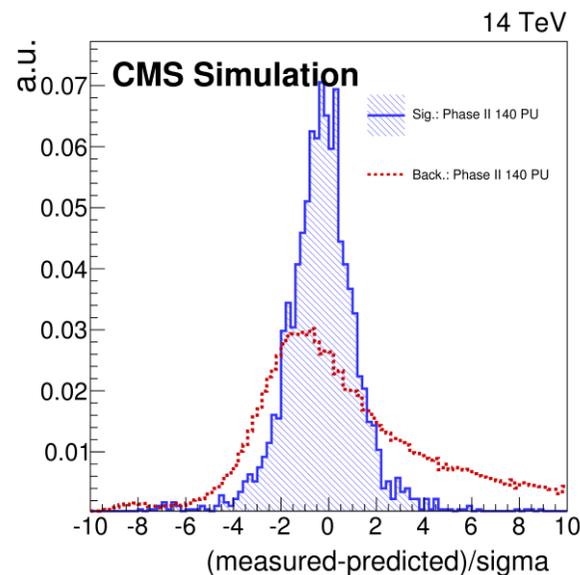
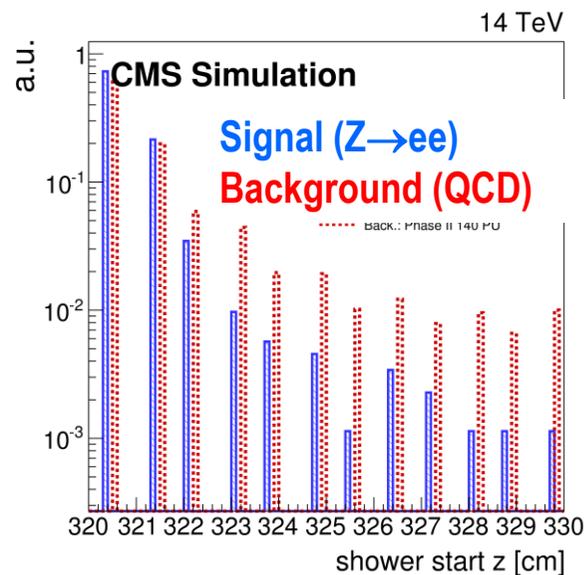
- But dealing with such amount of data (+ huge PU) in an efficient, “fast” and performing way is an **enormous challenge for both reconstruction algorithms and computing** sides
 - Will need new ideas and approaches...
 - For instance, with 200 PU and “standard” technics, offline recon takes 5min/event !!!!

Reconstruction & Performance (2)

Intérêts du LLR :

Reconstruction des électrons,
taus & Particle Flow

Parallélisation, GPU



- Résultats encourageants obtenus pour le Technical Proposal (Juin 2015)
- Poursuite des efforts pour le TDR et au-delà pour utiliser l'ensemble des capacités du détecteur

- LLR a déjà démontré (pour analyses avec MEM) que parallélisation seule apporte gains importants
 - Gain décuplé avec GPU !
- « Clustering »: aspect crucial pour la reconstruction.
- LLR: parallélisation du clustering puis portage du GPU

HGCAL : calendrier des prochaines années

To be presneted to LHCC/UCG		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026		
Calendar Year		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026		
Long Shutdowns					LS2						LS3			
Tracker:	Outer	Design - Demo.		... Engin. - Proto.		EDR	... Pre-prod.		Prod.	Integ.		Comm.	Float	Install. Comm.
	Pixel	Design - Demo.		... Engin. - Proto.			EDR	... Pre-prod.		Prod.	Integ.	Comm.	Float	Install.
Barrel Calorimeters		Design - Demo.		... Engin. - Proto.		EDR	... Pre-prod.		ESR	... Prod.		Float	Integ.	Install. Comm.
Endcap Calorimeters		Design - Demo.		... Engin. - Proto.		EDR	... Pre-prod.		Endcap 2 prod.	Integ.	Comm.	Float	Install.	
							Endcap 1 prod.		Integ.	Comm.	Float	Comm.		
Muons:	GEM1	Engin. ED/SR		Production - Assembly		Float	Install. Comm.							
	CSC	FE Engin.- Pre-prod.		... ESR		Prod.	Install.		Off- detec. ESR	... Pre-prod. - Prod. -Inte.		Float	Install. Comm.	
	DT								... Pre-prod. - Prod. -Inte.	Float	Install. Comm.			
	GEM2-RPC3/4 GEM0	Design - Demo..		... Engin. - Proto.		EDR			... Pre-prod. - Prod. - Inte.	Ready to install. Comm.				
Trigger		Design		ID	... Demo - Engin. - Proto.		TDR	... Pre-prod.		ESR	Prod. - Inte..		Float	Install. Comm.
DAQ/HLT		Design		ID	... Demo. - Proto.		<-- TDR -->		...Pre-prod.	ESR	Prod. - Inte.		Float	Install. Comm.
<small>Development of detector design, Technology R&D, specification and demonstration of major components feasibility Enginereeing, prototyping and validation of final components, assemblies and systems</small>														

➤ HGCAL Schedule:

- End of 2017: **Technical Design Report** written (but public mid-2018 after LHCC review)
- **Mechanical and Front-End design** ready by end of 2019
- Mi-2020 : Engineering Design Review (EDR)
- 2020 – 2024 : Pre-production et Production
- 2024 – 2026 : Installation
- 2026 – >2035 : Running

Conclusions

HGCAL est un projet très ambitieux... et stimulant !

➤ IN2P3:

- **Expertise unique**: concept inventé/valide à l'IN2P3 (CALICE, ...)
 - Participation forte est naturelle
- **Rôle pivot** dans l'acceptation de la proposition par CMS et dans la R&D en cours
- Contributions de l'IN2P3 sont **cohérentes** avec l'expertise et les contributions passées :

- **Conception Mécanique ECAL**
 - focus sur les cassettes
- **L1-Trigger & électronique back-end**
 - Voie trigger dans ASIC Front-End et Concentrateur
 - Développement algorithmes ($e/\gamma/\tau$) pour back-end
- **Reconstruction / Software**
 - Développements reconstruction Particle Flow $e/\gamma/\tau$
 - Développements Parallélisation / GPU

- **Conception ASIC Electronique Front-End**

OMEGA
Microelectronics

IN2P3 doit rester une force motrice dans ce projet

BACK UP SLIDES

Réponses au Rapporteur 1 (1/2)

A) Questions sur HGAL :

i) Détailler mieux la répartition de responsabilité souhaitée pour la mécanique entre LLR et le CERN.

Le LLR souhaite prendre la responsabilité de délivrer la conception détaillée d'une cassette du calorimètre électromagnétique, incluant donc la fixation des modules sur la plaque de cuivre, le circuit de refroidissement, l'assemblage des absorbeurs et le routage des services jusqu'en périphérie extérieure. Le CERN se chargerait alors de la conception générale, et en particulier de comment assembler les cassettes entre elles pour former des disques et comment assembler les disques pour former le détecteur.

Le LLR et le CERN auront par ailleurs un rôle commun de supervision de l'ensemble des études effectuées par les autres instituts sur, par exemple, les éléments structurels du détecteur (cone interne, plaque arrière, partie avant...).

ii) Détailler mieux la collaboration existante entre OMEGA, Saclay, Imperial College et CERN pour la conception de l'électronique frontale HGROC.

OMEGA a la responsabilité et la maîtrise d'œuvre de l'ASIC de l'électronique frontale. OMEGA définit l'architecture, le « floor planning » et assure l'intégration des différents composants.

Les autres instituts fournissent des blocs :

- l'IRFU fournit 1 TDC (pour le Time of Arrival)
- Imperial College fournit une variante de TDC (pour le Time Over Threshold)
- le CERN fournit les blocs de mémoire.

Il est à noter qu'OMEGA est en capacité de fournir l'ensemble des blocs nécessaires à la réalisation de l'ASIC d'électronique frontale mais a choisi de déléguer à des partenaires certains blocs afin de minimiser les risques.

Réponses au Rapporteur 1 (2/2)

iii) Détailler les ressources humaines en termes de ingénieurs et techniciens disponible au sein du LLR pour prendre les responsabilités techniques sur la mécanique du HGICAL.

Afin de participer à la conception de la mécanique de la partie électromagnétique, Le LLR dispose d'un ingénieur de recherche en mécanique, déjà primé par CMS pour ses réalisations précédentes, ainsi que d'un ingénieur d'étude récemment arrivé au laboratoire, totalisant 1.5 FTE sur le projet pour les années à venir. L'atelier dispose à l'heure actuelle de 2 techniciens. Il a été vérifié avec les instances du LLR que ces ressources humaines, ainsi que le « temps atelier » demandé pour la réalisation de prototypes, est conforme à nos engagements.

Réponses au Rapporteur 2

A) Questions on HGICAL

i) Does the choice of a different mechanical concept than the one developed by LLR have a negative impact on the contributions to that aspect of the project?

No. It is well understood that the main reason to choose the current concept was related to the higher flexibility it allows given the still unknown specifications of the electronics or cooling aspects of the project. The LLR is thus now focusing on the design of the cassettes, which has now also a mechanical role. The LLR is fully engaged to make this mechanical concept to work, as demonstrated by the responsibility given to us as well as the manpower engaged by the lab into the mechanics studies.

D) General Questions :

Is there an over-commitment of OMEGA? Would this potentially require a prioritization of projects across ATLAS and CMS if most or all IN2P3 options are chosen by the collaborations?

OMEGA is recognized as a world-class laboratory to design ASICs for high energy physics and IN2P3 should be proud numerous important projects of our field are asking for its expertise. While it is true OMEGA is highly committed to the LHC upgrades, one has to realize the following:

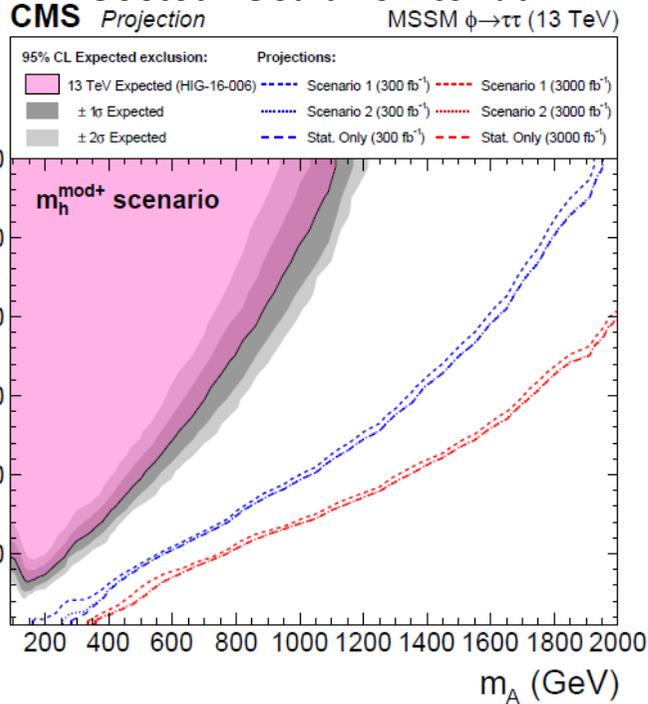
- synergy: there are several common blocks to the ATLAS and CMS ASICS in development, which help optimizing the resources and work and creates real synergy between the different projects.

This synergy has been instrumental for the collaboration between institutes in the Paris area involved in ATLAS HGTD, Calice ILC, and CMS LHC at IN2P3 and IRFU.

- partnerships: although OMEGA could develop several different ASICS alone, OMEGA made the choice to create partnership with other institutes (IRFU, Imperial College, CERN, SLAC, ...) so as to delegate the work, minimize the risks and cope with all commitments.

Compléments : Physique

Secteur Scalaire Etendu



Recherche de T-Quark

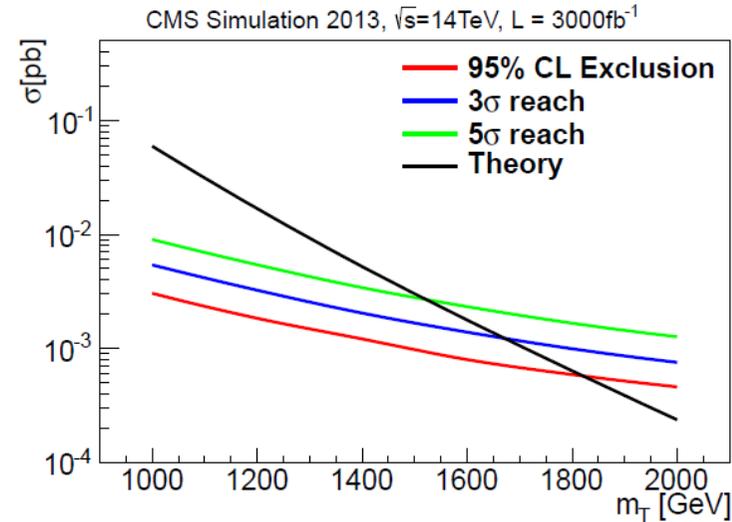


Figure 7: Expected sensitivity for a T quark pair production signal in the combined multilepton and single-lepton+jets sample. The 95% C.L. limits, 5 σ discovery reach and the 3 σ discovery reach are shown as a function of the T quark mass.

Table 5: Projection of the sensitivity to the SM $gg \rightarrow HH$ production at 3000 fb^{-1} expected to be collected during the HL-LHC program. The projections are based on 13 TeV analysis performed with data collected in 2015. The median expected limit, Z-value and uncertainty in the signal modifier $\mu_r = \sigma_{HH}/\sigma_{SMHH}$ are provided assuming S2 scenario on the systematic uncertainties and a scenario without systematic uncertainties shown to assess their impact (Stat. Only). For $gg \rightarrow HH \rightarrow \gamma\gamma bb$ we use S2+ scenarios and we include the single Higgs contribution to the background.

HH

Channel	Median expected limits in μ_r		Z-value		Uncertainty as fraction of $\mu_r = 1$	
	ECFA16 S2	Stat. Only	ECFA16 S2	Stat. Only	ECFA16 S2	Stat. Only
$gg \rightarrow HH \rightarrow \gamma\gamma bb$ (S2+)	1.44	1.37	1.43	1.47	0.72	0.71
$gg \rightarrow HH \rightarrow \tau\tau bb$	5.2	3.9	0.39	0.53	2.6	1.9
$gg \rightarrow HH \rightarrow VV bb$	4.8	4.6	0.45	0.47	2.4	2.3
$gg \rightarrow HH \rightarrow bbbb$	7.0	2.9	0.39	0.67	2.5	1.5

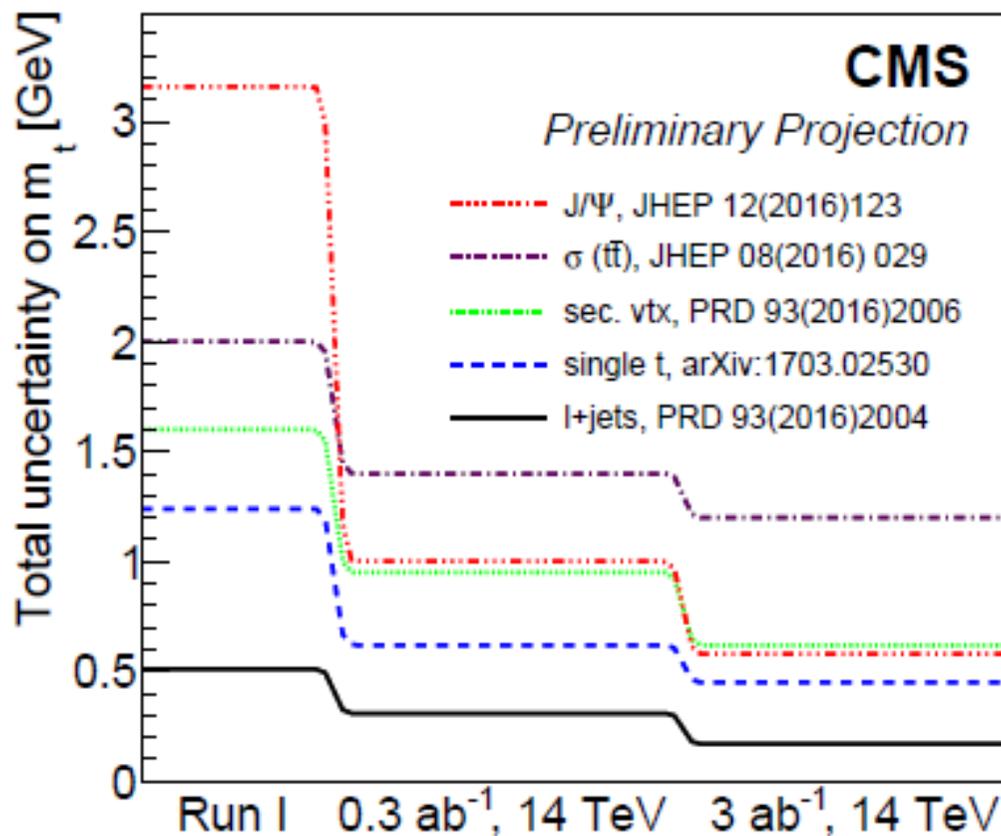
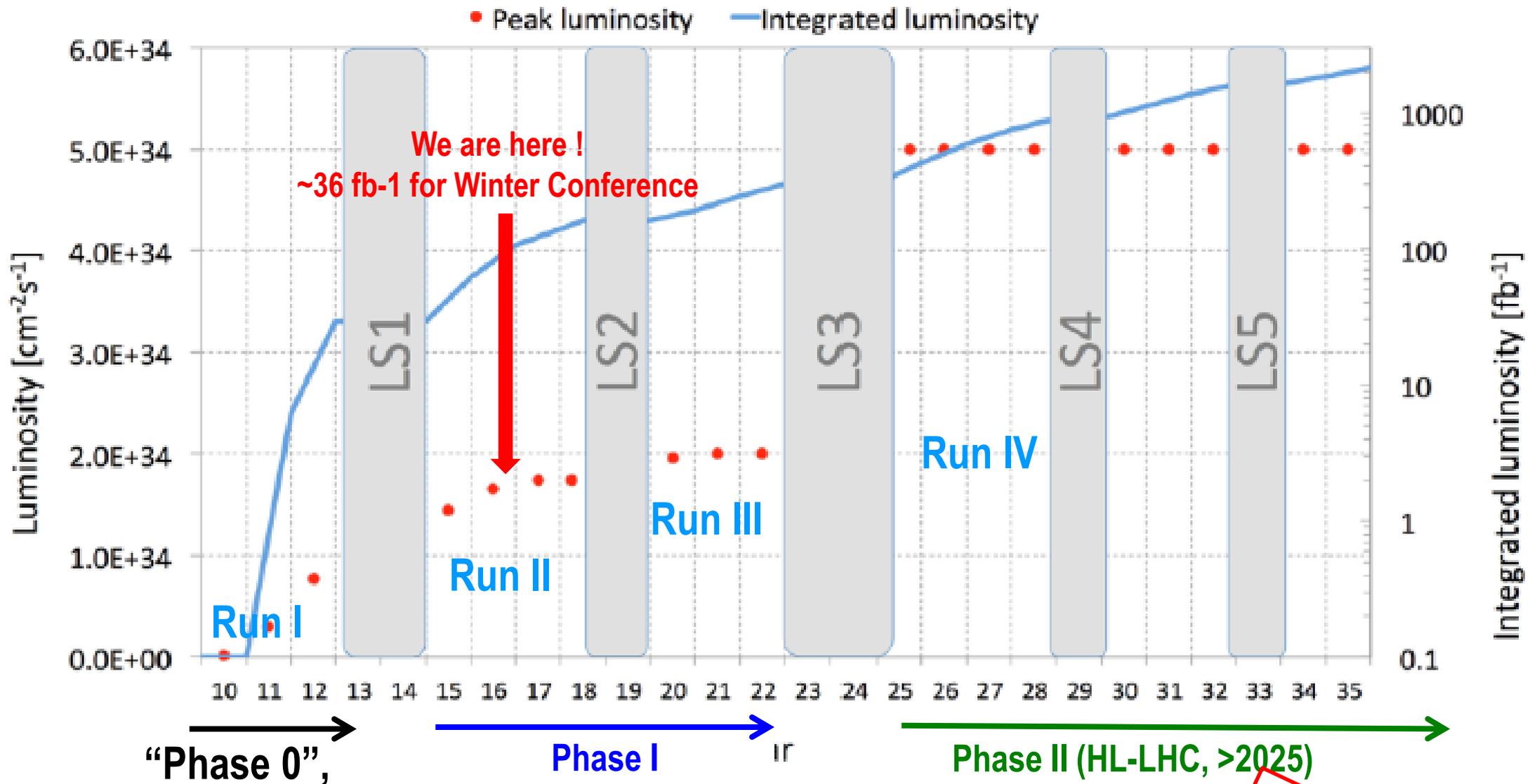


Figure 1: Total uncertainty on top quark mass (m_t) obtained with different measurement methods and their projections to the HL-LHC for running conditions foreseen after the phase II upgrade. The projections for $\sqrt{s} = 14$ TeV, with 0.3 ab^{-1} or 3 ab^{-1} of data, are based on m_t measurements performed at the LHC Run-1, assuming that an upgraded detector will maintain the same physics performance despite a severe pileup.

Compléments : Généralités sur HGCAL

LHC: from Run I to HL-LHC



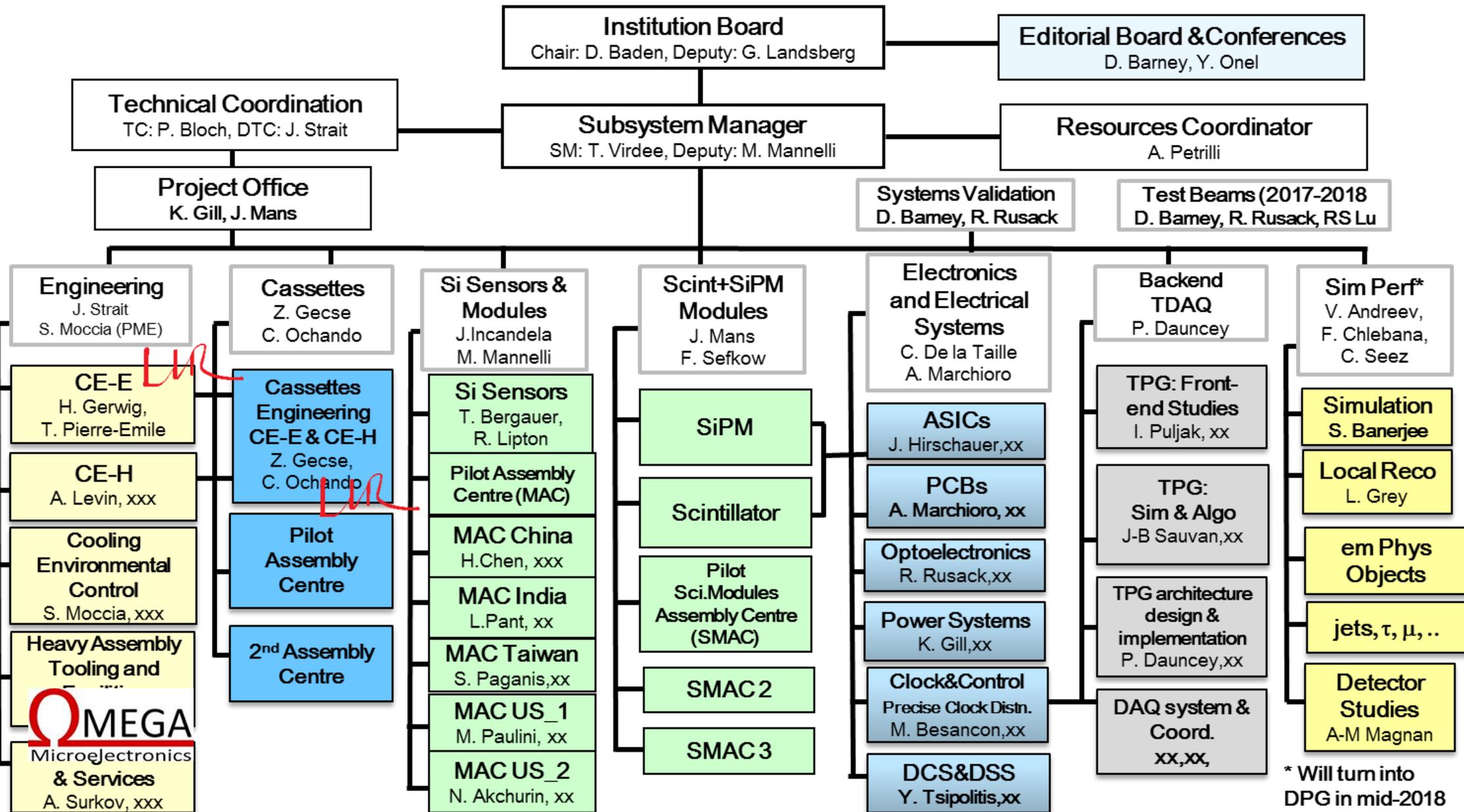
$\sqrt{s} = 7-8 \text{ TeV}$
 $\int L dt = 25 \text{ fb}^{-1}$
Higgs boson discovery !

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
 Lumi inst. : up to $2.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,
 $\int L dt = 300-500 \text{ fb}^{-1}$
 $\langle \text{PU} \rangle$: from ~ 25 to 60
X(750) ? SUSY ? ☺

$\sqrt{s} = 13-14 \text{ TeV}$
 Lumi inst. : $\geq 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,
 $\int L dt : 3000 \text{ fb}^{-1}$
 $\langle \text{PU} \rangle : \sim 140-200$

Well beyond design !

HGCAL Organization chart (preliminary proposal)

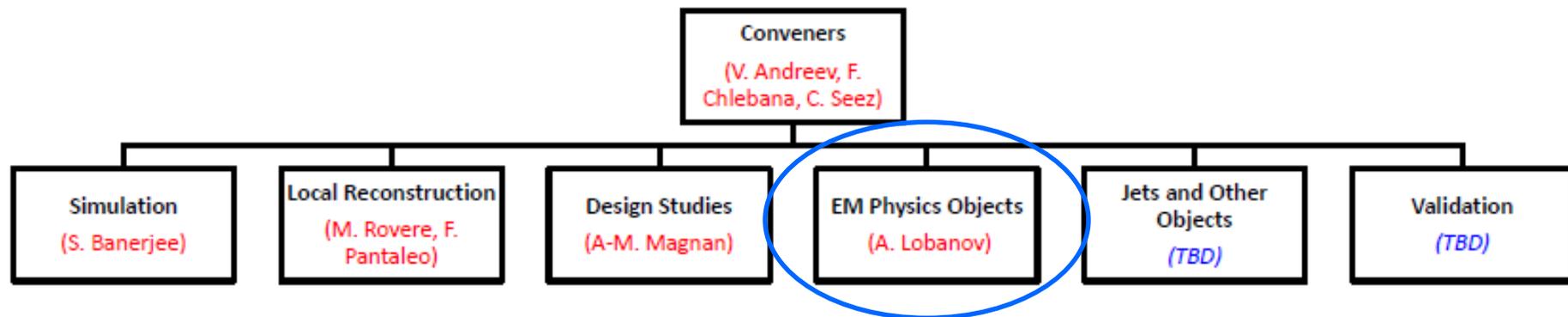


Org Chart / Contacts / Ongoing Studies

We plan to keep the current organization structure up until the TDR

The structure is appropriate to get the performance results

We are discussing how the organization will evolve after the TDR (DPG-like)



Contacts

MC Samples: A. Psallidas

Software Tools and Documentation: C. Lange

Validation: S. Banerjee, K. Mandal

Ongoing studies

Muon ID: V. Andreev, I. Gorbunov, L. Malgeri

Precision Timing: S. Bhattacharya, L. Grey, A. Martelli

MIP Calibration: A-M. Magnan

HGC Parameters

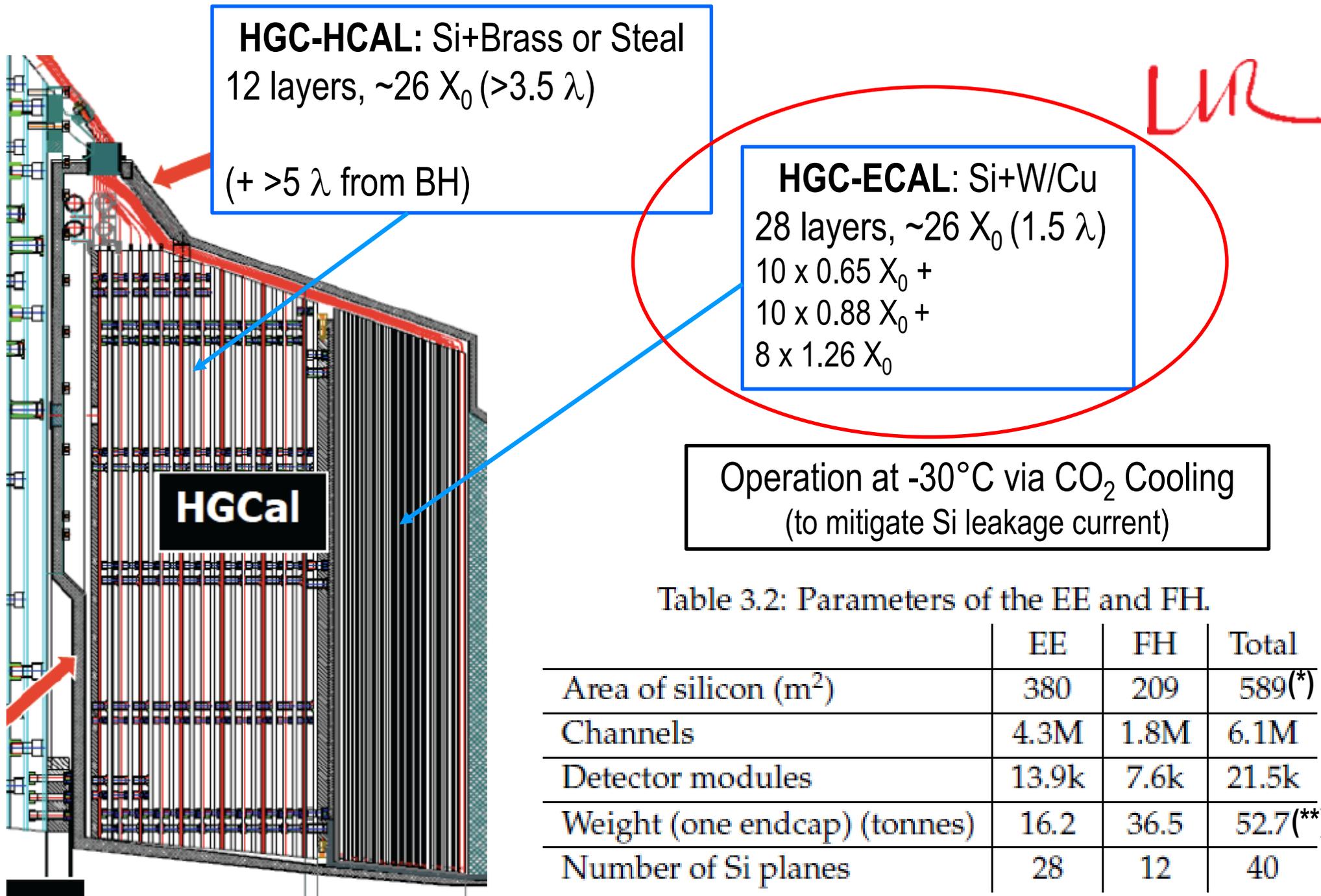


Table 3.2: Parameters of the EE and FH.

	EE	FH	Total
Area of silicon (m^2)	380	209	589 ^(*)
Channels	4.3M	1.8M	6.1M
Detector modules	13.9k	7.6k	21.5k
Weight (one endcap) (tonnes)	16.2	36.5	52.7 ^(**)
Number of Si planes	28	12	40

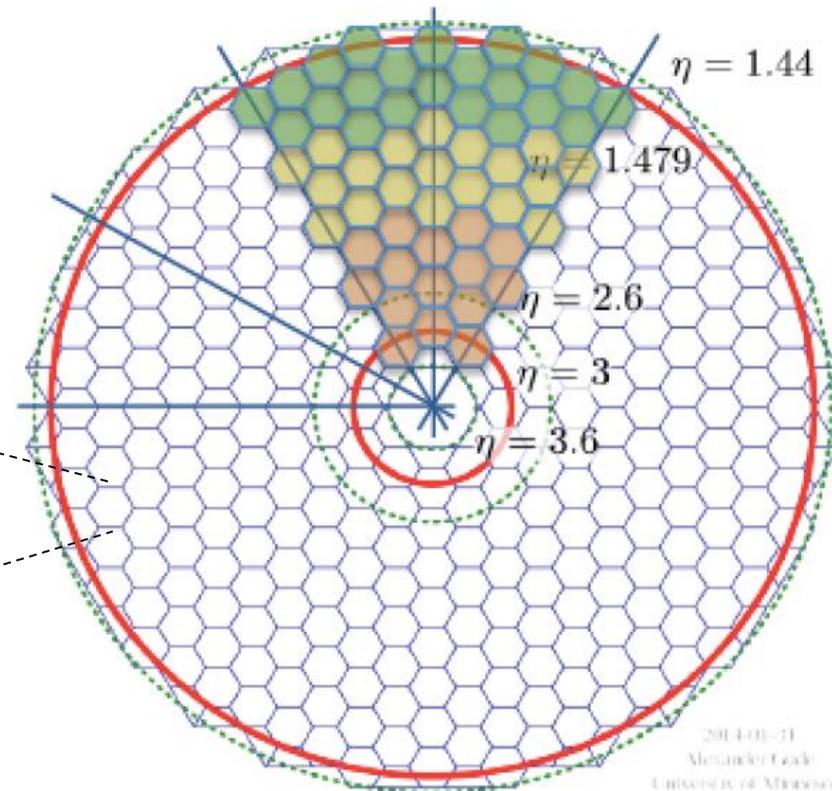
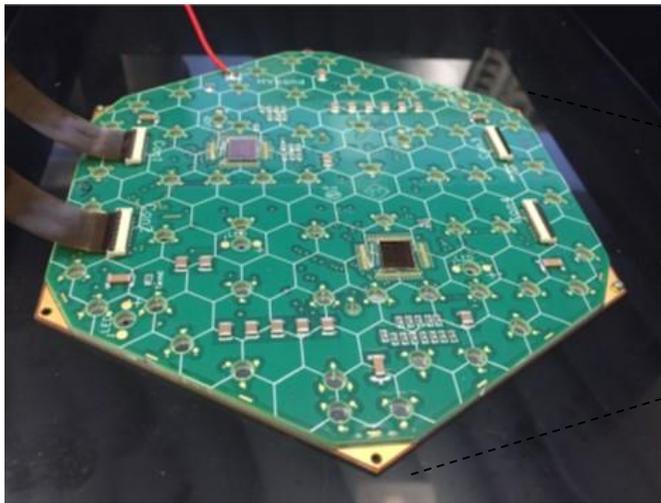
(*) 3x CMS tracker !

(**) one HGC+BH endcap: ~ 230 tonnes

Modules, Cassettes & Mechanics (Si & modules)

Modules

with 2x6 or 8" Hexagonal Si sensors,
PCB, FE chip, on W/Cu baseplate



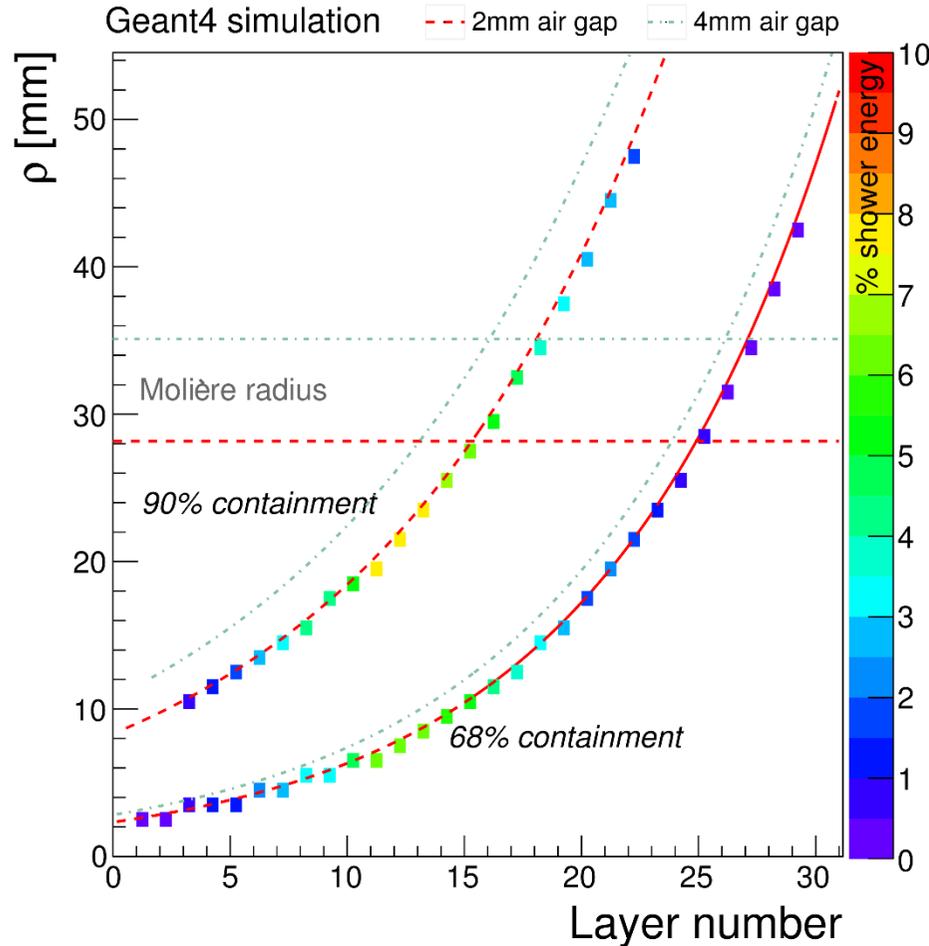
To cope the irradiation / PU:

- η -dependent depletion of Si
- η -dependent cell size

Thickness	300 μm	200 μm	100 μm
Maximum dose (Mrad)	3	20	100
Maximum n fluence (cm^{-2})	6×10^{14}	2.5×10^{15}	1×10^{16}
EE region	$R > 120 \text{ cm}$	$120 > R > 75 \text{ cm}$	$R < 75 \text{ cm}$
FH region	$R > 100 \text{ cm}$	$100 > R > 60 \text{ cm}$	$R < 60 \text{ cm}$
Si wafer area (m^2)	290	203	96
Cell size (cm^2)	1.05	1.05	0.53
Cell capacitance (pF)	40	60	60
Initial S/N for MIP	13.7	7.0	3.5
S/N after 3000 fb^{-1}	6.5	2.7	1.7

HGC Performance

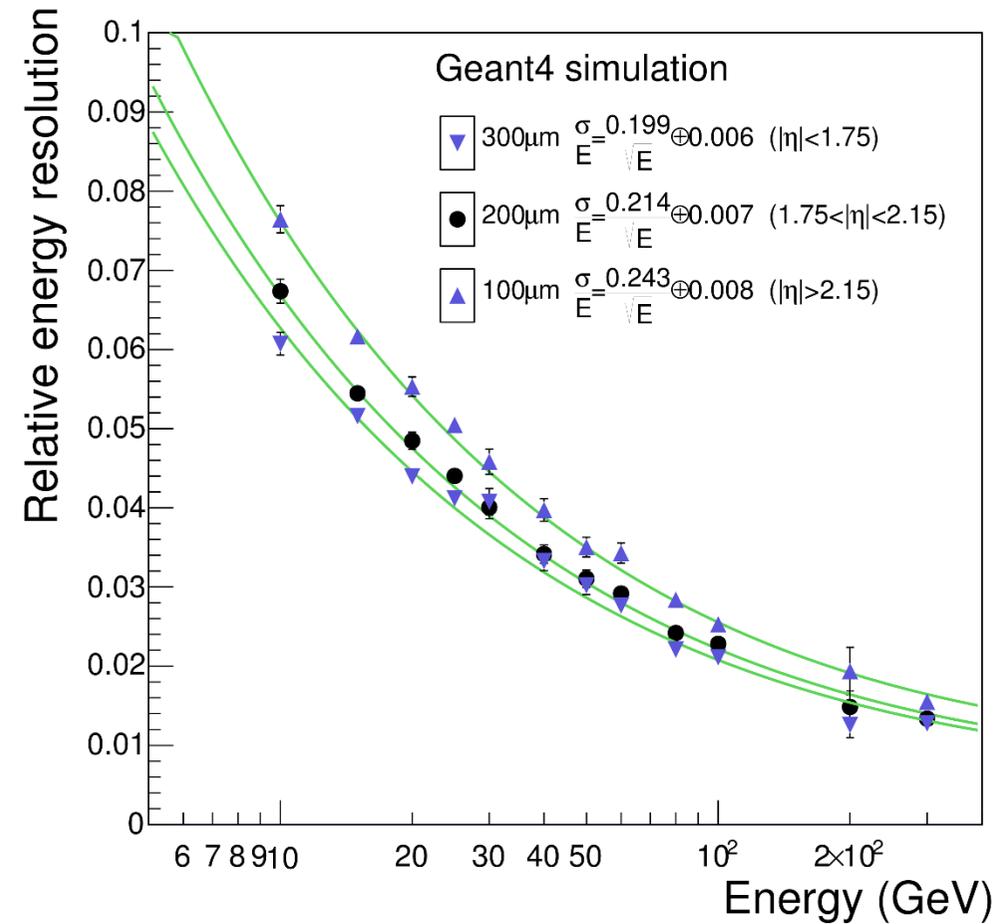
EM shower energy containment



Shower radius quite small in first layers.

Can use **longitudinal segmentation for PU rejection, ...**

Electron energy resolution vs Si thickness



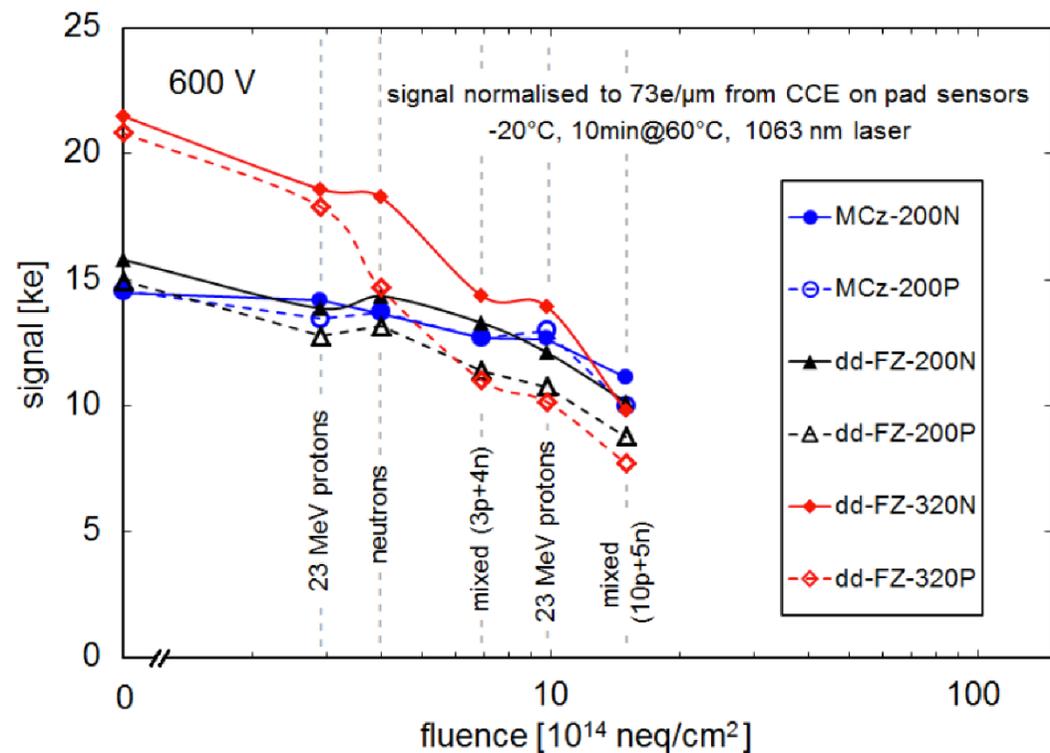
Stochastic term: ~20%

but **low constant term** (target: 1%)

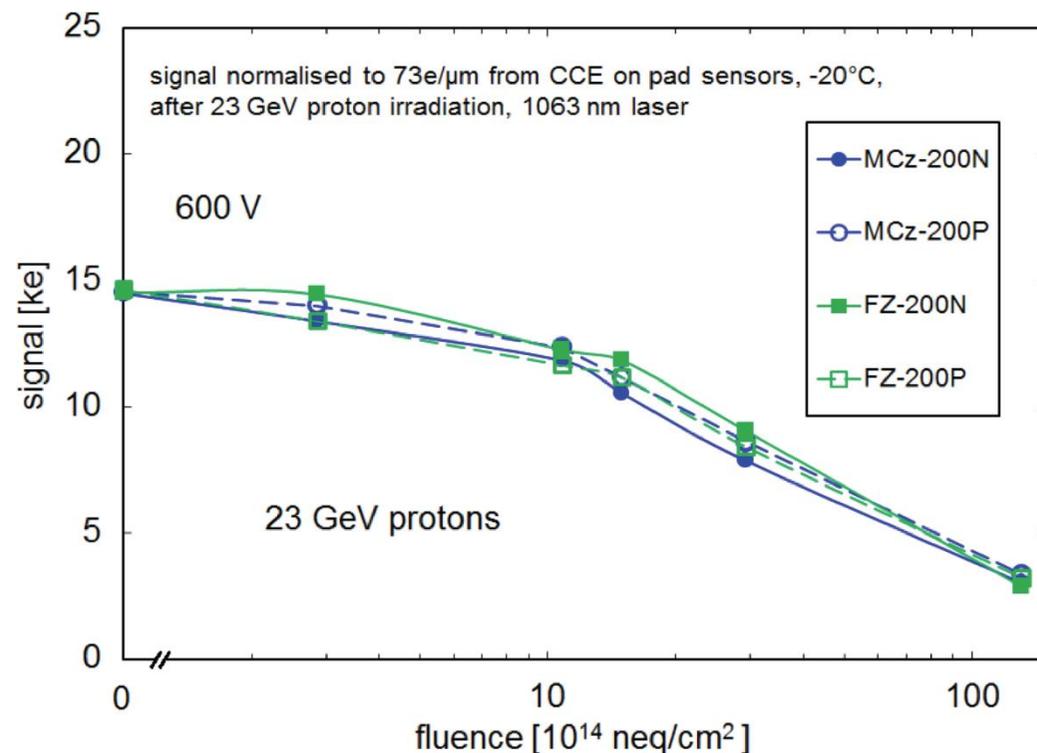
Radiation Tolerance (1)

Charge collection vs neutron fluence

300 & 200 μm active thickness

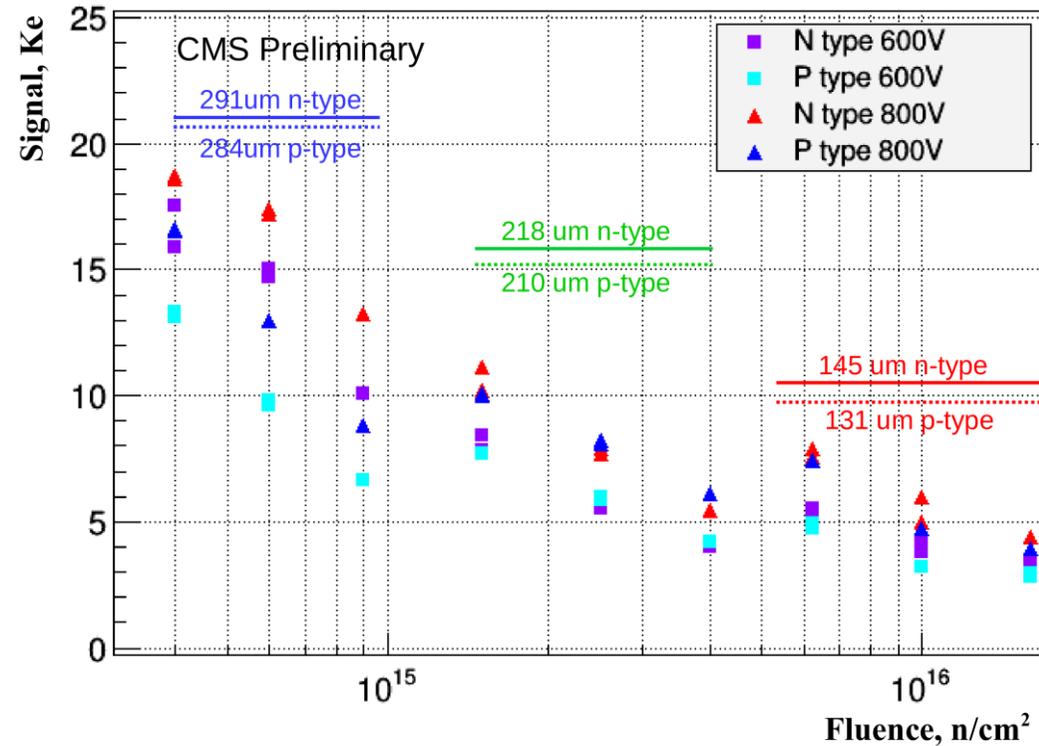


200 μm active thickness, p-in-n vs n-in-p

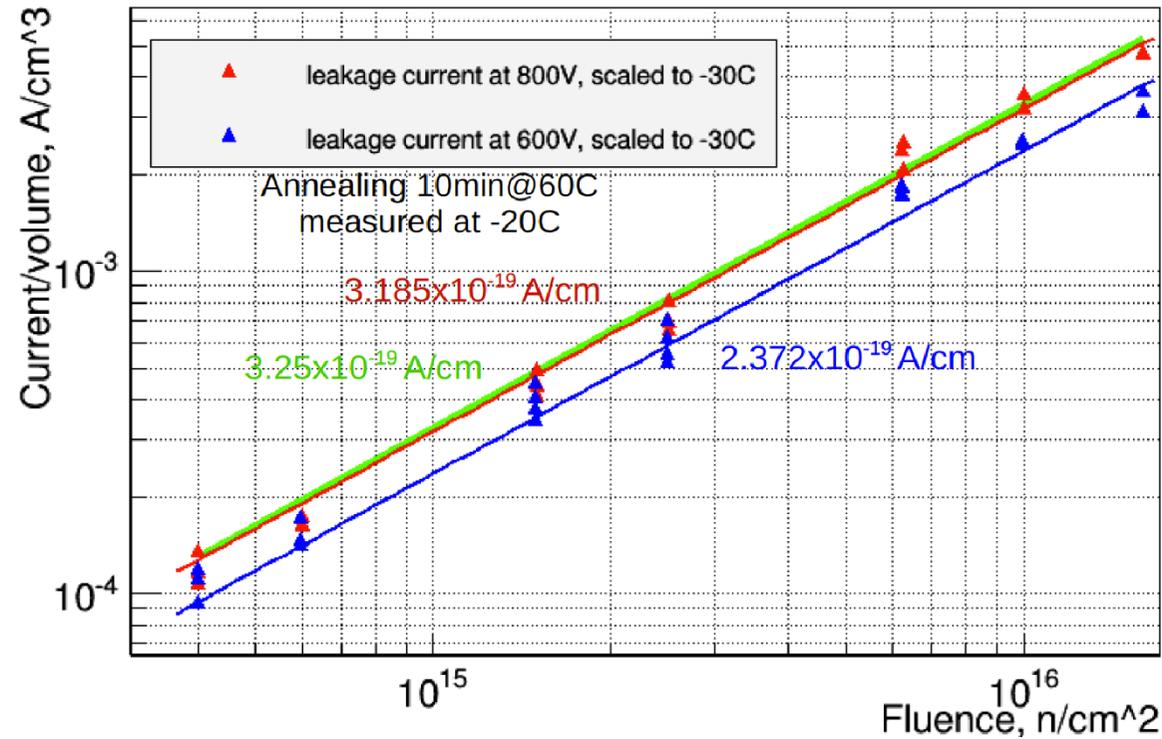


Radiation tolerance (2)

Neutron irradiation



Charge collection efficiency



Leakage current vs fluence at -20°
(extrapolated to -30°)

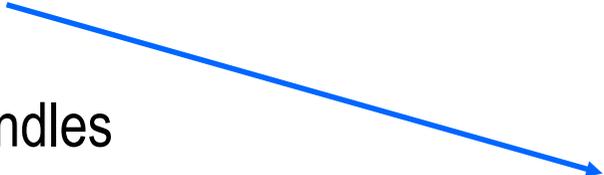
Draft paper in preparation

HGC Calibration

➤ Calibration requires:

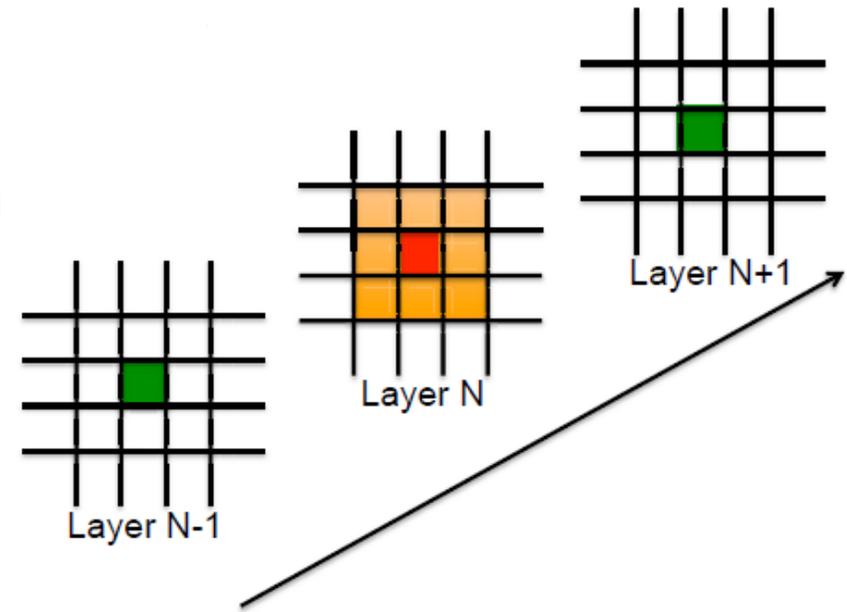
- Inter-calibration (cell-by-cell response equalization)  **With MIPs
+ specialized cells**
 - Objective: Constant term smaller than 1%
⇔ 3% precision for IC (results in <0.5% constant term)

- Cells weights taking into account absorber thickness
 - W plates: thickness contained within +/- 40 μm
 - W/Cu plates: thickness contained within +/- 50 μm
 - Si wafer: thickness contained within +/- 5 μm
 - Diffusion depth of all pads (within a wafer):
+/- 3 μm of the average of the wafer

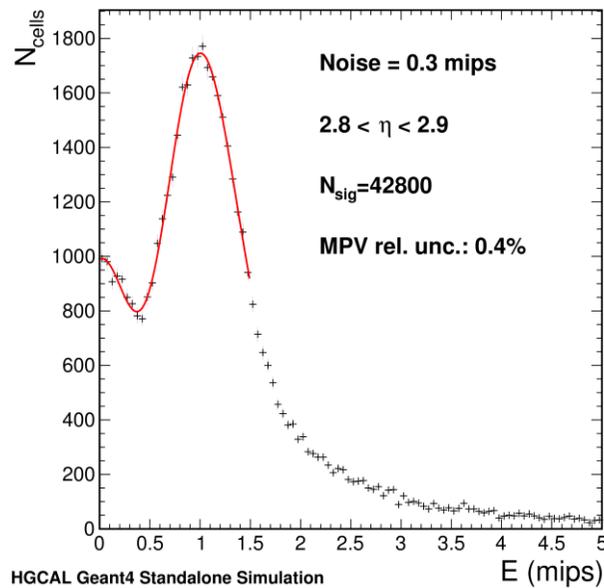
- Response Linearity, Monitoring 
- Absolute scale with standard candles  **Charge injection**

HGC calibration: inter-calibration with MIP tracking

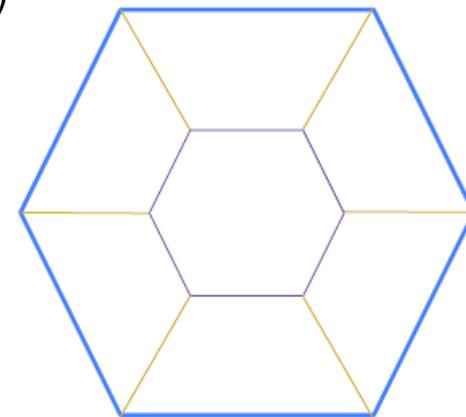
- **“MIP” Tracking (“punch through”)**
 - Require signal in layer before/after + isolation
 - Can be done on any readout (L1, offline)



- Tested in MC minimum-biased sample with $\langle N_{pU} \rangle = 140$
- Need 1.5M events to reach 3% precision (takes ~ 1 day)

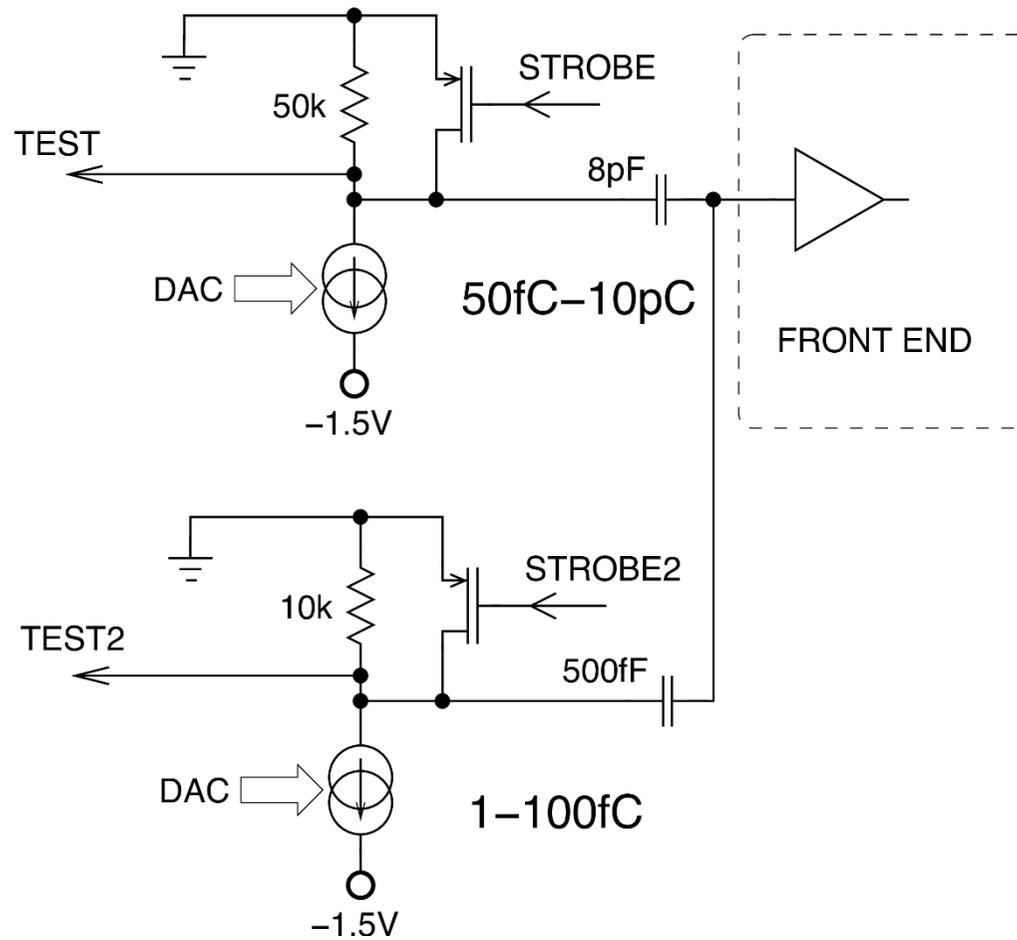


- **In addition, for redundancy:**
 - Low-capacitance/low-noise cell included in each wafer for calibration:
 - 7 sub-cells subscribed inside a standard hexagonal cell (large S/N)



HGC Calibration: linearity, monitoring

- Electronic chain of each channel:
 - linearized, monitored with charge injection system (chopper circuit, fixed calibration capacitances connected to FE)



Electronics calibration circuit.

Two sections with overlapping ranges (one for small, 1-100 fC, one for large signals)

Compléments : Financement, Manpower

Financement demandé TGIR

2017-2026	Sous-détecteur	Core (M€)	Non-core (M€)	CDD (M€)	Aléas (M€)	Total (M€)
CMS	Calorimètre HGAL	4,729	1,760	0,770	0,330	7,588
	Trajectographe	5,169	1,925	1,870	0,330	9,293
	Muons RPC	0,550	0,165	0,440	0,110	1,265
	Fonds Communs	0,880	0,000	0,000	0,000	0,880
	Total CMS=	11,328	3,849	3,079	0,770	19,026
R&D phase 2 (2017-2018)						0,850
Grand Total						19,876

Tableau 1 : Demande de financement pour la contribution du CNRS à la mise à niveau du détecteur CMS pour le HL-LHC sur la période 2017-2026.

Pour HGAL, cela comprend 5 années de physiciens post-doctorants et 6 années d'ingénieurs en CDD pour HGAL sur la période 2017-2026, dont à très court terme, pour l'électronique dorsale de déclenchement, un(e) ingénieur(e) électronicien(ne) en CDD au LLR qui se verra confier la réalisation de blocs fonctionnels algorithmiques en électronique numérique pouvant être intégrés dans des circuits intégrés spécifiques (ASIC) ou programmables (FPGA). Ces blocs décrits en langage HDL (Hardware Description Language), simulés et synthétisables, correspondent à des algorithmes de reconstruction à concevoir en collaboration avec des physiciens.

LLR Palaiseau – Ecole polytechnique (X) :

Physiciens permanents responsables:

Florian **Beaudette** (Reconstruction HGCAL et Flux de Particules), Christophe **Ochando** (HGCAL mécanique + général), Jean-Baptiste **Sauvan** (HGCAL Electronique DAQ et déclenchement), Yves **Sirois** (HGCAL Général)

Autres physiciens permanents participants à divers degrés:

Stéphanie **Baffioni** (Déclenchement HGCAL), Claude **Charlot** (Reconstruction HGCAL et perspectives de physique), Philippe **Busson** (Déclenchement HGCAL), Roberto **Salerno** (Reconstruction HGCAL et perspectives de physique), Alexandre **Zabi** (Déclenchement HGCAL et Tests en Faisceaux), Matthew **Nguyen** (Reconstruction HGCAL et Flux de Particules)

Post-doctorants :

Artur **Lobanov** (HGCAL Test d'électronique FE, Performances et tests en faisceaux), Giacomo **Ortona** (HGCAL Reconstruction et Trigger)

Doctorants :

Jonas **Rembser** (HGCAL déclenchement et primitives de déclenchement), Toni **Sculac** (HGCAL Test d'électronique FE) et Marina **Prvan** (HGCAL Trigger) - Co-tutelles X/FESB Split

Ingénieurs participants pour environ 4 FTE équivalents :

1.5 FTE pour la mécanique sur la durée du projet ;
1.5 FTE en électronique sur la durée du projet ;
1.5 FTE en informatique [calcul parallèle et trigger]

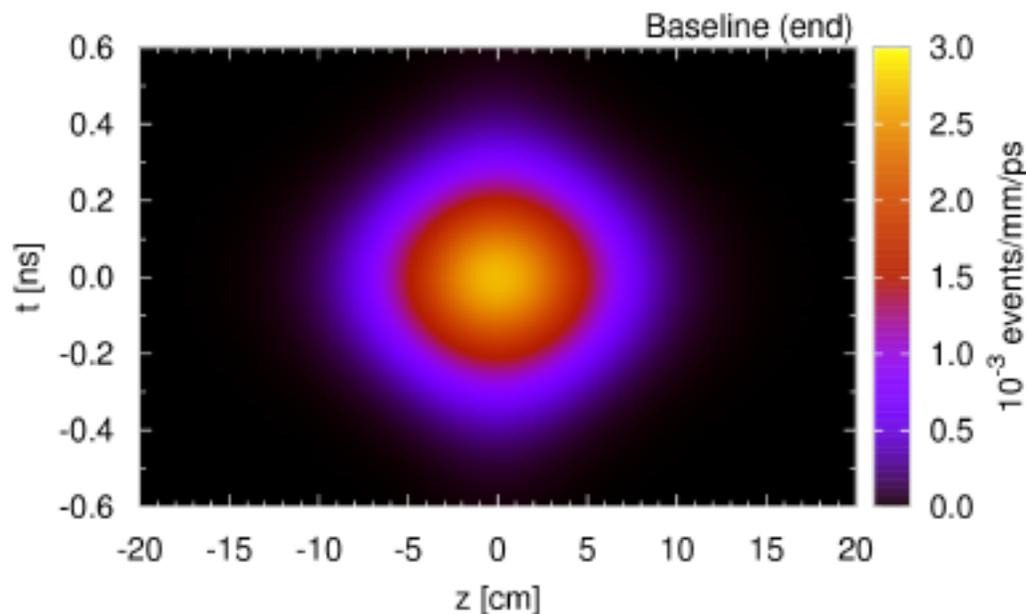
Compléments : Timing

What is needed? Precision timing

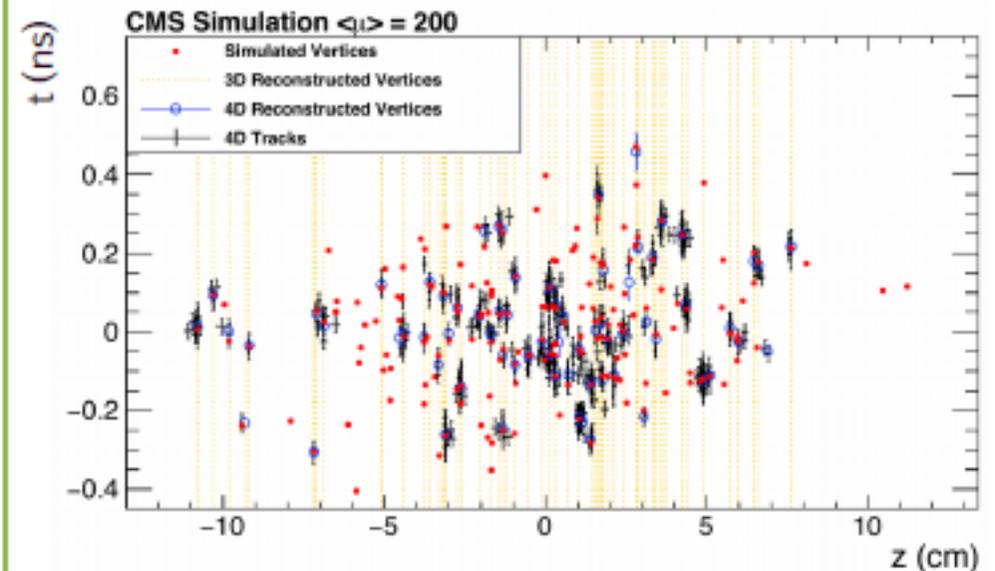
Interactions are spread over space and time
100 – 200 ps

Disentangle overlapping vertices with precise timing
Key resolution: 10–30 ps

Beam spot space-time profile



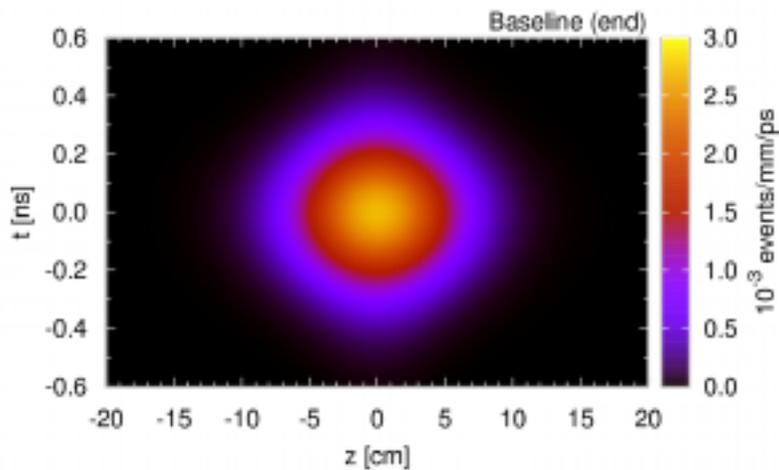
Space-time view of the vertices



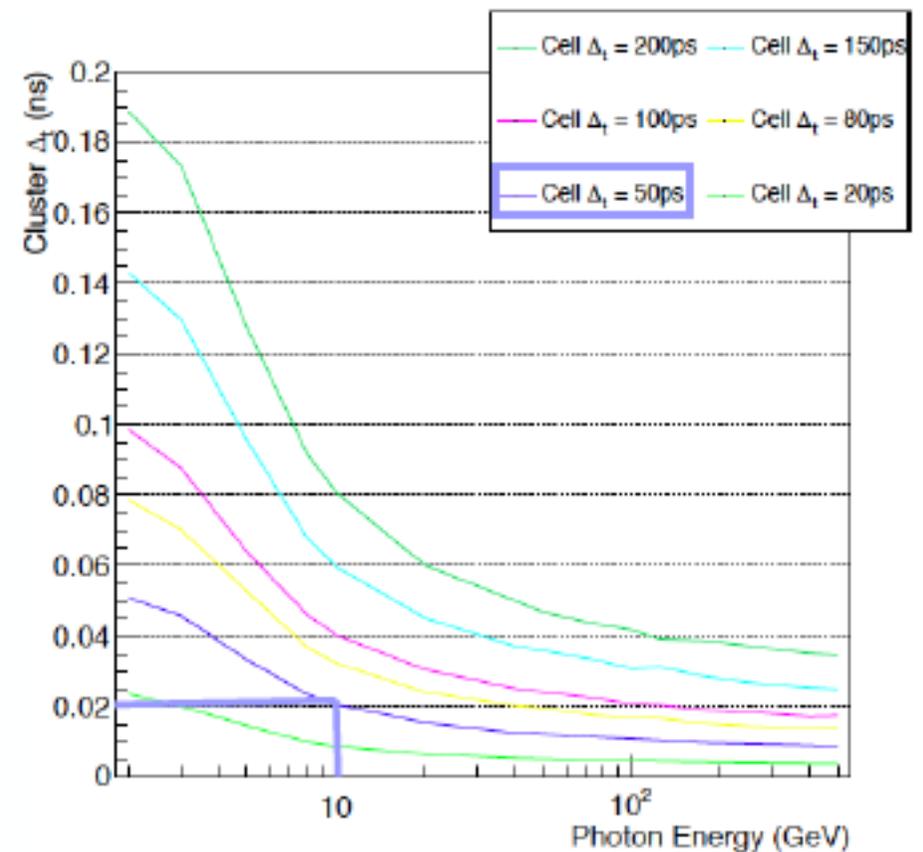
Collisions every 25 ns \rightarrow “out-of-time pile-up”
Fast detector response and fast shaping

Per cell $\Delta t = 50$ ps
 Cluster resolution: < 20 ps
 For energy > 10 GeV

HL-LHC: 160 ps wide crossing

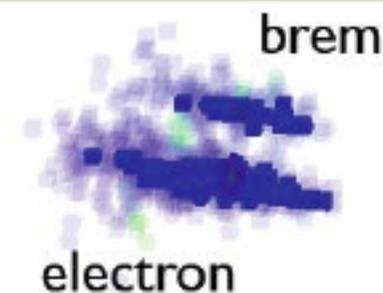


Cluster timing resolution vs energy



Can collect energy deposits
 within a 30 ps window
 Electron: Seed and brem photons
 Jets: reject PU particles

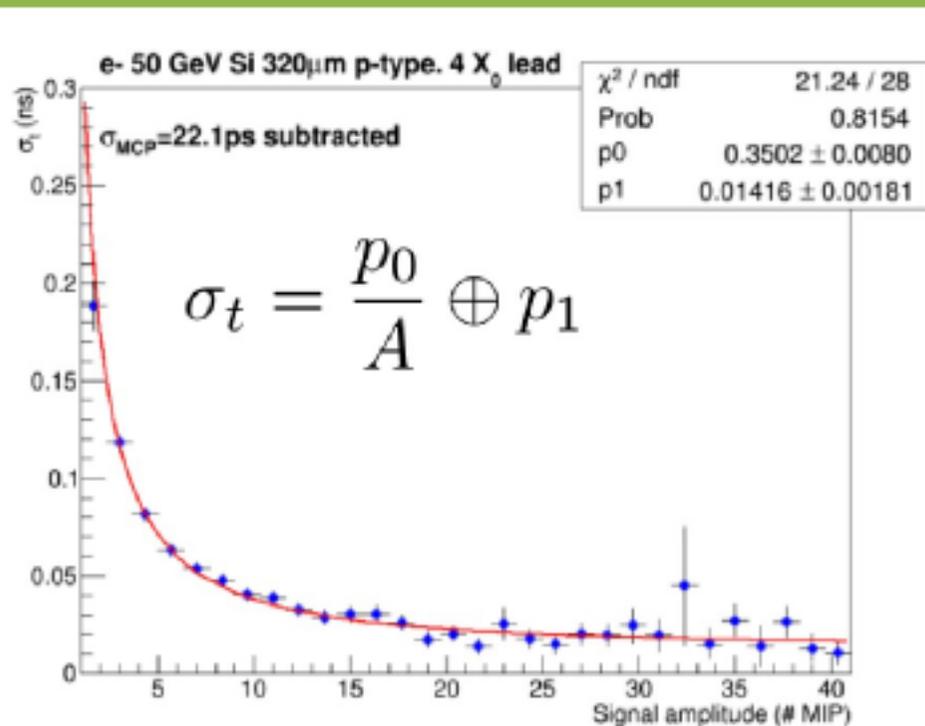
Electron with bremsstrahlung



Timing tests

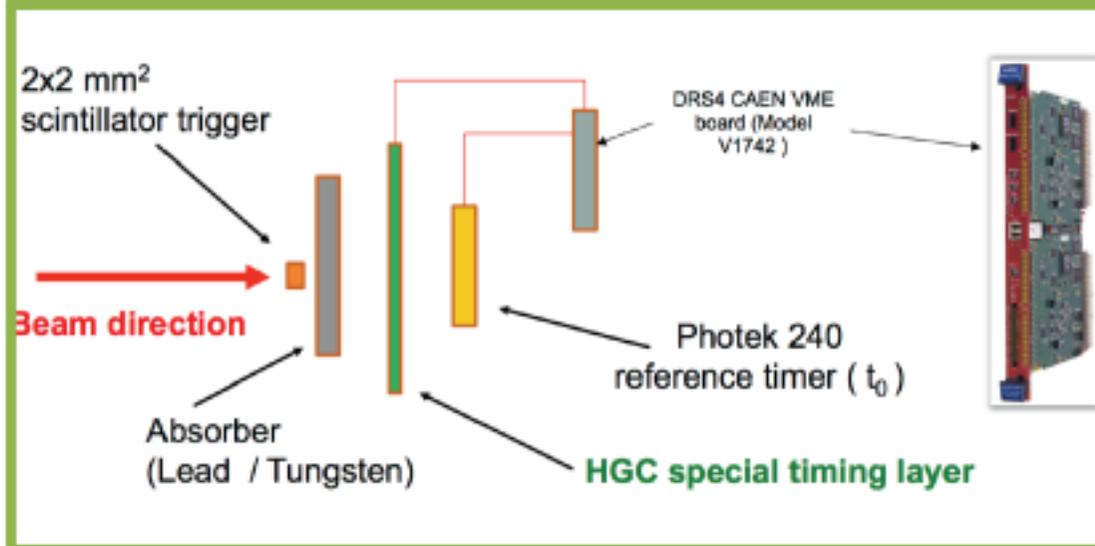
From Jean-Baptiste Sauvan (LLR)

Timing resolution vs amplitude

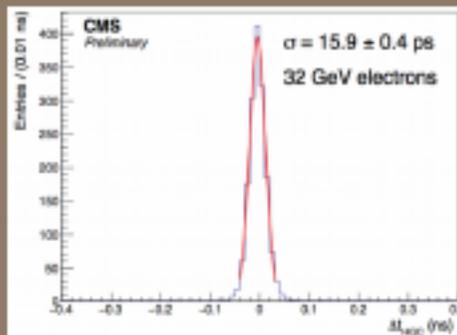


Time resolution improves with S/N
Constant term: 14 ps, for S > 20 mip

Timing test with special fast readout



Timing test with 300 μ m layer
Fast readout
16 ps for 32 GeV electrons

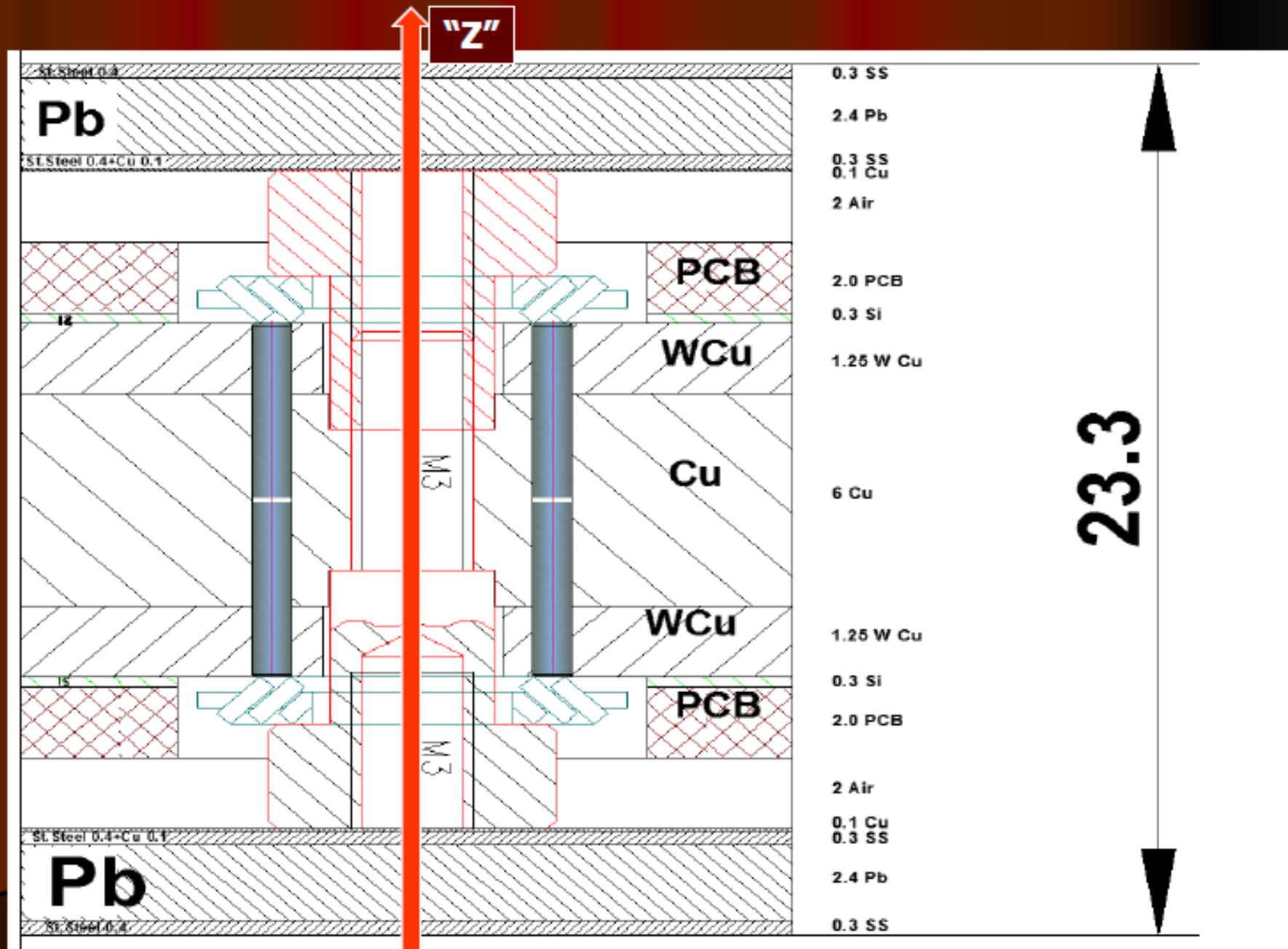


CERN beam tests in November 2016
Up to 250 GeV electrons
Analysis ongoing

Compléments : Mécanique

Disk & Spacer cassette

EE "Z" SEGMENTATION (ONE LAYER)



Disk & Spacer design

Modules attachment
elements & spacers (Scale 1:1)
EE layer N14

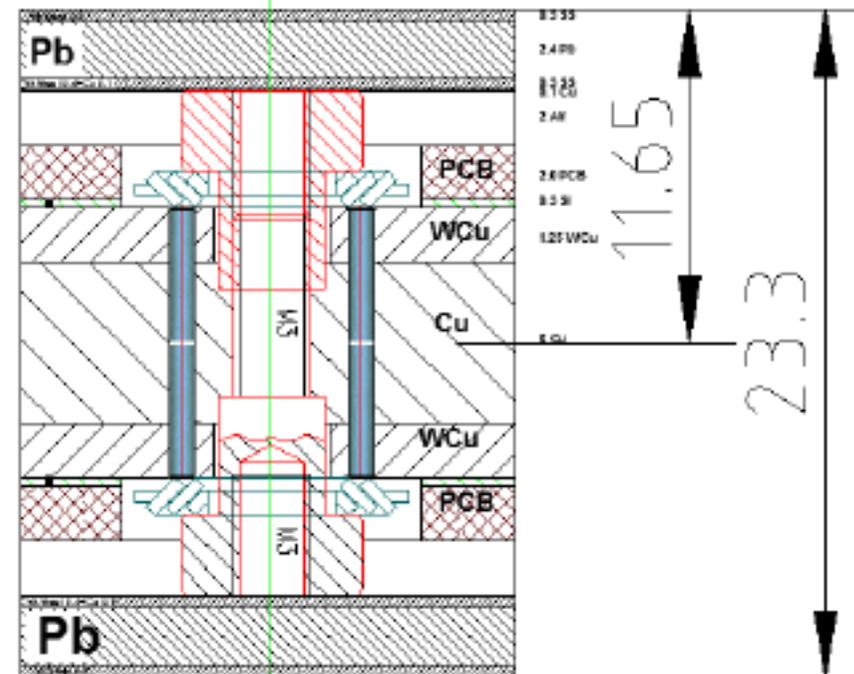
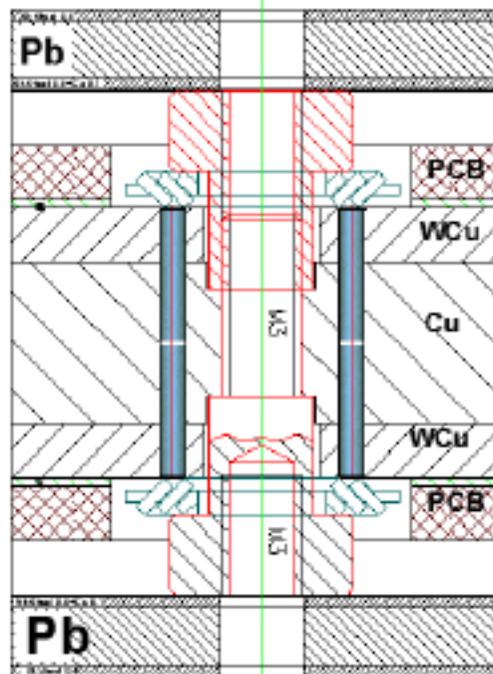
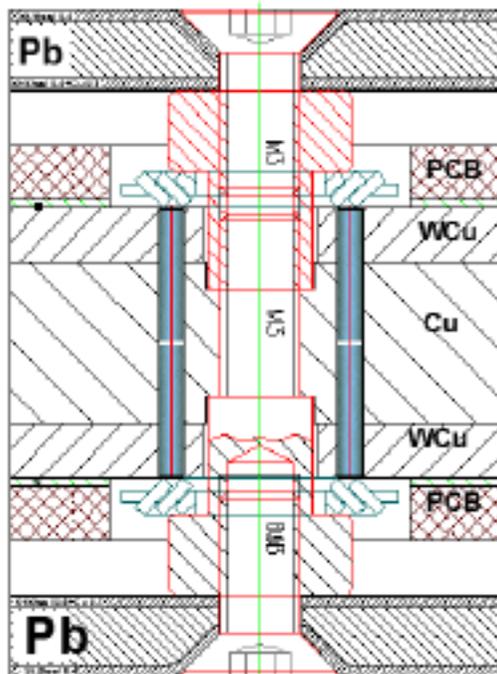
DRAFT

Cassettes cover fix
~12 pieces per 30°

Lifting points
11 pieces per 30°

Modules fix &
cover supports
~60 pieces per 30°

EE 14 layers:
 $23.3 \times 14 = 326.2 \text{mm}$



A.Surkov 30.09.2016

Compléments : Electronique

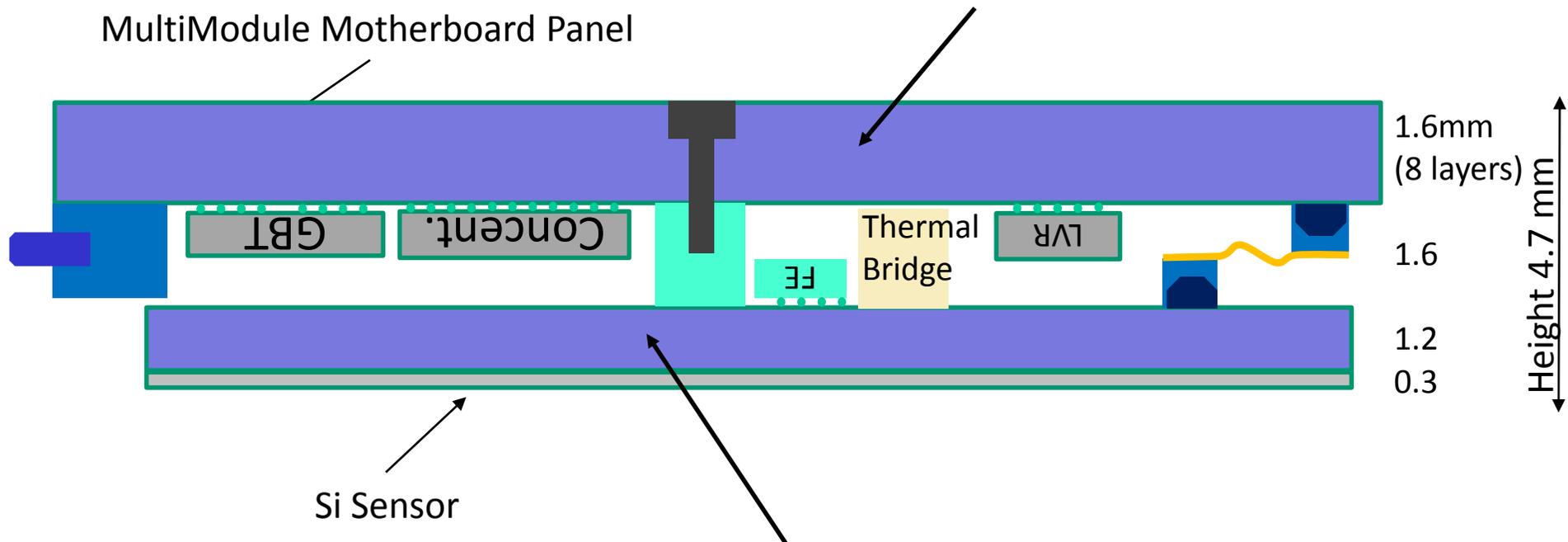
Electronics Architecture

- Evolution from the single PCB option from the TP

Two PCB layers architecture

MotherBoard-PCB

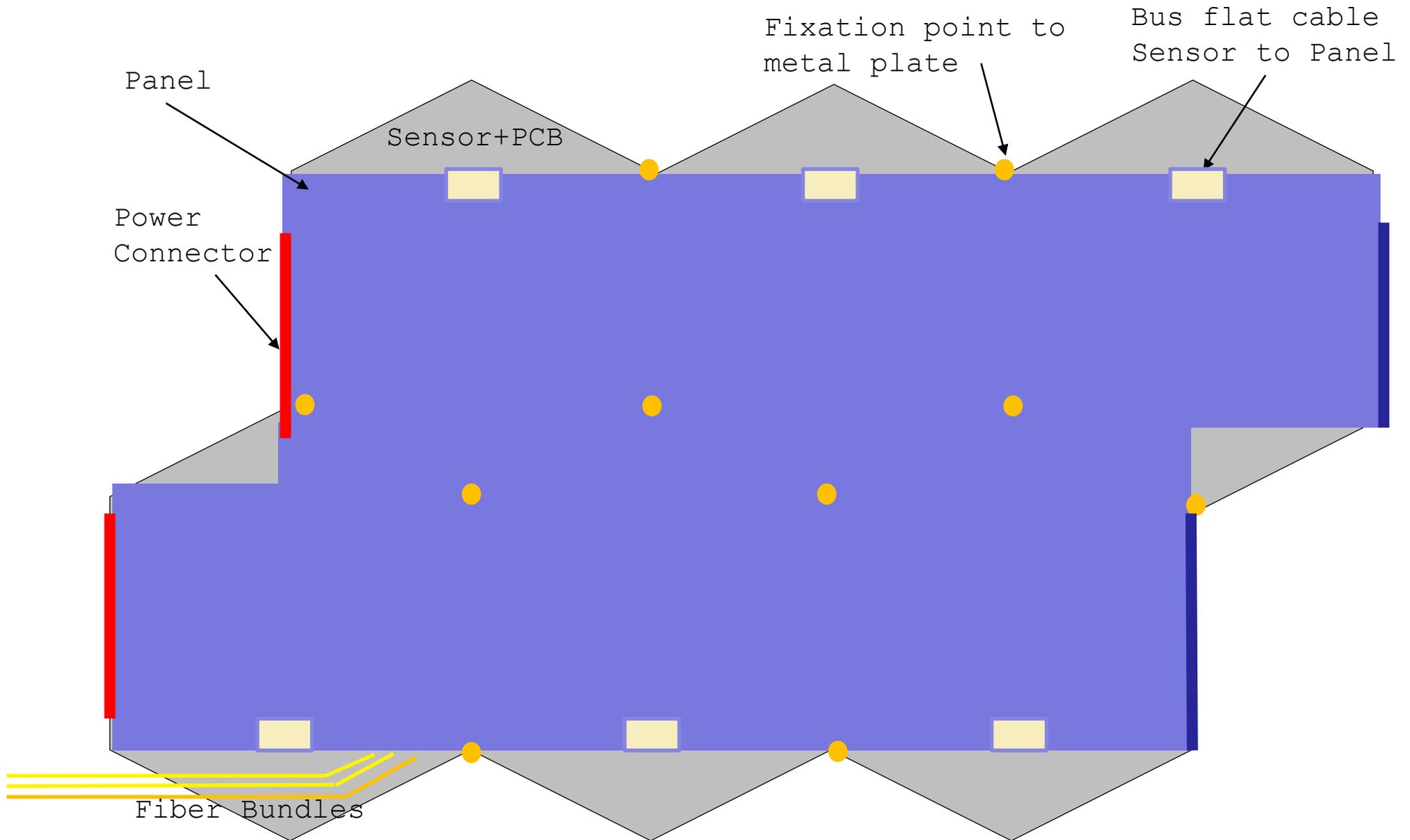
- Group sensors
- Contain all other components (LV, HV, trigger concentrator, services for clock, fast timing, slow control,...)
- Contains optical fibers for Trigger and data transmission



Sensor-PCB houses HGROC ASIC only

- Simple, robust, easily replaceable (during construction)

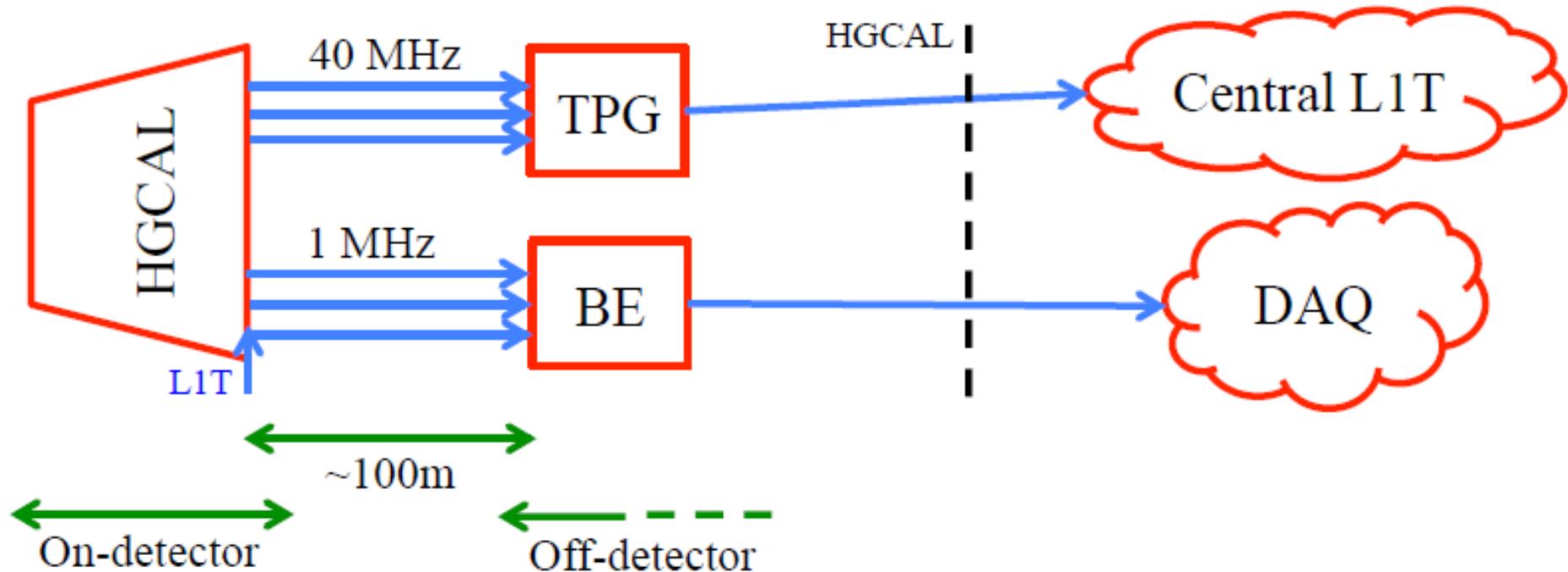
Motherboard panel top view



➤ Logical unit is now a **group of modules** (“multi-modules”) not single module anymore...

Compléments : Trigger

L1 Trigger



- All data sent off-detector on radiation tolerant links. **Challenges:**
 - Data volume: 1 Pb/s ! To be reduced by at least a factor 20...
 - Data volume -> Number of link (~8k for trigger) -> cost !
 - Huge Pile-Up: reduction of info <=> reduction of rejection power... Trade-off/Optimization to found.
- **The LLR (+Split) has been one of the main drivers of the HGCal L1 trigger project,**
 - Significant parts of the studies done for the Technical Proposal, feasibility studies
 - Software developments, firmware developments
 - Coordination activities
- ... and wants to remain a main actor !

**Strong collaboration
between LLR/Split**

Compléments : Test Beam

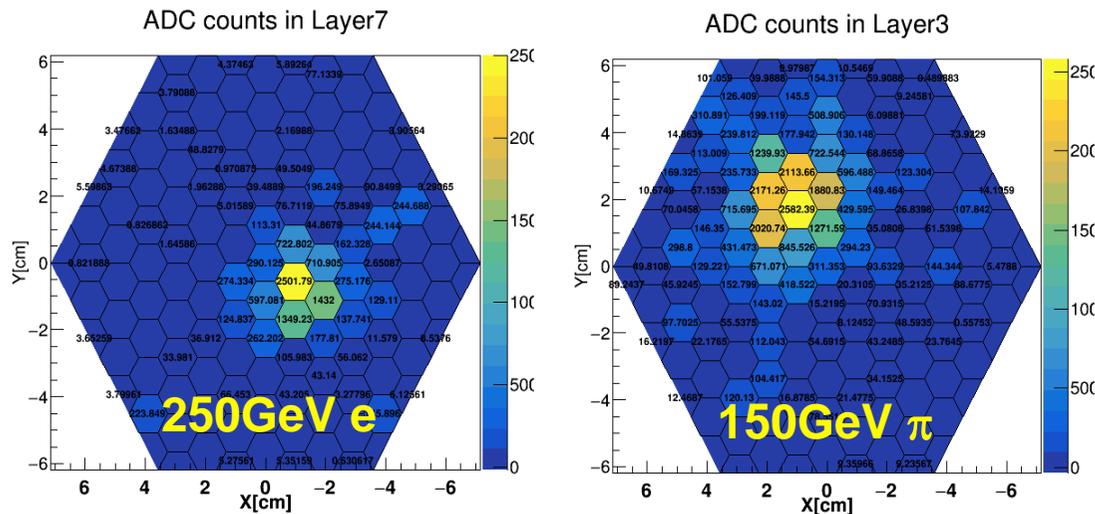
Highlights: Test beams 2016

Goals:

- Performance studies: S/N, timing, energy and positions resolutions
- Comparison with simulation

Several test beams campaign (FNAL, CERN)

- FNAL: 120 GeV protons, 4-32 GeV electrons/pions
- CERN: 125 GeV pions, 20-250 GeV electrons

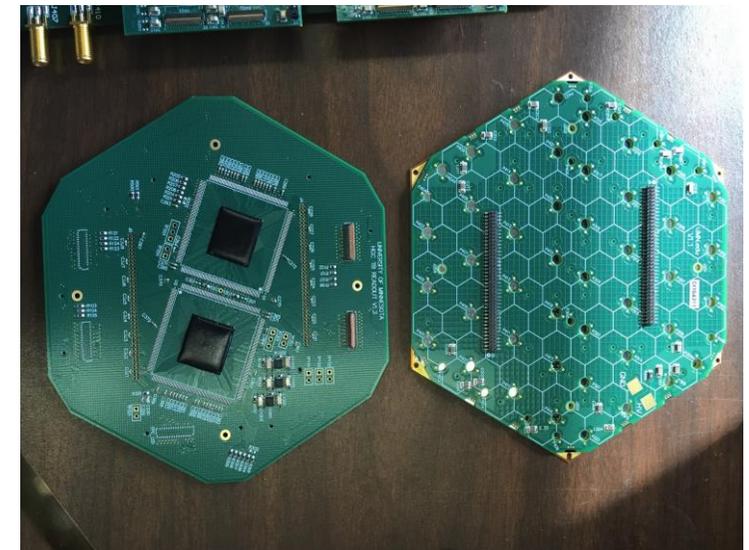


Laboratory	Layers	X_0	Date
FNAL	1	6	March 2016
FNAL	4	12	May 2016
FNAL	16	15	July 2016
CERN	8	27	Aug 2016

+ various timing tests
(next in November at CERN?)

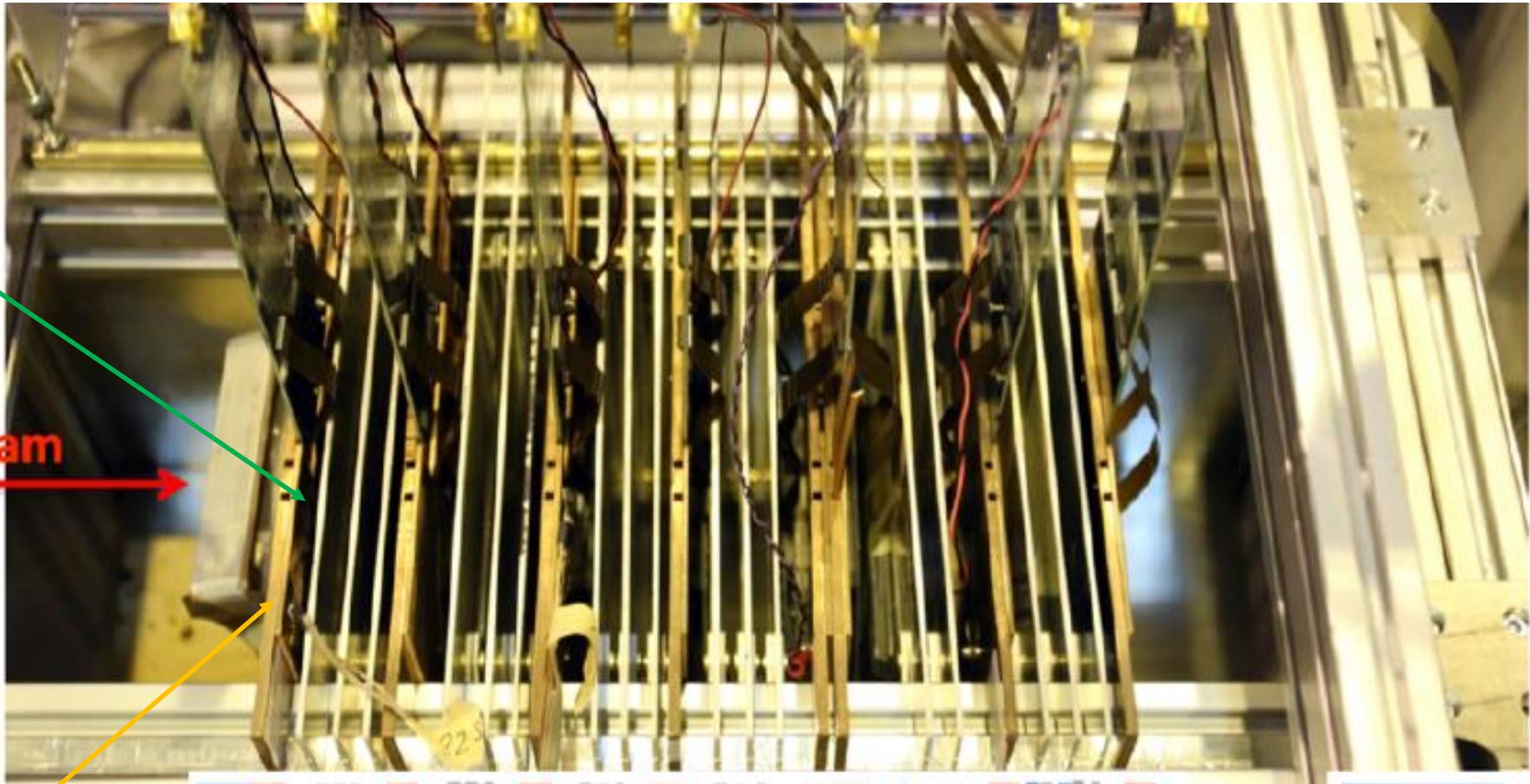
Common DAQ, Modules:

- 6" Si wafers, 200 μ m, p-on-n,
 - 1.1 cm² cells,
 - 2-layers PCB, SKIROC2 chip
- (single PCB version still at work...)
- All done in US
(UCSB, FNAL, ...)



Test Beams 2016: set up

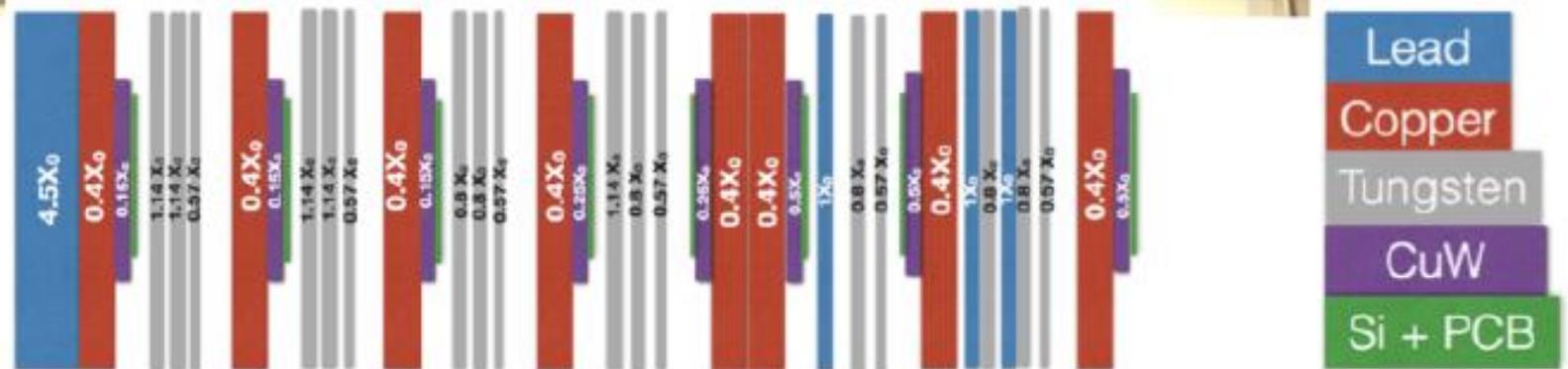
CERN (Similar at FNAL)



module

Beam

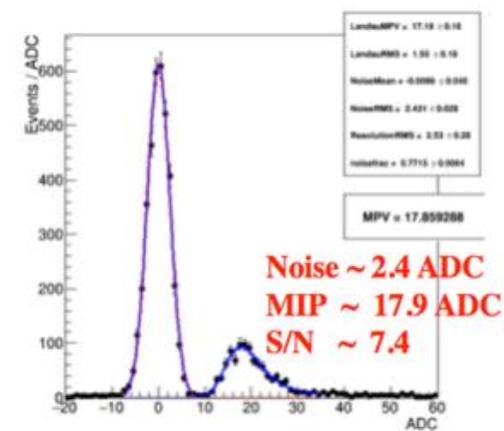
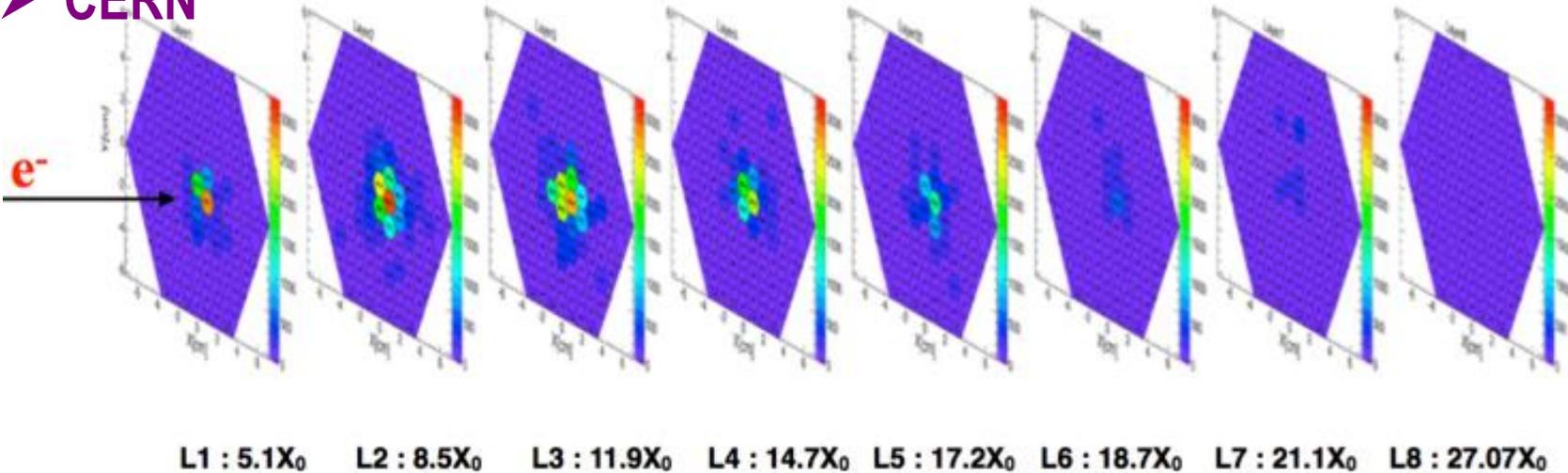
Cu cooling plate



Mechanical design allows flexible insertion of modules and absorbers plates

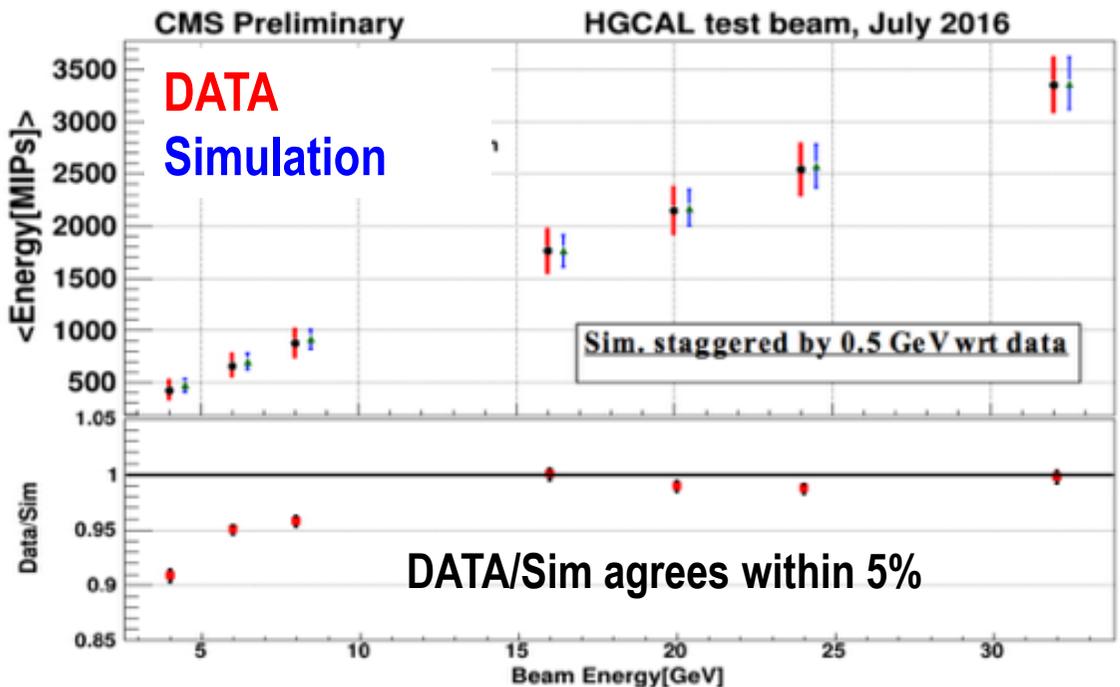
Test Beams 2016: (some) results

CERN

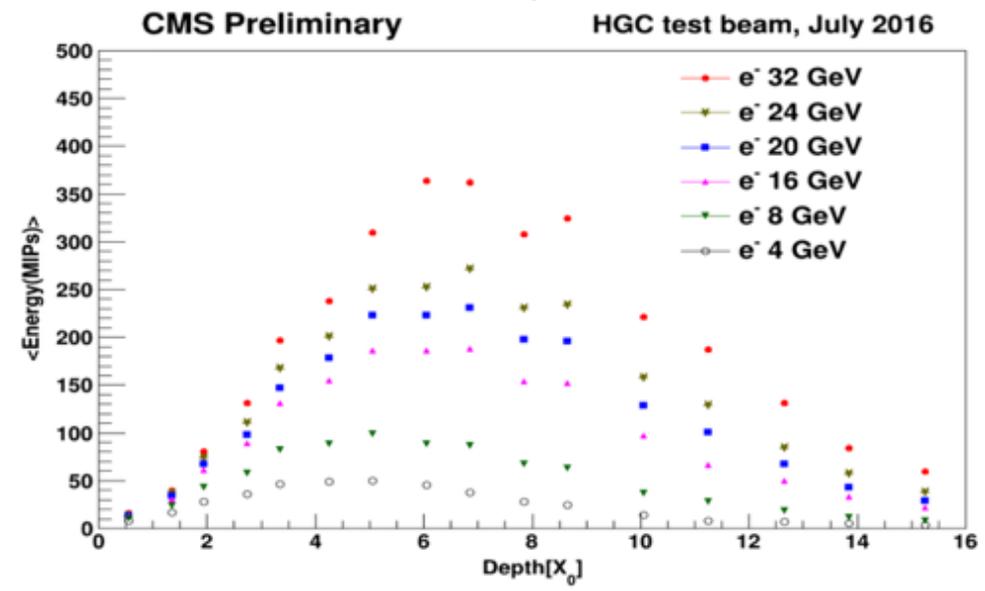


FNAL

Total energy deposited in all layers vs e- beam energy



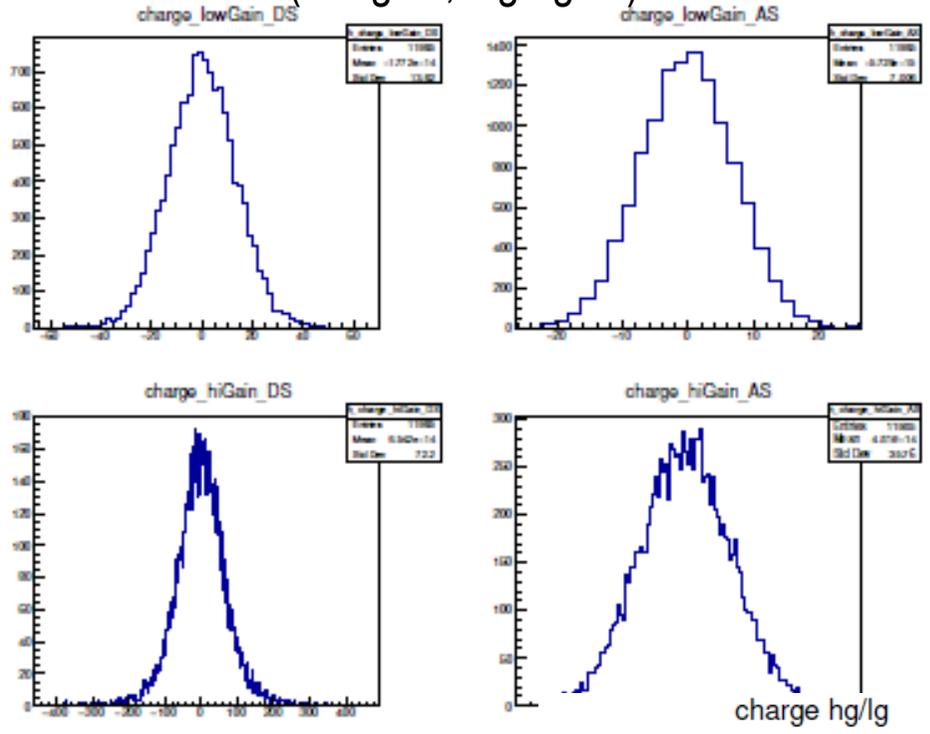
Energy deposited in each layer
Shower max moves to higher depth as expected



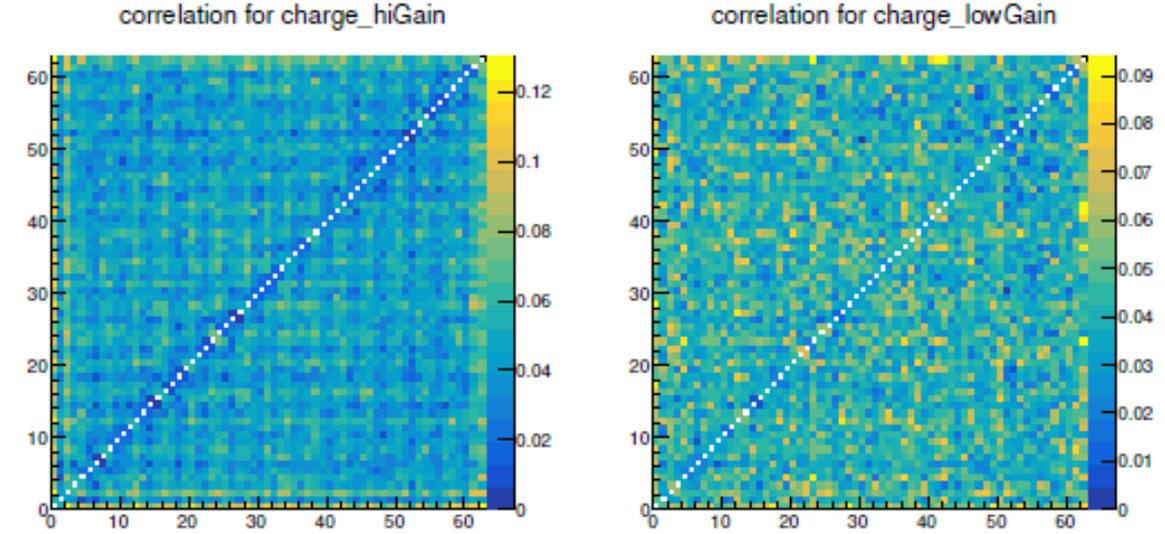
LLR will participate in ≥ 2017 tests (with help of P2IO project)

Battery of tests (in agreement with previous measurements from other groups)

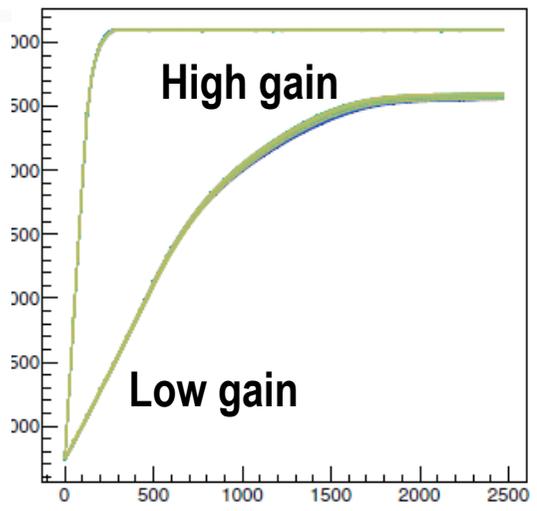
Noise: Direct sum of channels vs alternate sum (low gain, high gain)



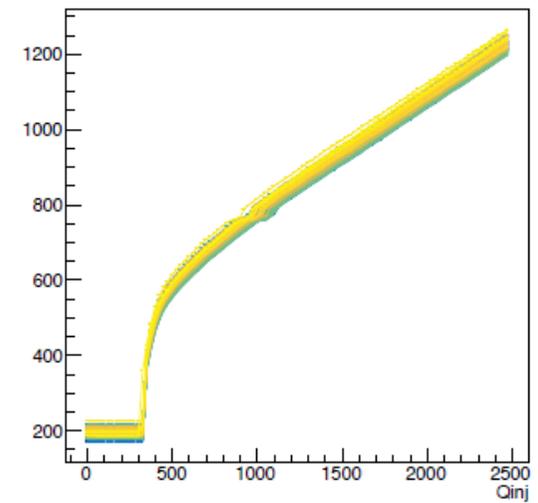
Noise (non-) correlation

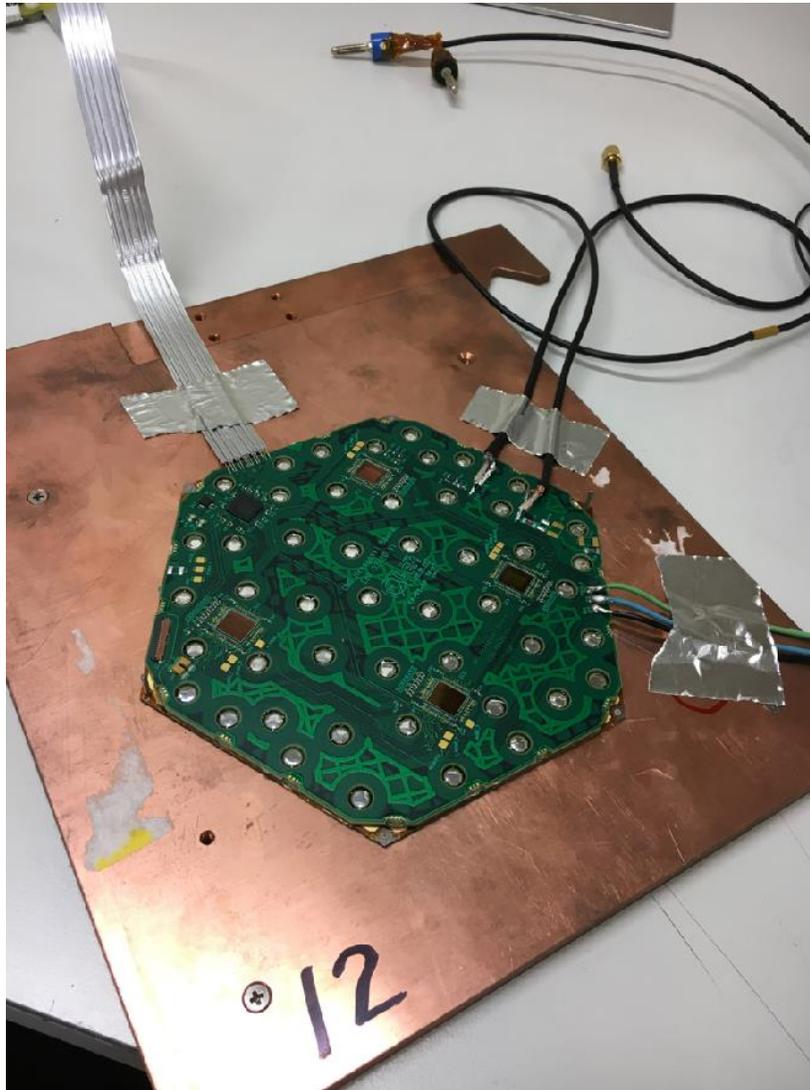


Charge injection:

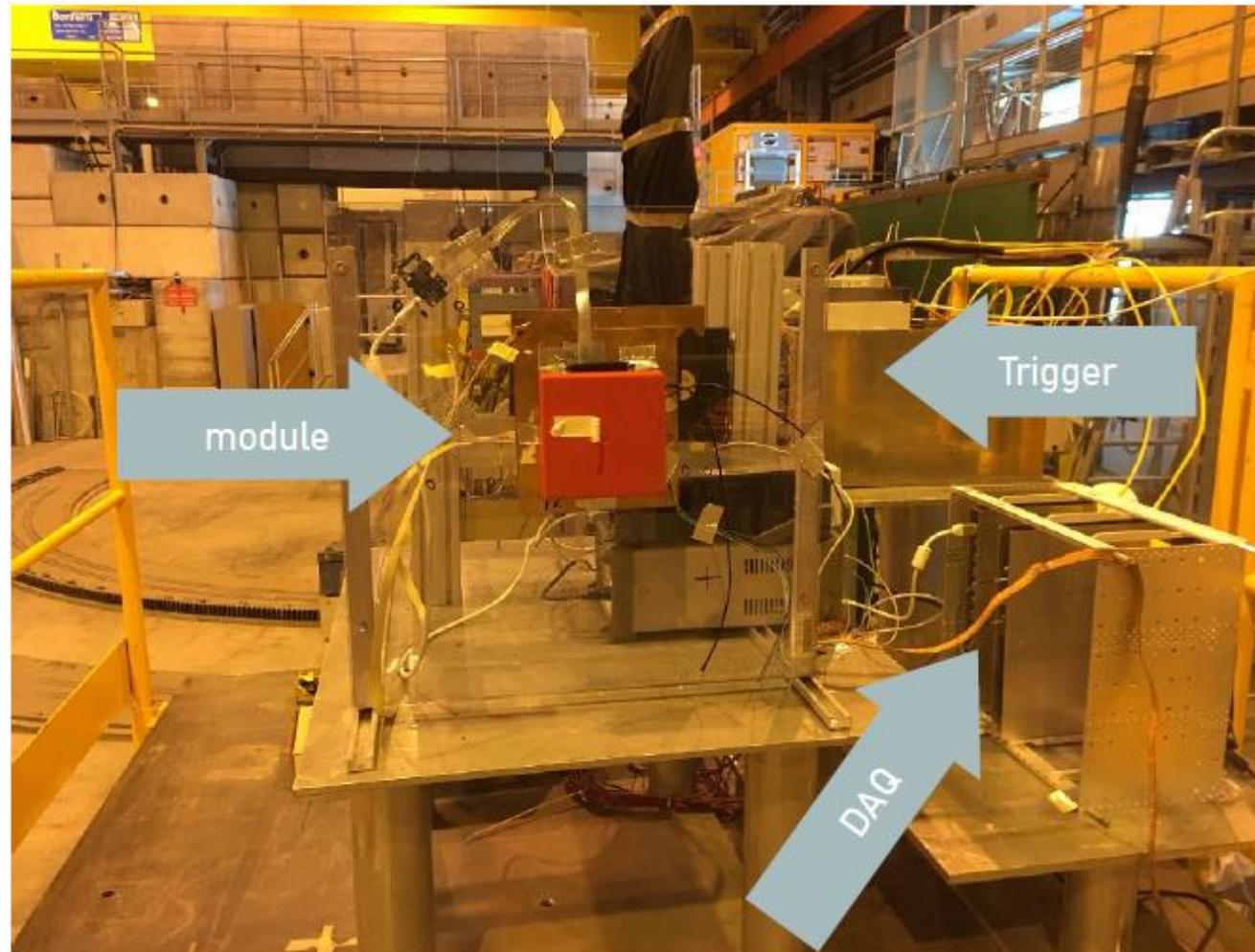


Time-over-Threshold





Test Beams set up (with 4.5 X0 Pb in front)

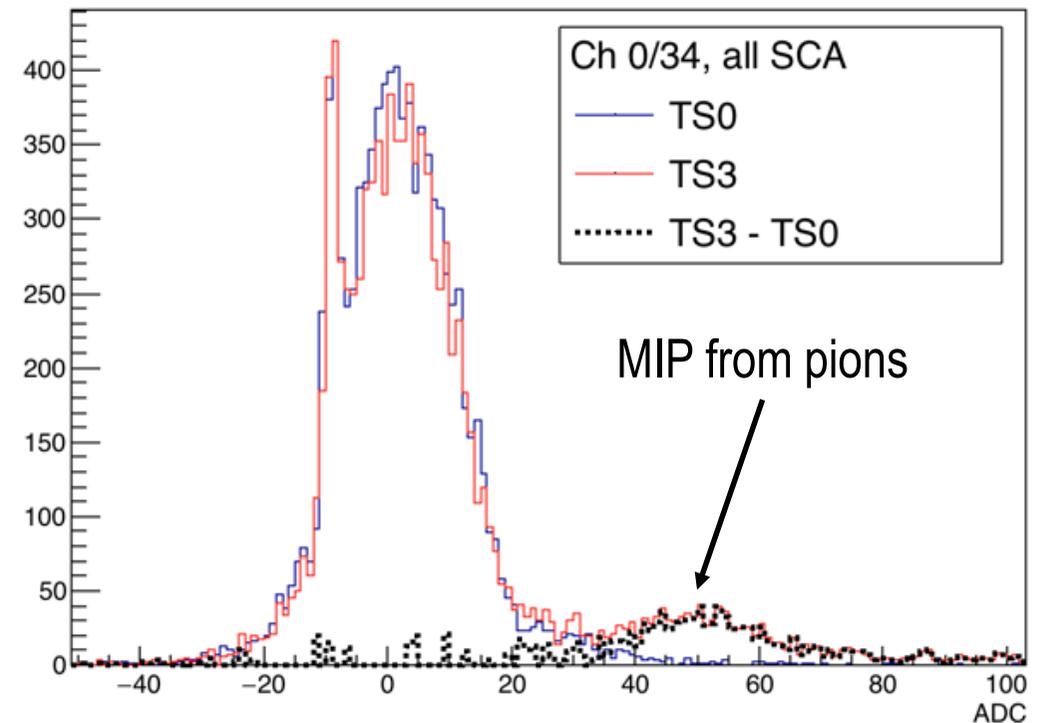
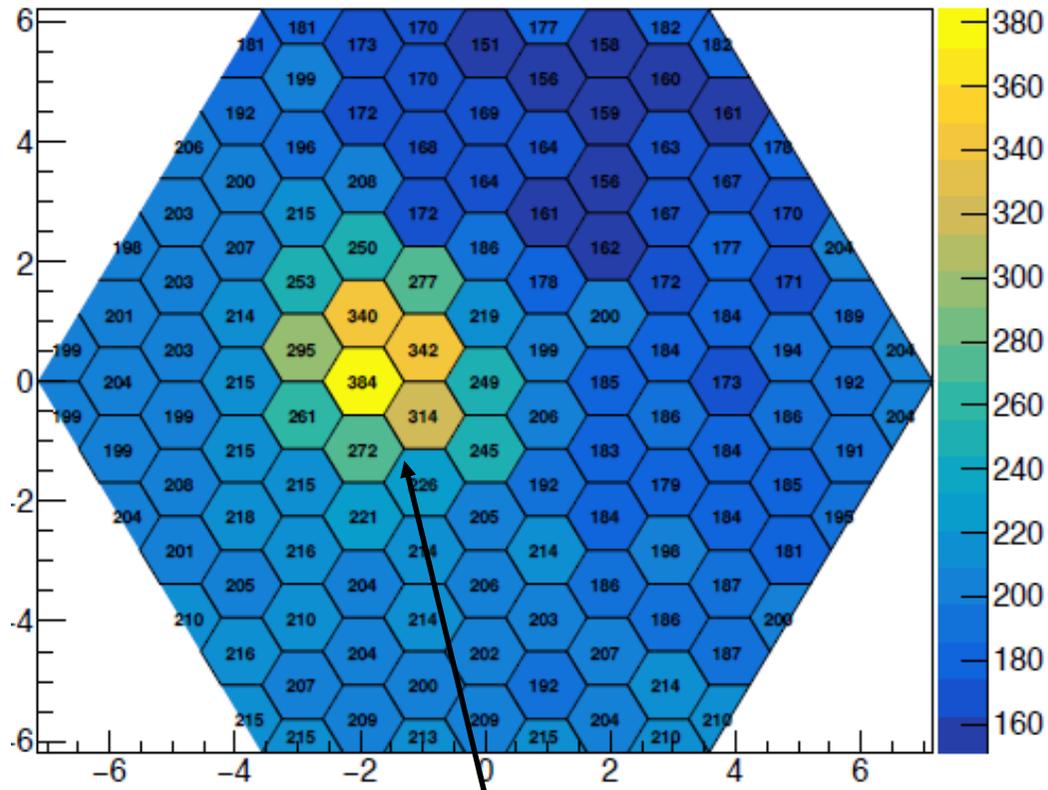


- **One Si Module on Cu plate**, with Single PCB (“hexaboard”) & **4 SKIROC2_CMS chips**
- Chips on hexaboard also tested at CERN by A. Lobanov
<=> **useful feedback from LLR test-bench on single chip**

May 2017 Test beams @ CERN (2)

(some of the) First results...

ADC hg timesamp 3

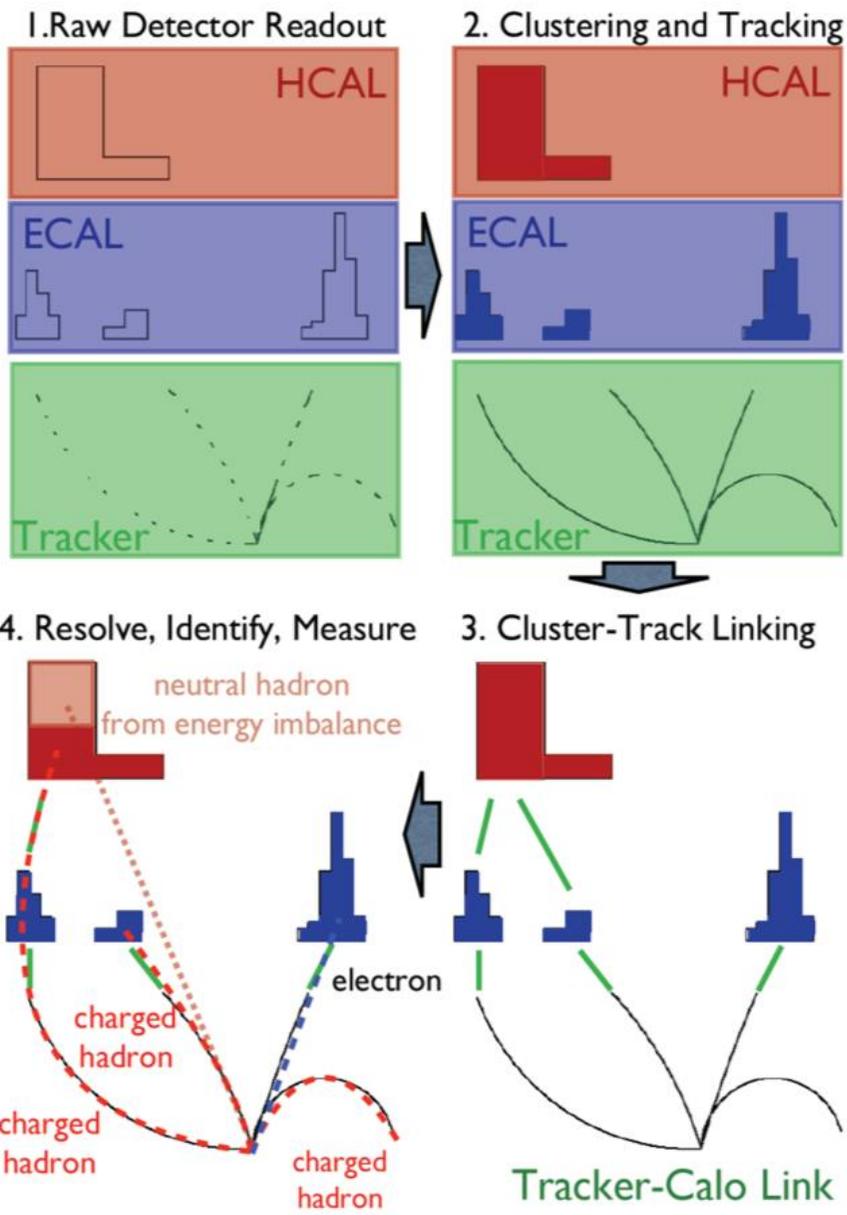


➤ Next test beams: mid-July

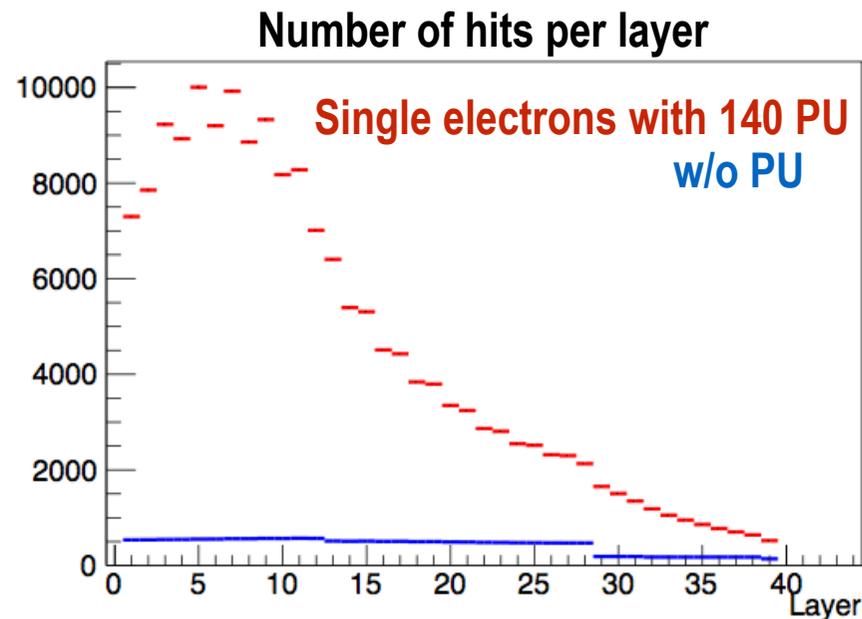
- ~50 modules available: ~10 for EE + 3/layer in FH + CALICE AHCAL prototype

Compléments : Software/Performance

Particle Flow & Clustering (1)

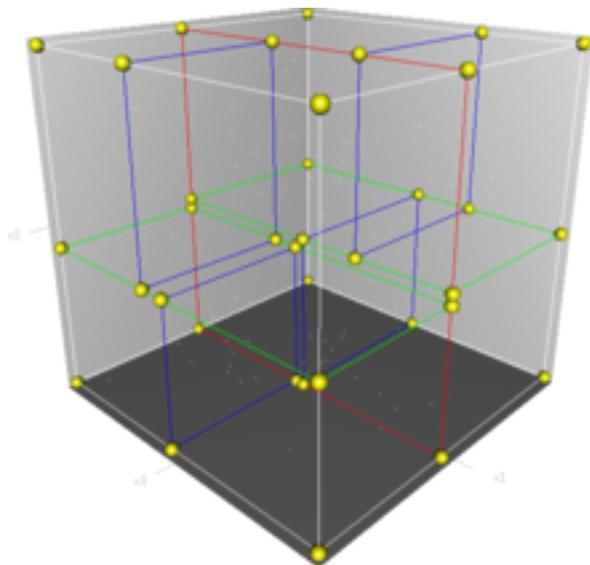


- Reconstruction type “PFlow” indispensable pour lutter contre PU => **expertise du LLR reconnue**
- Ingrédients cruciaux: traces & **clusters**
- La reconstruction de **clusters** parmi 6M de canaux et avec ~140 PU est un défi !
- Le clustering intervient au L1, offline, au HLT dans des **domaines de travail du groupe**

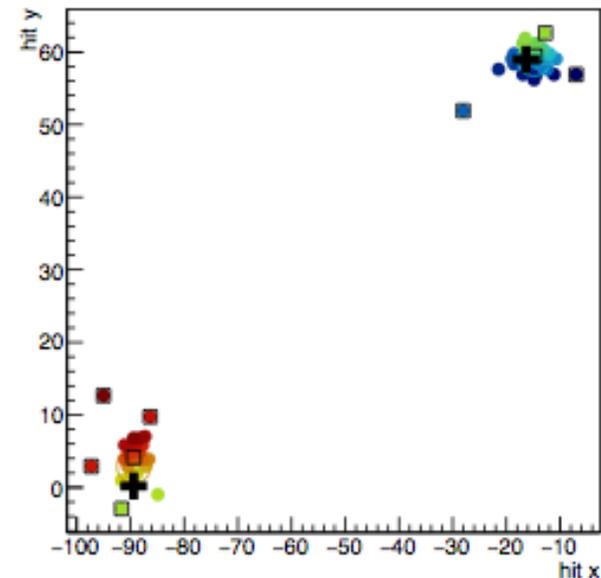


Particle Flow & Clustering (2)

- La reconstruction au HLT doit être aussi proche que possible que la reconstruction offline, avec des contraintes fortes au niveau du temps de calcul.
 - le temps de calcul du seul clustering offline actuellement au delà de la limite tolérable pour le processing au HLT ($\sim 1\text{s/evt}$), alors qu'il faudra aussi faire le tracking, le PFlow, etc.
 - Tout gain sur le temps de calcul offline sera un précieux au HLT
- le **clustering** est un bon candidat pour la **parallélisation**
 - par couche
 - recherche des plus proches voisin optimisée via les K-D Trees (incontournables à haute granularité)



K-d tree (3D)

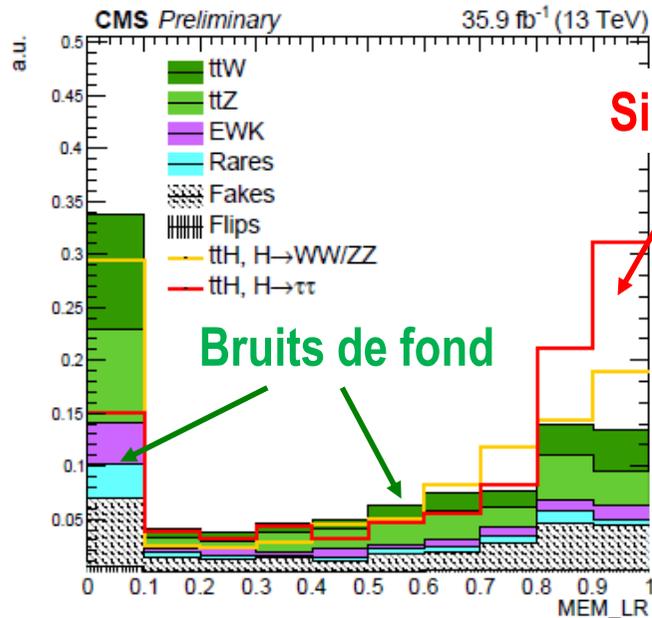


2 électrons (layer 10), no PU

Rappel : Parallélisation et GPU au LLR

➤ Expertise du LLR :

$$w_{\Omega}(\mathbf{y}) = \frac{1}{\sigma_{\Omega}} \sum_p \int dx dx_a dx_b \frac{f_i(x_a, Q) f_j(x_b, Q)}{x_a x_b s} \delta^2(x_a P_a + x_b P_b - \sum p_k) |\mathcal{M}_{\Omega}(\mathbf{x})|^2 W(\mathbf{y}|\mathbf{x})$$



« Matrix Element Method » (MEM)

- Calcul « lourd » d'intégrales pour construire une variable discriminant signal et bruit de fond (Thèses de Luca Mastrolenzo, puis Thomas Strebler)

➤ **Démonstration par Gilles** que la parallélisation seule, sur du matériel standard permet des gains importants (plateforme de développement: GridCL au LLR)

- gain décuplé avec des GPU's
- CMS-MEM en production au CC-Lyon, la puissance de calcul utilisée sur **6 noeuds de 4 GPUs chacun (soient 24 GPUs)** équivaut à la puissance de calcul d'environ 3000 coeurs physiques



NVIDIA Tesla K80S