

# HL-LHC

## Améliorations de CMS et Calorimètre à Haute Granularité (HGCal)



# HL-LHC



PH  
Physics  
Department

Le HL-LHC est une phase du LHC qui permettra d'obtenir une luminosité de 5 à 7 fois la luminosité nominale

$$L = \frac{N^2 k_b f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} F = \frac{N^2 k_b f \gamma}{4\pi\epsilon_n \beta^*} F$$

$k_b$  = nombre de paquets. (donné par la fréquence RF)  
 $f$  = fréquence de révolution = 11245 Hz. (longueur de la machine)  
 $\gamma = E/m_p$  énergie du faisceau (champ maximal des dipôles) } fixé

$N$  = nombre de protons par paquet.  
 $\epsilon_n$  = emittance normalisée. } amélioration des injecteurs

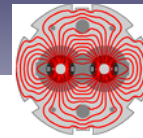
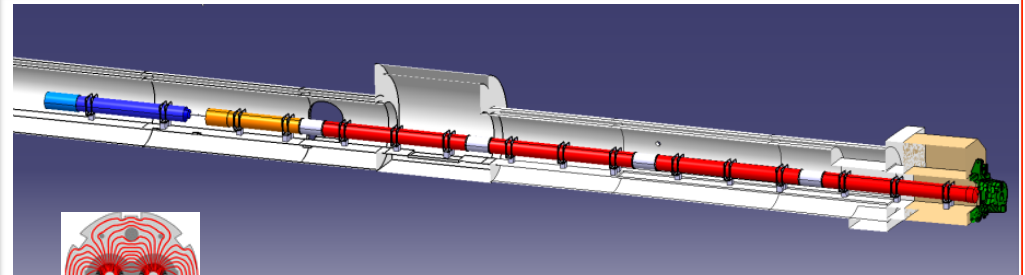
$\beta^*$  = fonction beta au point de collision  
 $F$  = facteur <1, dépend de l'angle de croisement } Meilleure focalisation, « crab cavities » pour nivellement



Nouveau Linac4



Booster  
1.4 -> 2 GeV/c



LARP

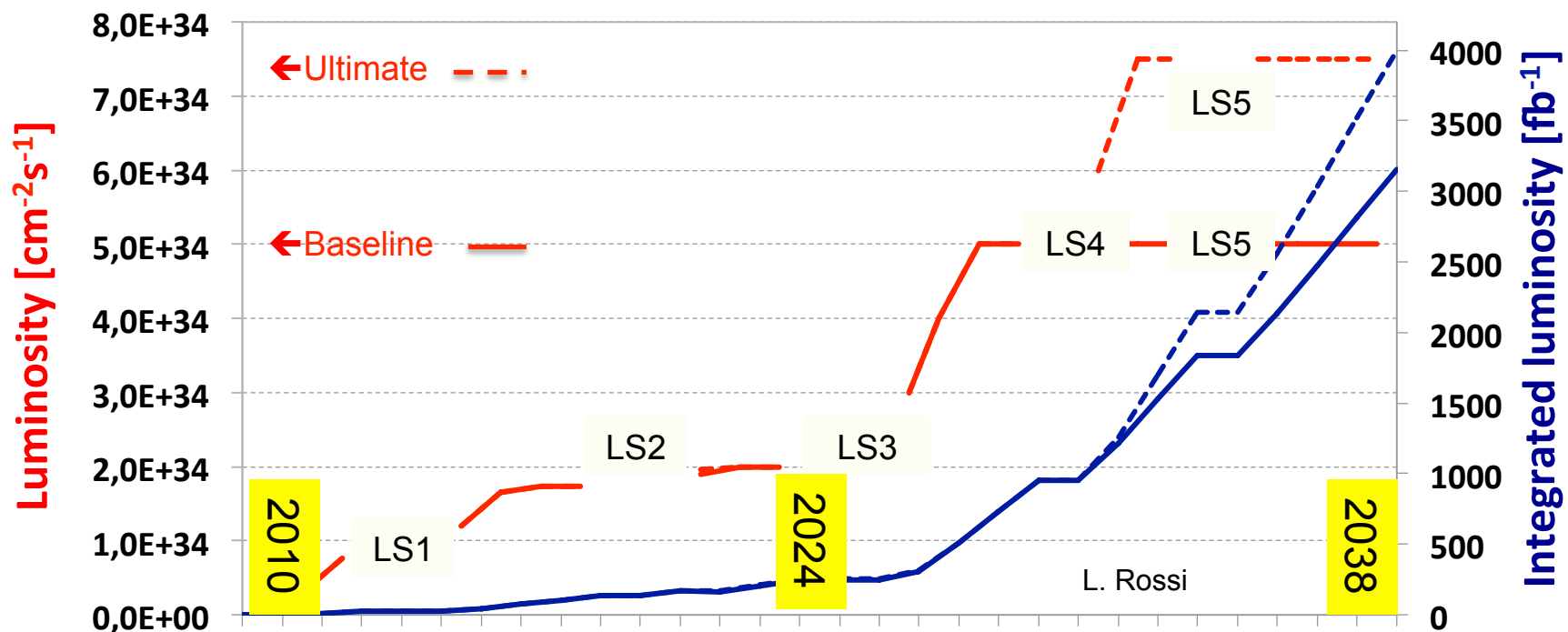
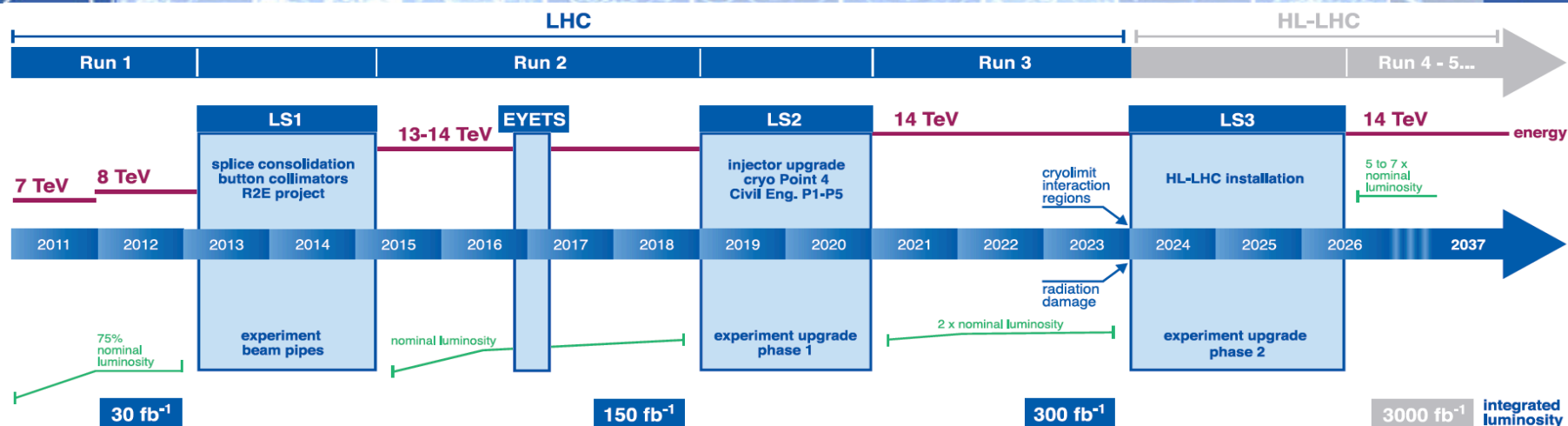
Nouveaux Quadropoles  
Technologie Nb3Sn

Le remplacement de certains éléments machine est de toute façon une nécessité (radiation)



# HL-LHC: planning et luminosité attendue

PH  
Physics  
Department



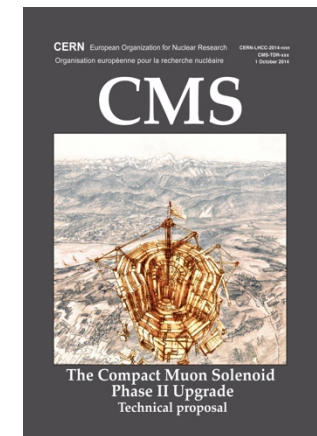
- Physique au HL-LHC
- Challenge pour les détecteurs
- Les améliorations de CMS  
Le cas du Calorimètre à Haute Granularité

Nota: les exemples sont tirés du *Technical Proposal* déposé par l'expérience CMS (dans laquelle est impliqué le LLR) en Juin 2015: CERN-LHCC-2015-010

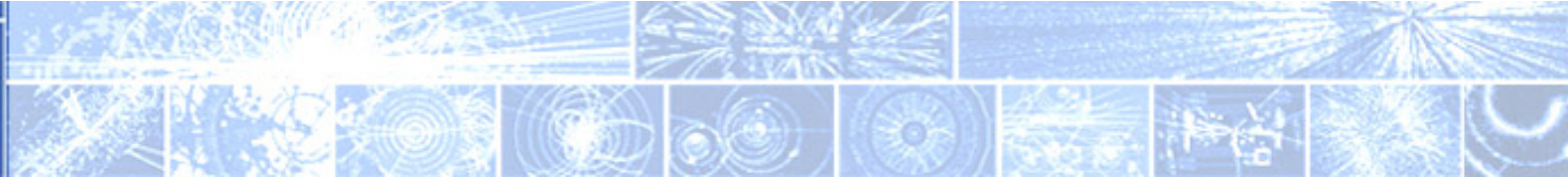
<http://cds.cern.ch/record/2020886/files/LHCC-P-008.pdf>

Un effort similaire a lieu dans l'autre expérience généraliste ATLAS  
Lettre d'Intention CERN-LHCC-2012-022.

Voir aussi les documents récents (Scope Documents, Septembre 2015)  
CERN-LHCC-2015-019 et CERN-LHCC-2015-020



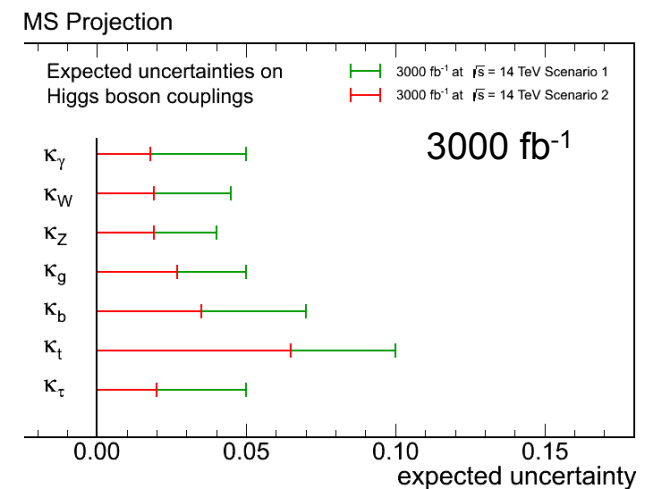
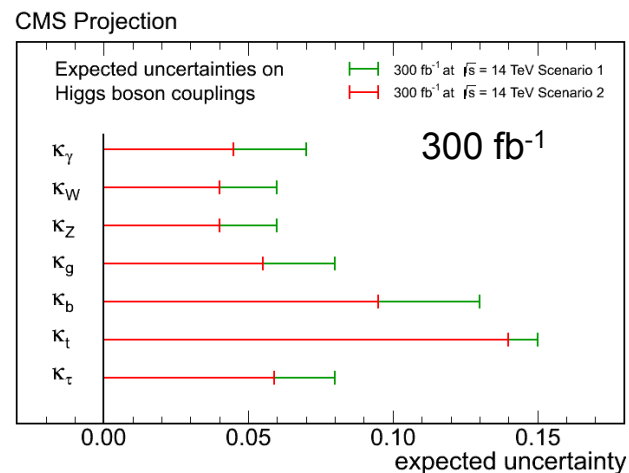
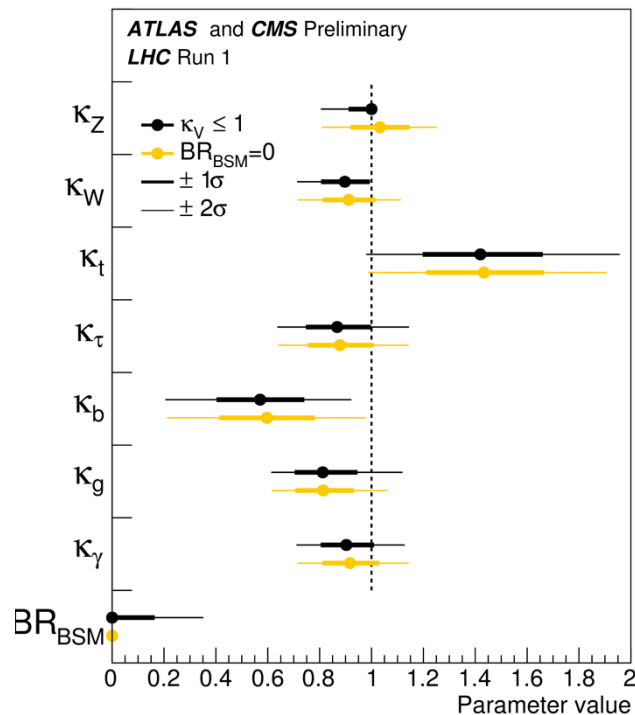
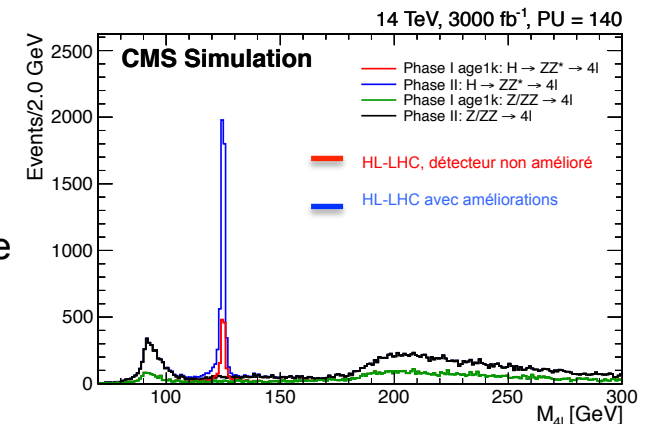




# PHYSIQUE AU HL-LHC

Une fois connue sa masse, les propriétés du Higgs du Modèle Standard sont parfaitement connues. Toute déviation serait le signe de Nouvelle Physique

- $10^8$  H(125) produits !  
~5000  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  complètement reconstruits  
Etude fine structure CP
- Mesure des couplages du H(125)  $\sim 3\text{-}5\%$  /expérience

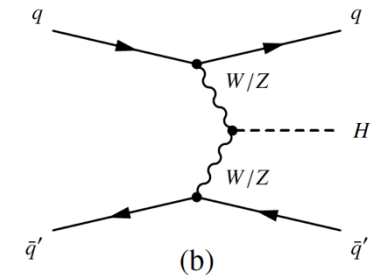


- Le **couplage au  $\tau$**  peut être étudié précisément avec la production du Higgs par Vector Boson Fusion (réduction du bruit de fond)

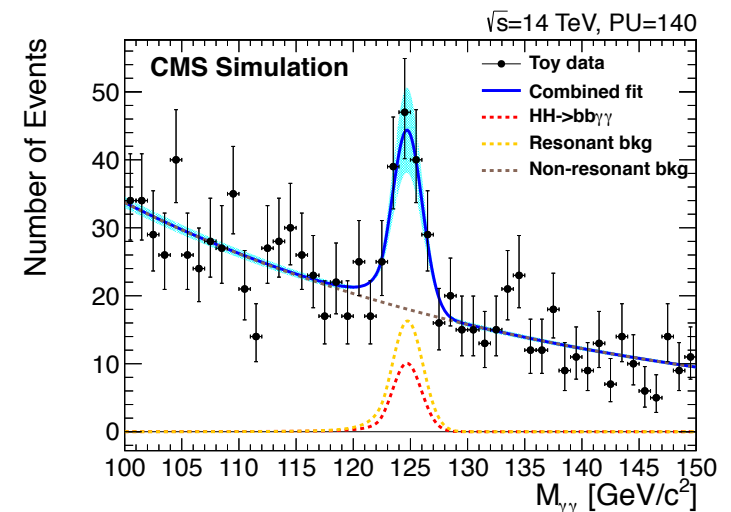
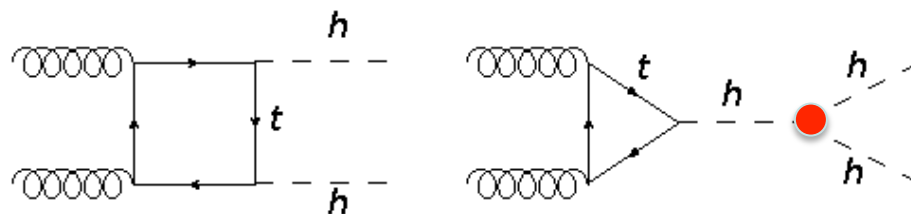
- Couplage à la deuxième génération**  $H \rightarrow \mu\mu$  < 10% précision

- Production de paire de Higgs

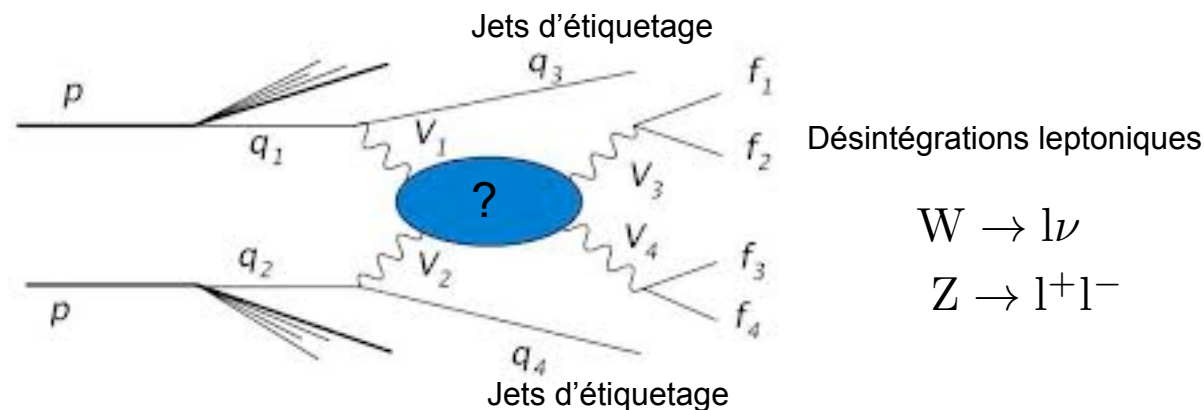
- Teste le **self-couplage du Higgs**
- Interférence négative de deux diagrammes  $\sigma_{HH} \sim 1/1000 \sigma_{\text{single H}}$   
*pourrait être fortement augmenté dans le cas de couplages non-standards*
- Bruit de fond résonnant  $b\bar{b}H$   $t\bar{t}H$   $ZH$
- >2 $\sigma$  attendus combinant  $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$  et  $\rightarrow b\bar{b}\tau\tau$



- Recherche d'éventuels autres Bosons de Higgs

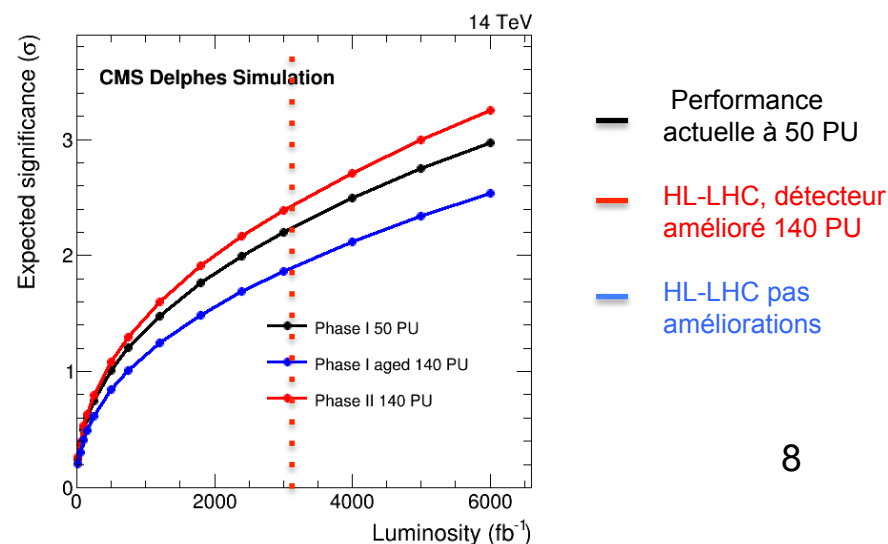


diphoton mass distribution for  $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$



- La section efficace de diffusion de bosons polarisés longitudinalement est régularisée par le phénomène de brisure de symétrie.
- W W (meilleur choix: deux leptons de même signe) ou WZ (trois leptons)
- Sélection cinématique de la composante longitudinale ( $\Delta\Phi_{j3j4}$ ,  $P_T(l)$ )

Une signification de  $2.4 \sigma$  pour la section efficace pour  $W_L W_L$  avec  $3000 \text{ fb}^{-1}$

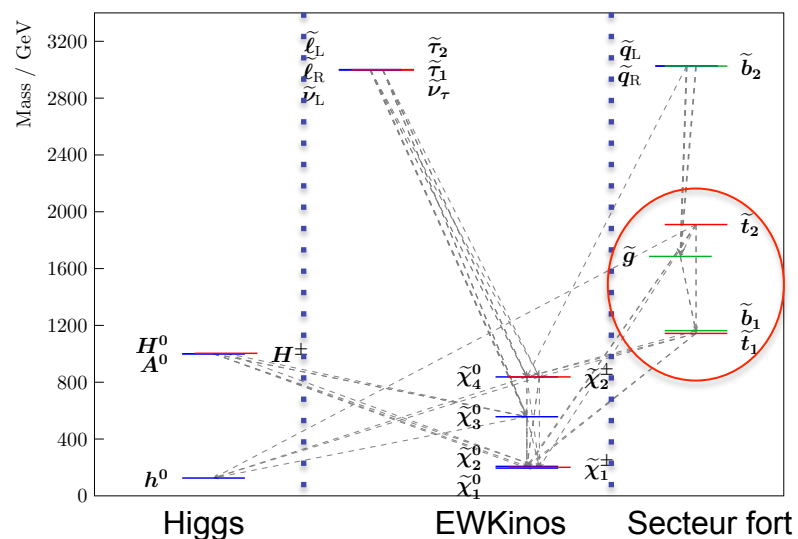


La Super-SYmétrie (SUSY) est la théorie la plus prometteuse pour offrir des réponses aux limitations du Modèle Standard

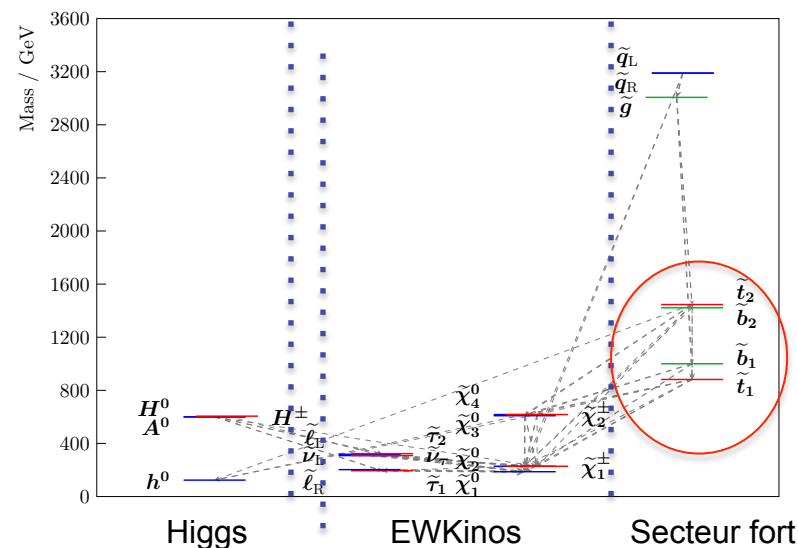
- **Corrections radiatives à la masse du Higgs (« modèles naturels ») pour expliquer sa 'faible' masse**  
→ *Forte contrainte sur les différents modèles*
- Matière noire
- Violation de CP (asymétrie matière – antimatière)
- Egalité de couplages forts, électromagnétiques et faibles à une échelle d'unification,

....

L'échelle et la hiérarchie des masses varient selon les modèles, mais la grande majorité prévoient des particules de l'ordre du TeV.

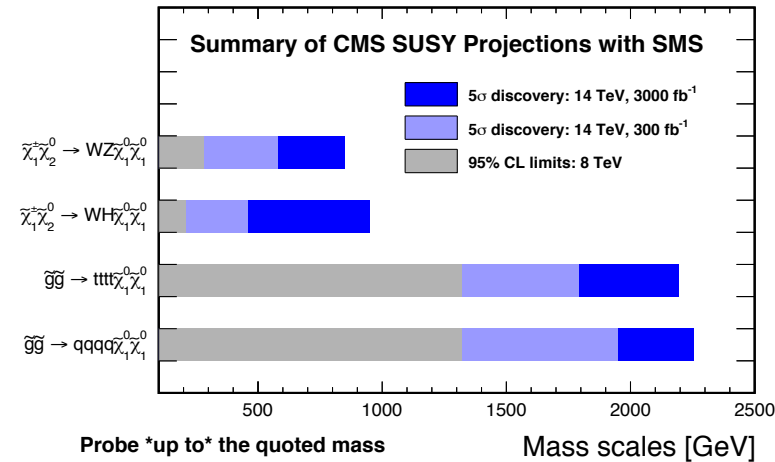
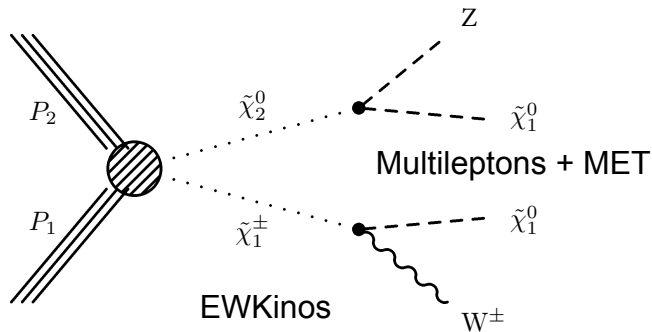


Exemple de modèle naturel: NM3



Exemple de modèle plus complexe 9  
STC: dégénérescence stau-neutralino

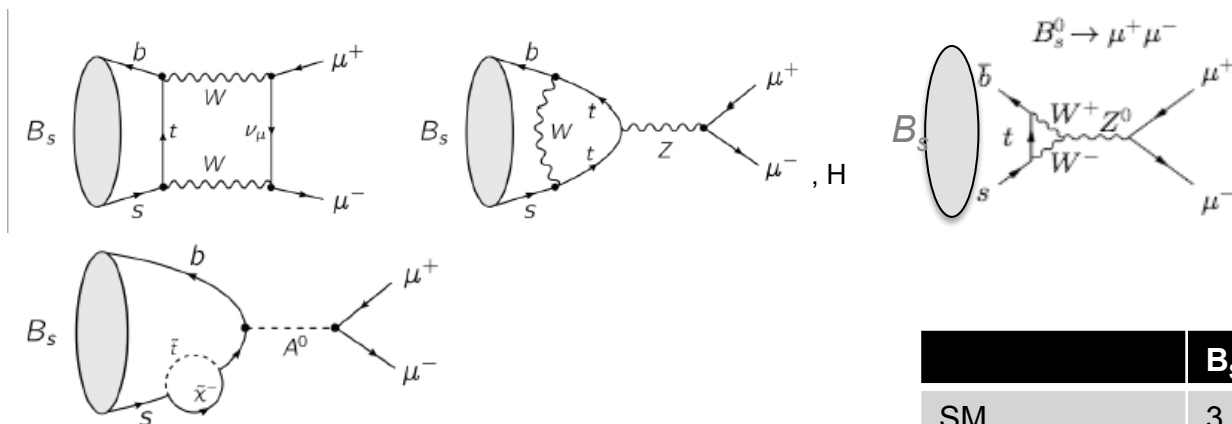




- La luminosité intégrée du HL-LHC étend de façon significative l'espace de phase couvert dans la recherche de SUSY.
- Si de nouvelles particules sont découvertes aux Runs 2+3, la luminosité permettra une étude plus fine de leur spectre de masse.

Analysis	Luminosity (fb <sup>-1</sup> )	Model				
		NM1	NM2	NM3	STC	STOC
all-hadronic ( $H_T$ - $H_T^{\text{miss}}$ ) search	300					
	3000					
all-hadronic ( $M_{T2}$ ) search	300					
	3000					
all-hadronic $\tilde{b}_1$ search	300					
	3000					
1-lepton $\tilde{t}_1$ search	300					
	3000					
monojet $\tilde{t}_1$ search	300					
	3000					
$m_{\ell+\ell^-}$ kinematic edge	300					
	3000					
multilepton + b-tag search	300					
	3000					
multilepton search	300					
	3000					
ewkino WH search	300					
	3000					

< 3σ   3 – 5σ   > 5σ



	$B_S \rightarrow \mu\mu$	$B_D \rightarrow \mu\mu$
SM	$3.7 \pm 0.2 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \pm 0.1 \cdot 10^{-10}$
LHCb+CMS	$2.8 \pm 0.7 \cdot 10^{-9}$	$[1.4 - 7.4] \cdot 10^{-10}$

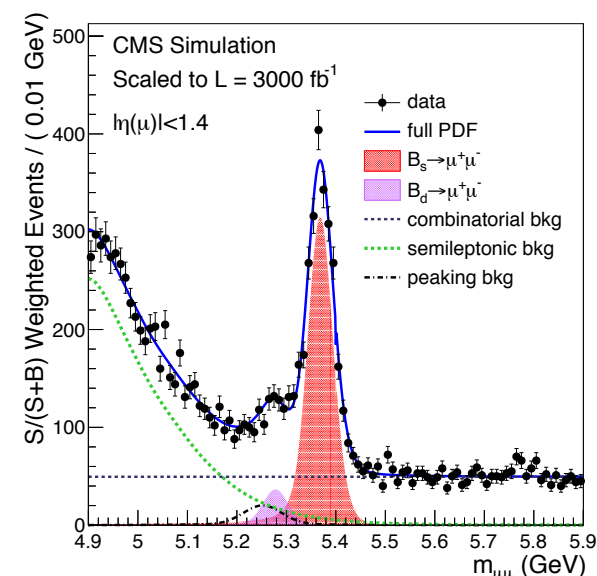
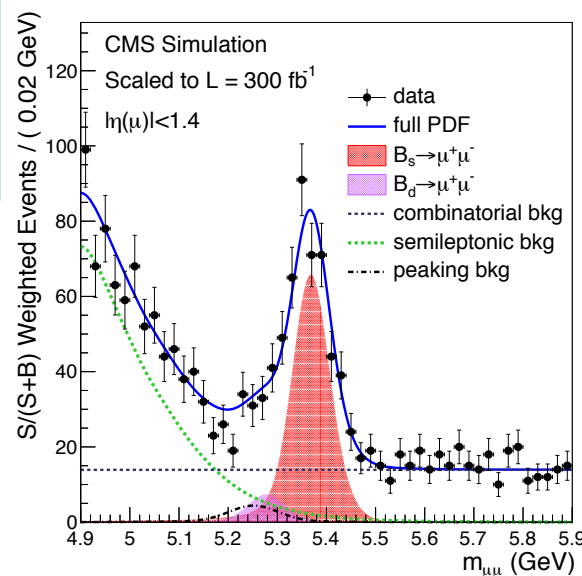
## Les transitions

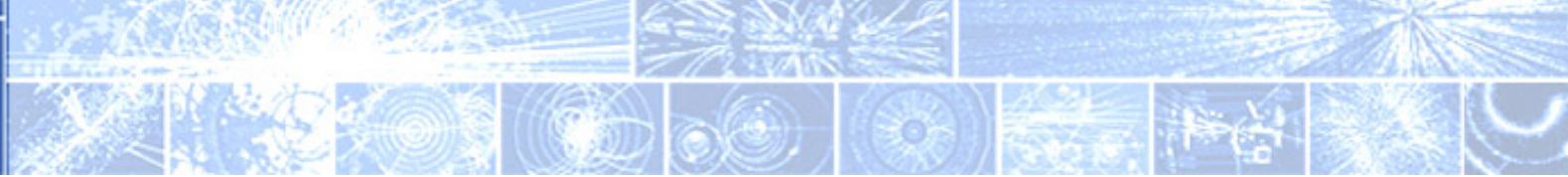
$B_S \rightarrow \mu^+ \mu^-$  et  $B_D \rightarrow \mu^+ \mu^-$  sont fortement supprimées dans le Modèle Standard mais peuvent être augmentées en présence de nouvelles particules.

Significane du rapport de branchement du  $B_D$

	Aujourd'hui	$300 \text{ fb}^{-1}$	$3000 \text{ fb}^{-1}$
$< 7 \times SM$		$2.2\sigma$	$6.8\sigma$

$< 7 \times SM$	$2.2\sigma$	$6.8\sigma$
-----------------	-------------	-------------



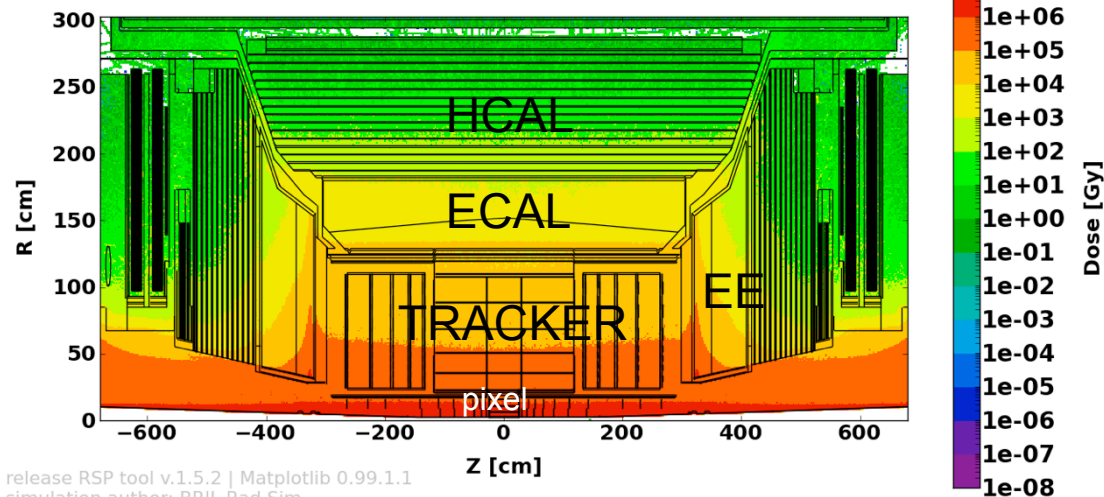


# **LES AMELIORATIONS DE CMS ET LE HGCAL**

# Un challenge pour les détecteurs

CMS HGC pp 7TeV v3.7.2.0:  
Dose (Central Region, Tracker+Calorimeters)  
3000.0 [ $\text{fb}^{-1}$ ]

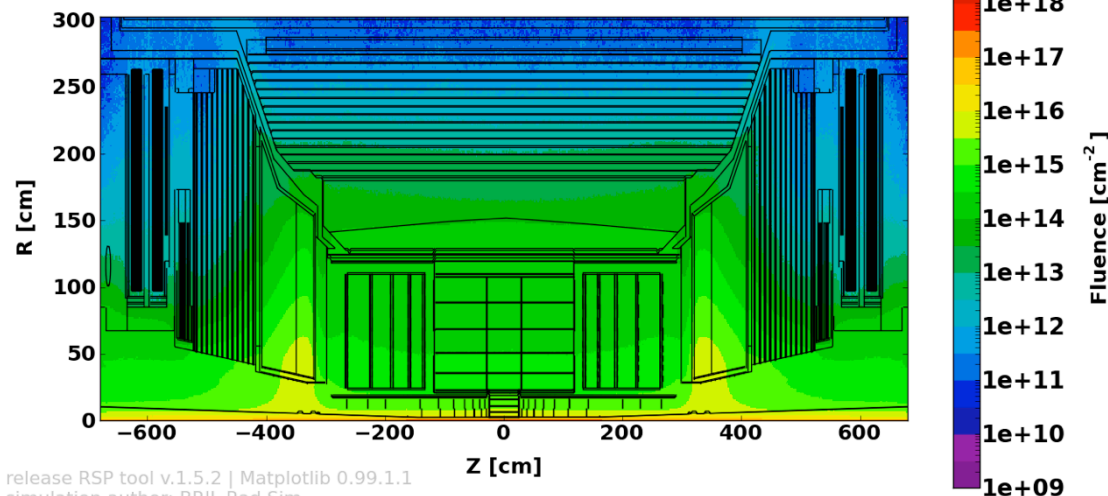
for internal CMS use only



release RSP tool v.1.5.2 | Matplotlib 0.99.1.1  
simulation author: BRIL Rad Sim

CMS HGC pp 7TeV v3.7.2.0:  
1MeV neutrons equivalent (Central Region, Tracker+Calorimeters)  
3000.0 [ $\text{fb}^{-1}$ ]

for internal CMS use only



release RSP tool v.1.5.2 | Matplotlib 0.99.1.1  
simulation author: BRIL Rad Sim

## Radiation

### Dose

1 GRad (pixel)  
150 Mrad (EE)

### Fluence

$10^{16}$   $\text{h}^{\pm}/\text{cm}^2$  (pixel)  
 $10^{16}$   $\text{n}/\text{cm}^2$  (EE)

Certains détecteurs actuels  
(Pixel-Tracker-EE) doivent  
être remplacés dans CMS

Les détecteurs type Si  
doivent être maintenus au  
froid ( $-30^{\circ}\text{C}$ )





Empilement:  $\langle 140 \rangle$  interactions simultanées à  $L=5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- Nécessité d'améliorer la granularité des détecteurs et d'améliorer leurs performances temporelles (« fast timing » ?)
- Déclenchement Niveau-1 :  $100 \text{ KHz} \rightarrow 750 \text{ KHz}$  + Latence augmentée à  $12.5 \mu\text{s}$   $\rightarrow$  changement de la plupart des chaînes électroniques
- Algorithmes hors-ligne, infrastructure de calcul



## Trigger/HLT/DAQ

- Information traces L1-Trigger
- L1-Trigger: 12.5 $\mu$ s latence - 750 kHz
- HLT taux  $\approx$  7.5 kHz

## EM calorimètre EM Tonneau

- Remplacer FE/BE électronique
- Baisser température opération (8°C)

## Muons

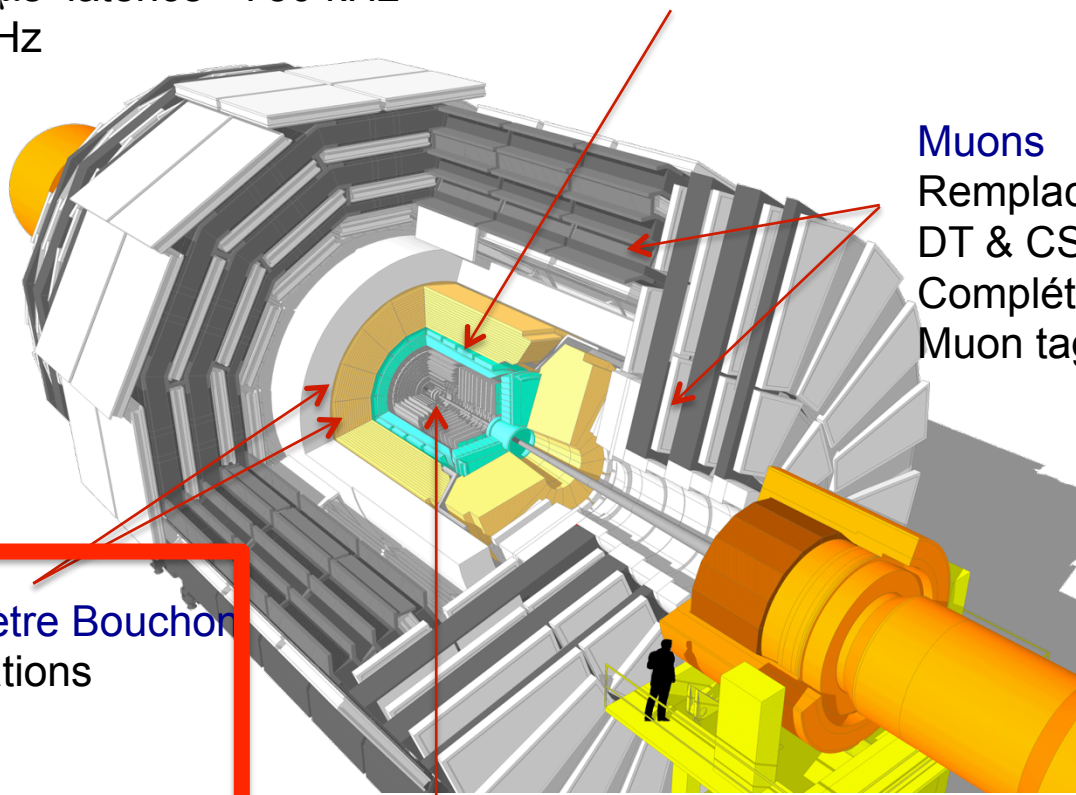
- Remplacer électronique
- DT & CSC FE/BE
- Compléter la couverture RPC
- Muon tagging  $2.4 < \eta < 3$

## Remplacer Calorimètre Bouchon

- Tolérant aux radiations
- Haute granularité
- Capacité 3(4?) D

## Remplacer le Trajectographe

- Tolérant aux radiations - Haute granularité - Moins de matériel
- Participation au déclenchement de Niveau 1
- Couverture étendue vers l'avant jusqu'à  $\eta = 3.8$



## La physique du HL-LHC exige des bouchons performants

jets VBF, diffusion WW (électrons), diHiggs  $\rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma\dots$  (relativement bas  $p_T$ )

## Les calorimètres bouchons actuels conçus pour $\sim 400 \text{ fb}^{-1}$ ne supporteront pas la radiation

- ECAL: cristaux de  $\text{PbWO}_4$  perdent de la lumière et deviennent inhomogènes longitudinalement
- HCAL: scintillateurs à grand  $\eta$  ne donnent plus assez de lumière

## Profitant des développements pour la calorimétrie Si-W ILC, CMS a décidé de construire un nouveau calorimètre bouchon, à base de capteurs Silicium

- **tenue aux radiations des capteurs Si** (expérience des trajectographes et détecteurs pixels)
  - excellente granularité transverse, éventuellement utilisée au déclenchement
  - imagerie 3D (lecture plan par plan)
  - possibilité de mesurer la direction des gerbes
  - possibilité de mesurer le temps d'impact avec une excellente résolution
- } Combattre empilement

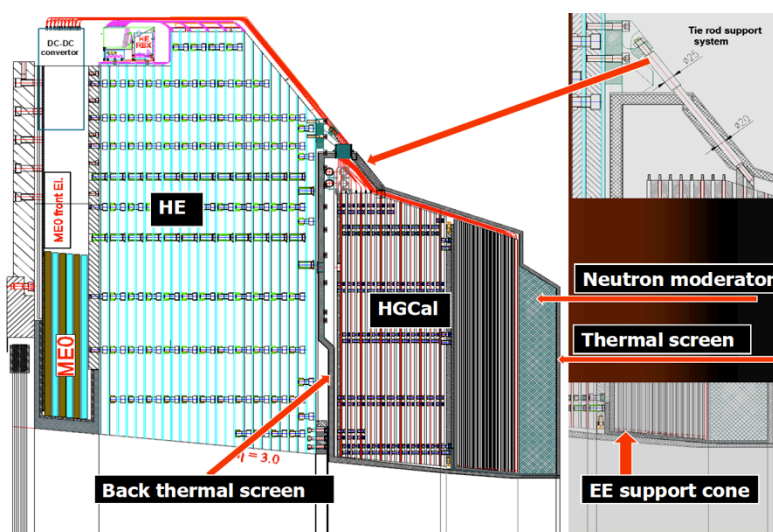
## L'environnement expérimental est cependant totalement différent de l'ILC

- fonctionner à froid ( $-30^\circ\text{C}$ ) à cause de l'augmentation du courant de fuite dû à la radiation
- électronique rapide (peaking time 20 ns), duty cycle 100%
- contrainte de la situation préexistante (canaux de services ...)

Electromagnetic EE ( $26 X_0$ ,  $1.5\lambda$ ): 28 couches de Silicium-absorbeur W/Cu

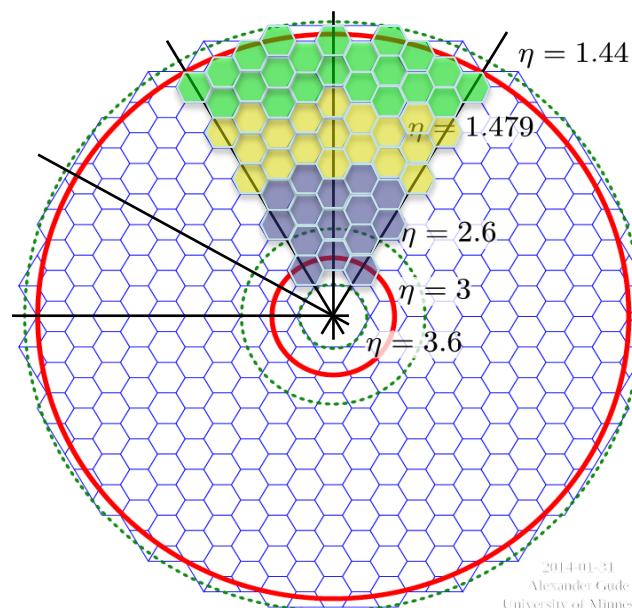
Front Hadronic FH ( $3.5 \lambda$ ): 12 couches de Silicium /laiton

Back Hadronic BH ( $5. \lambda$ ): 12 couches de Scintillateur/laiton



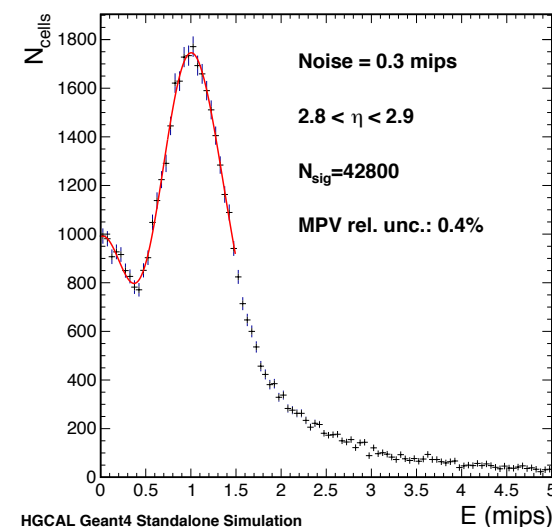
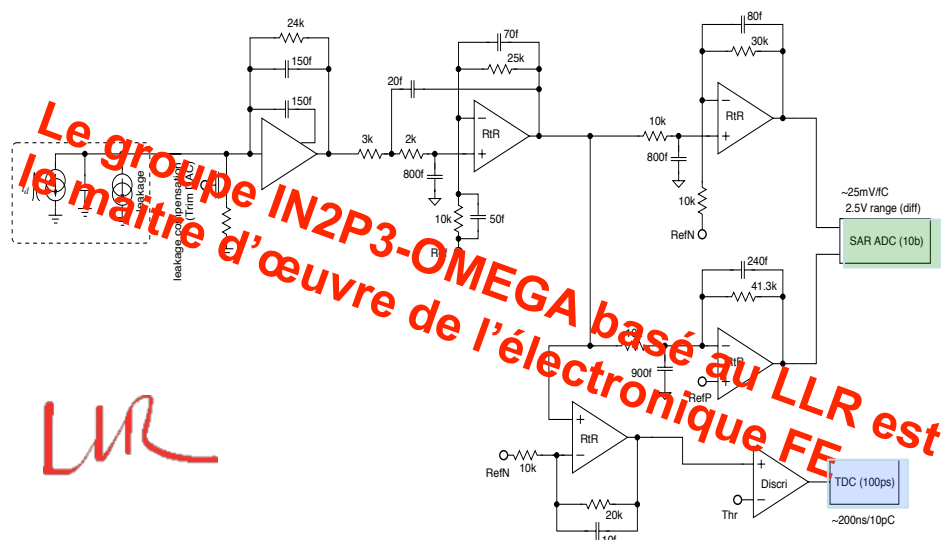
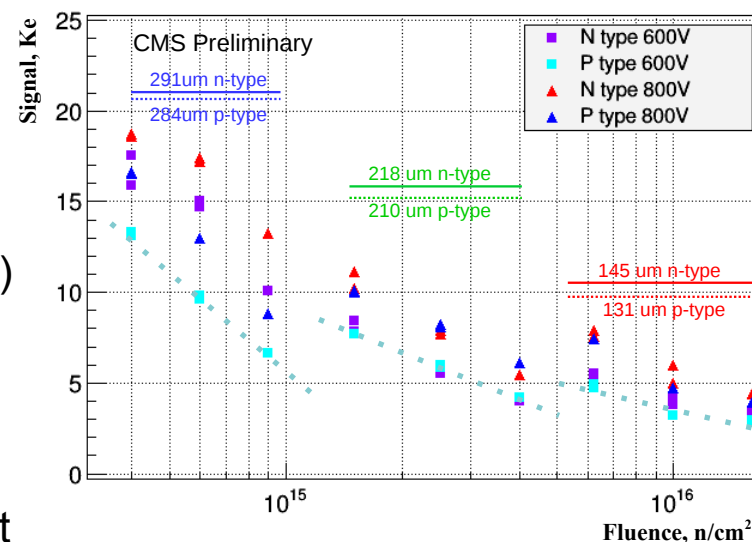
EE: 380 m<sup>2</sup> - 4.3 Mcanux - 13.9k modules - 16t  
 FG: 209 m<sup>2</sup> - 1.8 Mcanux - 7.6k modules - 36.5t  
 BH: 428 m<sup>2</sup> - 5184 SiPMs

Thickness	300 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
Maximum dose (Mrad)	3	20	100
Maximum n fluence (cm <sup>-2</sup> )	$6 \times 10^{14}$	$2.5 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{16}$
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 <sup>2</sup> )	290	203	96
Cell size (cm <sup>2</sup> )	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 <sup>-1</sup>	6.5	2.7	1.7



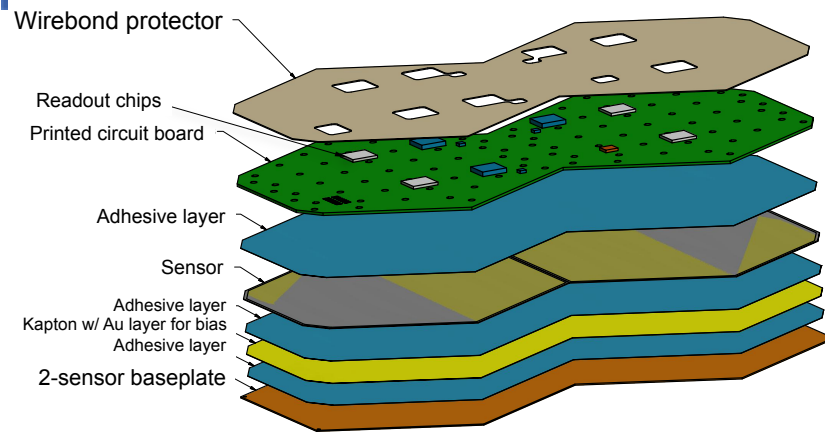
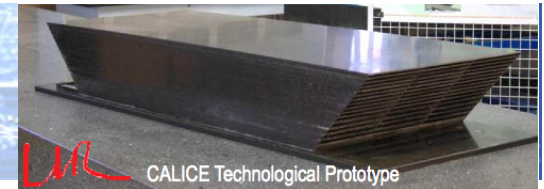


- **Capteurs:** cellules n-in-p, 3 différentes épaisseurs actives
- - test avec neutrons jusqu'à  $1.5 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$   
 $\approx 5000 \text{ fb}^{-1}$  -  $I_{\text{leak}} \approx 10 \mu\text{A}$  à  $T = -30^\circ$
- **FE ASIC : simulation spice 130 nm TSMC**
  - Mise en forme  $\approx 10\text{-}20 \text{ ns}$  - bruit  $\approx 2000 \text{ e}^-$  ( $3000 \text{ fb}^{-1}$ )
  - Puissance  $\leq 10 \text{ mW}$  par canal
  - 3000 MIP ( $10 \text{ pC}$ ) : **10 bit ADC**  $\leq 100 \text{ fC}$  et  
Time over Threshold (**ToT**)  $\geq 80 \text{ fC}$
  - Résolution Energie  $< 1\%$  - calibration de linéarité
  - MIP inter-calibration  $\leq 3\%$   $\rightarrow \approx 0.5\%$  terme constant
  - Resolution en temps  $\approx 50 \text{ ps}$  – opportunité pour la mesure en temps des gerbes (10-20 cells)

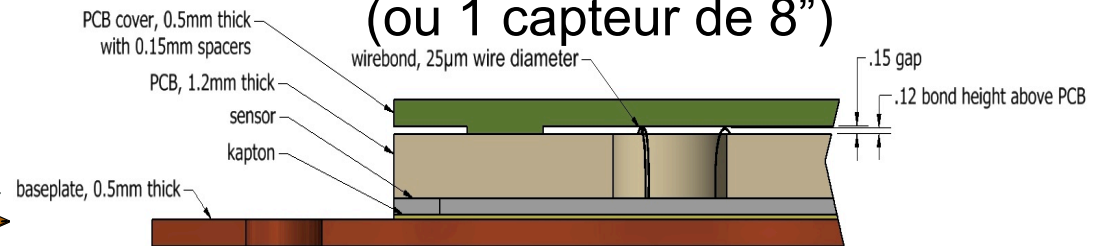




# HGC: Modules et mécanique



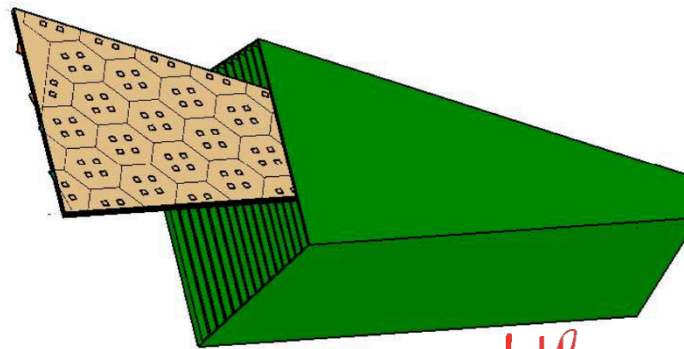
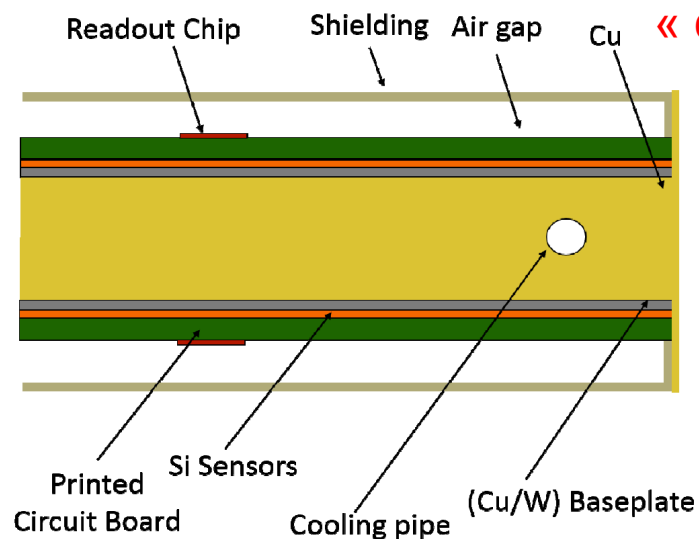
1 module = 2 capteurs de 6"  
(ou 1 capteur de 8")



Silicium maintenu à  $-30^{\circ}\text{C}$  avec refroidissement diphasique au  $\text{CO}_2$

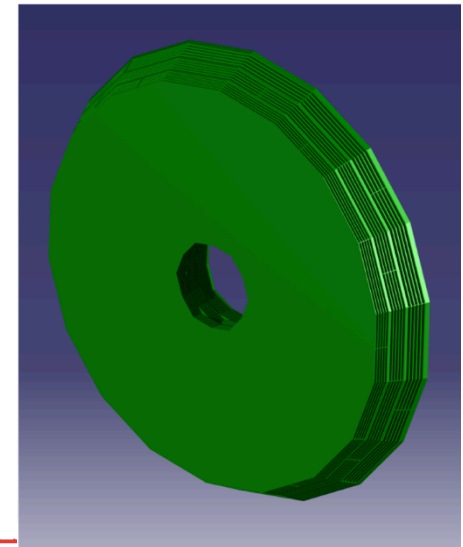
Puissance  $\approx 250(100) \text{ W/m}^2$  selon le rayon  $\rightarrow$  puissance totale  $\approx 125 \text{ kW}$  (après  $3000\text{fb}^{-1}$ )

Concept d'alvéoles en fibre de carbone développé pour ILD au LLR, avec des « cassettes » contenant les modules

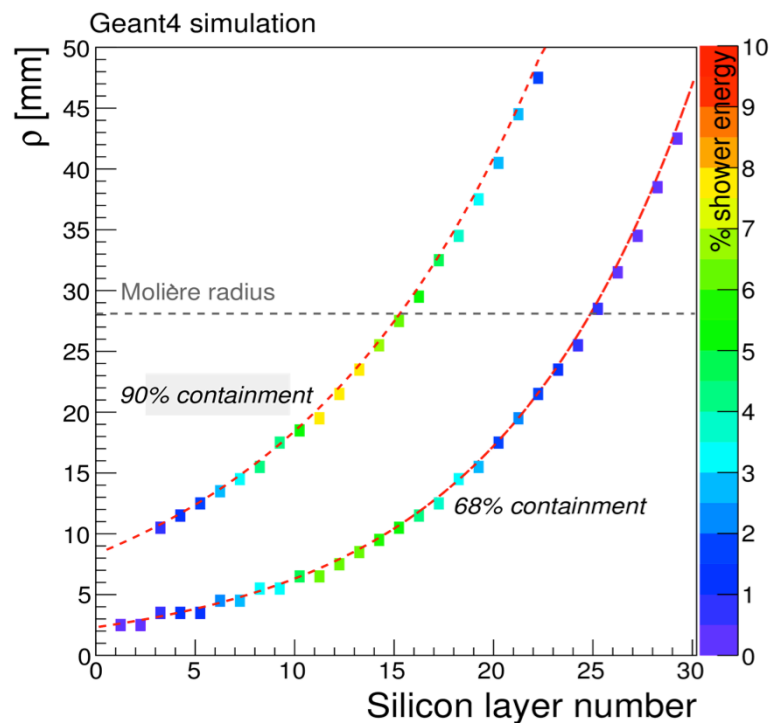


LLR

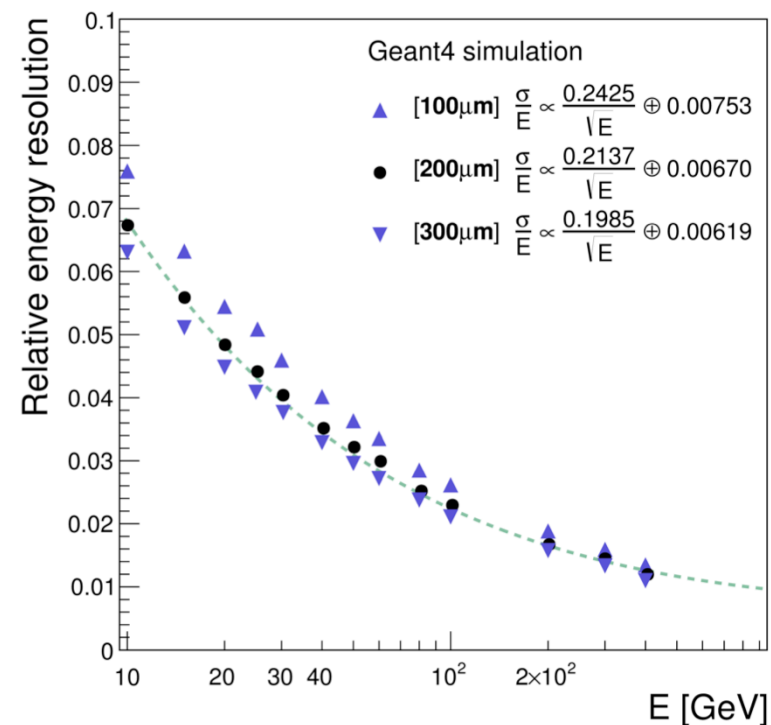
LLR







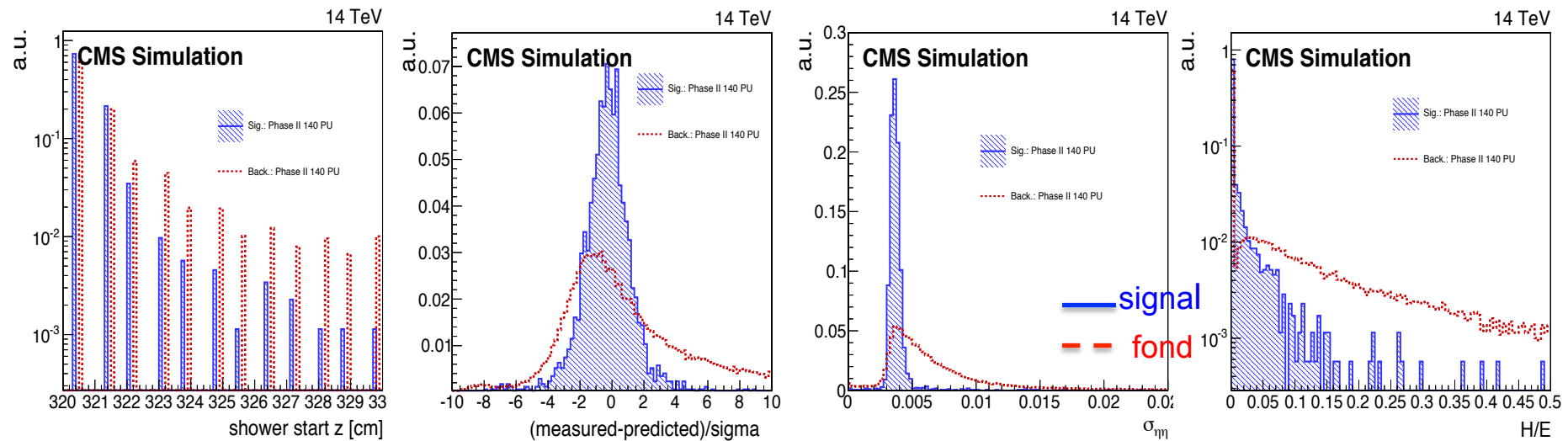
La gerbe est très étroite  
 $\ll$  rayon de Molière de 28mm  
 dans la première moitié du calorimètre



Résolution en énergie:  
 Terme stochastique 20% à 24% -  
 terme constant  $\leq 1\%$   
 (simulation testée sur les résultats de CALICE)

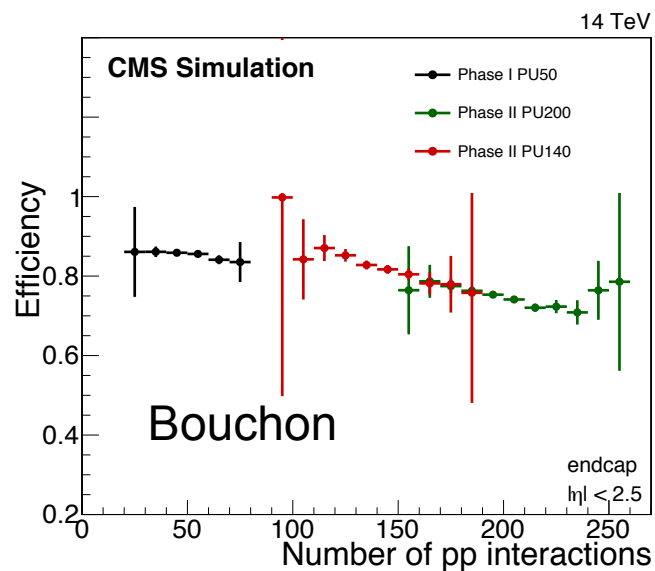
Exemple de variables de sélection  $e/\gamma$  qui bénéficient de l'imagerie 3D:

Pied de gerbe- longueur de gerbe- largeur transverse - H/E dans un petit cône 0.05 (PU)



LUR

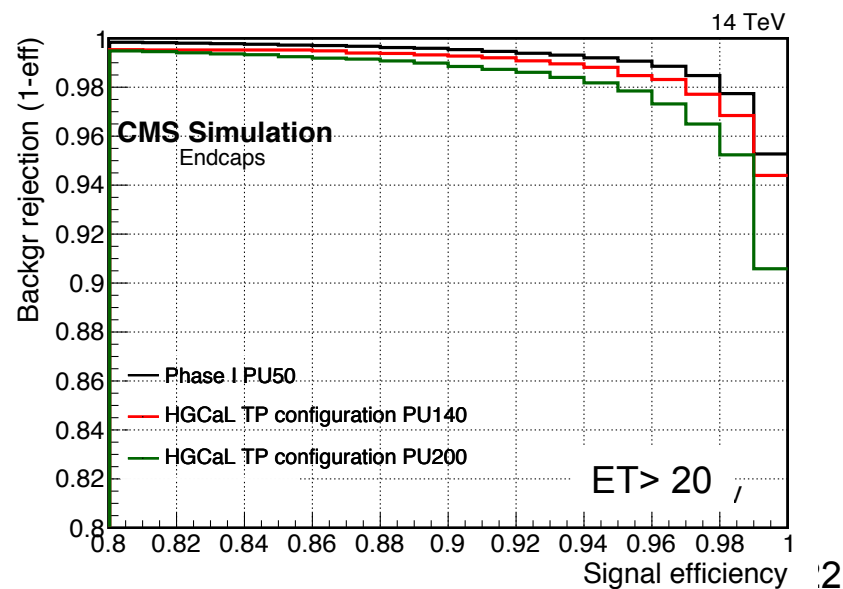
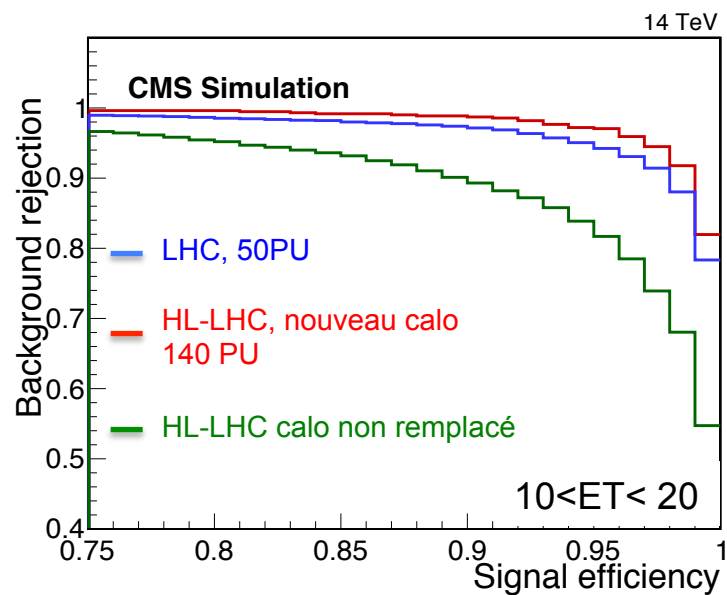
$Z \rightarrow ee$



● LHC, 50 PU

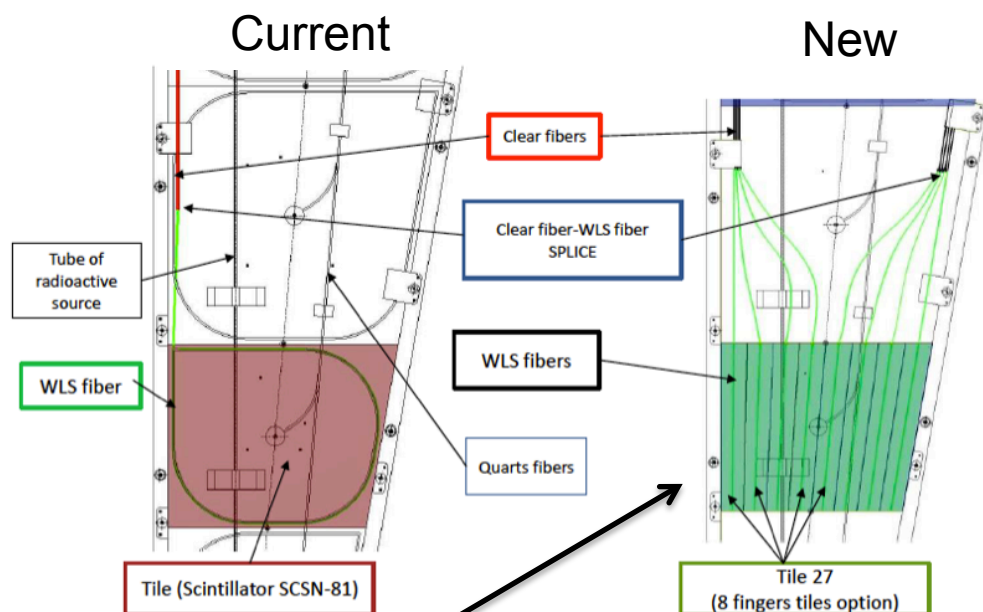
● HL-LHC nouveau calorimètre  
140 PU

● HL-LHC nouveau calorimètre  
200 PU



LHC

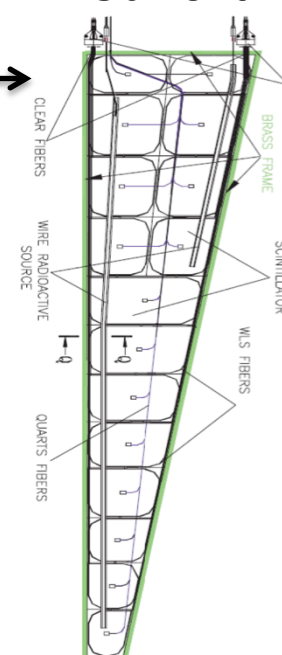
- Amélioration de tuiles pour tolérance  $\sim 5$  Mrad
  - Granularité renforcée  $\approx \times 2$  in  $\Phi$  &  $\times 1.3$   $\eta$



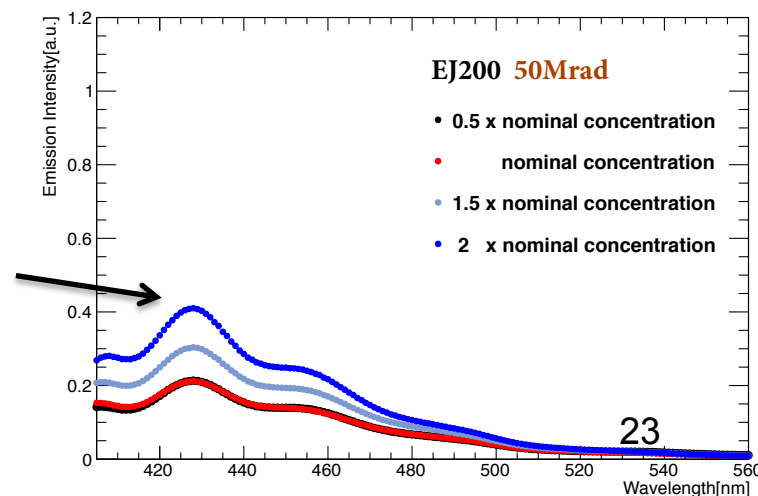
- Tuiles étroites (« doigts »)
  - longueur de transmission réduite
- Scintillateur sur-dopé

Current

New



Tower	Phi1/3	Tower	Phi2/4	Eta	D_Eta
16	5°	16	5°	1.305	0.087
17	5°	17	5°	1.392	0.087
18	5°	18	5°	1.479	0.087
19	5°	19	5°	1.566	0.087
20	5°	20	5°	1.653	0.087
21	5°	21	5°	1.740	0.087
22	5°	22	5°	1.827	0.087
23	5°	23	5°	1.914	0.087
24	5°	24	5°	2.001	0.087
25	5°	25	5°	2.088	0.087
26	5°	26	5°	2.175	0.087
27	5°	27	5°	2.262	0.087
28	5°	28	5°	2.349	0.087
29	5°	29	5°	2.436	0.087
30	5°	30	5°	2.523	0.087
31	5°	31	5°	2.610	0.087
		Phi1/4		Eta	D_Eta
		10°		2.697	0.175
		10°		2.872	0.128
				3.000	





Profiter des développements de Calice AHCAL en calorimétrie Hadronique

- tuiles lues par SiPM

En cours d'investigation:

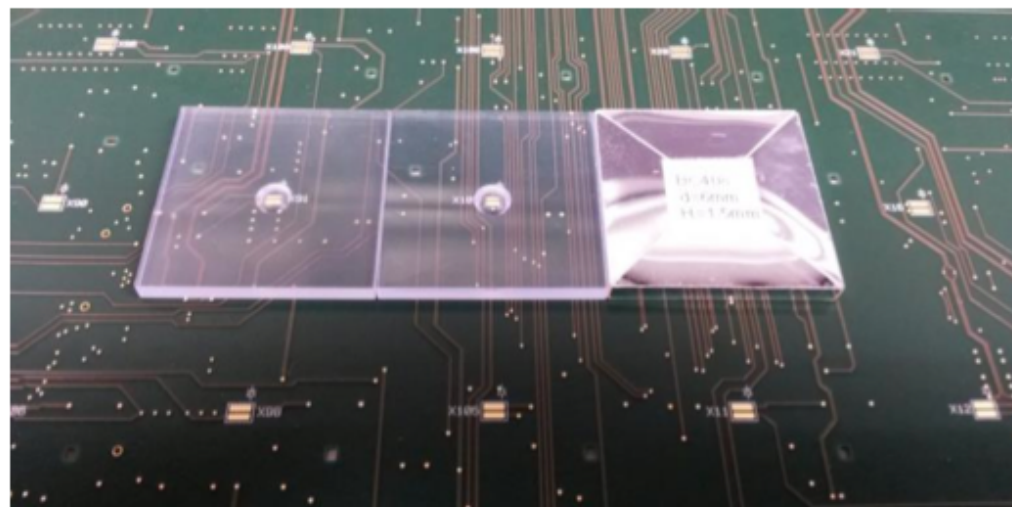
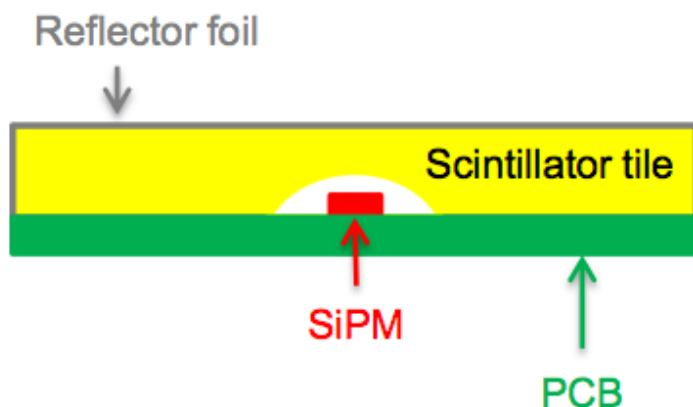
tenue aux radiations du scintillateur

tenue aux radiations des SiPMs (à basse température)

coût des SiPMs

...

} S/B, dynamique

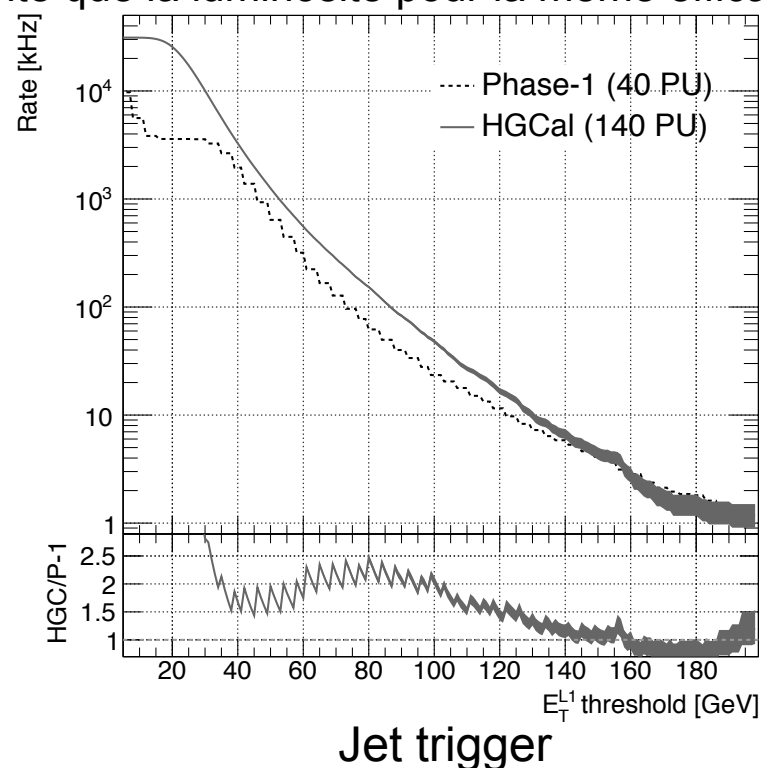
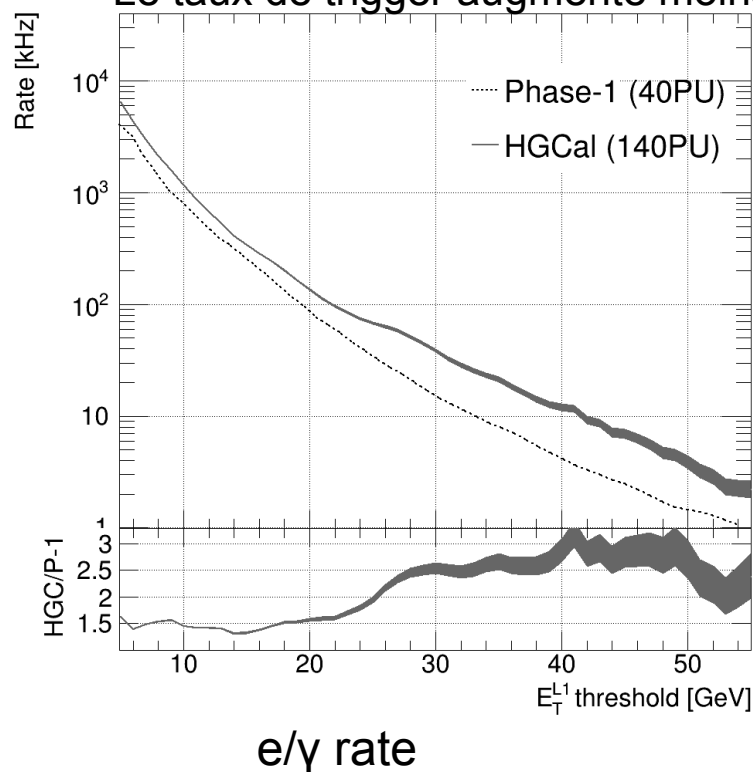




Crucial dans la région où le Trigger de trace est absent -  $\gamma$  et VBF/S jets  $\eta \geq 2.4$

- Trigger: sommes 2x2 cellules, une couche sur deux EE + FH, toutes les couches BH
- Electronique forme des clusters longitudinaux et des tours – on peut utiliser l'information latérale et longitudinale.
- Simulation: cône jet  $R=0.2$  optimise la rejection de l'empilement Seuil ajusté pour chaque couche, corrections pour empilement et partie hors-du-cône

Le taux de trigger augmente moins vite que la luminosité pour la même efficacité



- La possibilité de distinguer les interactions par leur **temps dans le croisement** est extrêmement attractive.  
Permettrait de réduire l'empilement
- La dispersion temporelle des collisions dans le croisement est 160 ps  
→ **résolution de 30 à 40 ps nécessaire**
- Les résultats de tests en faisceau semblent montrer qu'une résolution intrinsèque du bon ordre de grandeur est possible pour des signaux supérieurs à  $\sim 10$  mips avec des diodes Si de 100-300  $\mu$ .
  - Il y a *plusieurs dizaines* de cellules au dessus de ce seuil dans une gerbe électromagnétique, et quelques unes dans une gerbe hadronique

## TIME-VIEW

**HL-LHC baseline:**  
**Collision time RMS**  
 **$\sim 160$  ps (\*)**

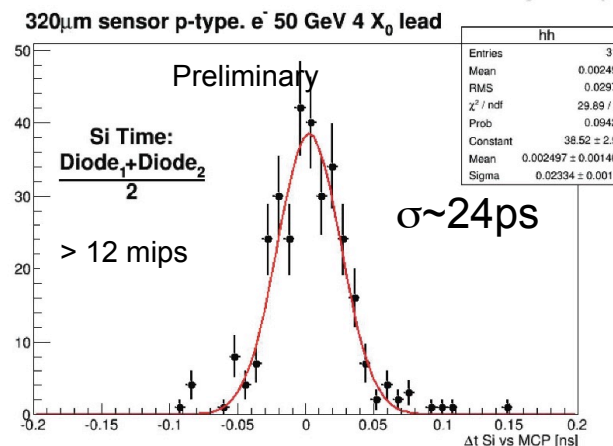
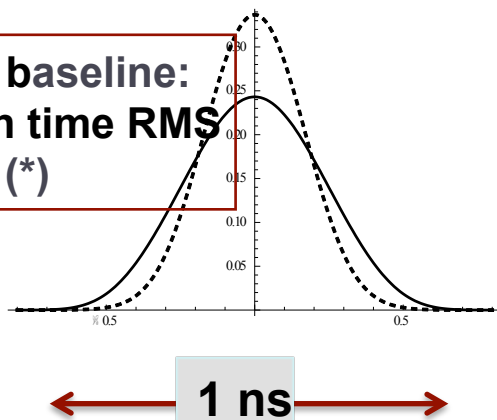
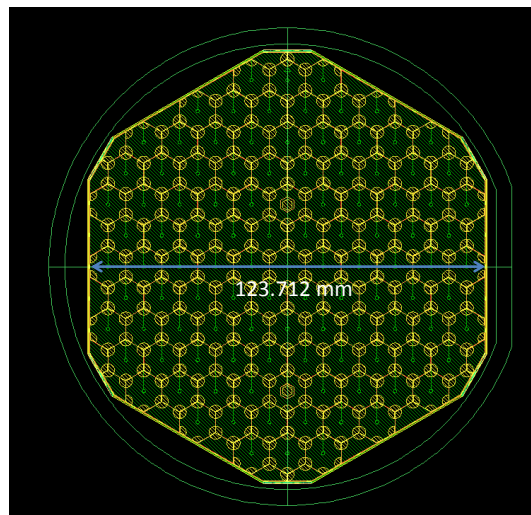
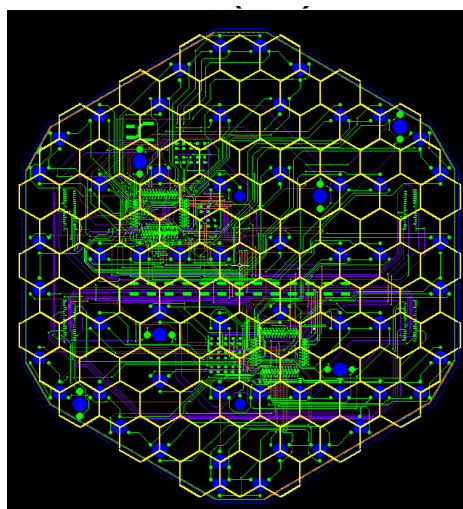


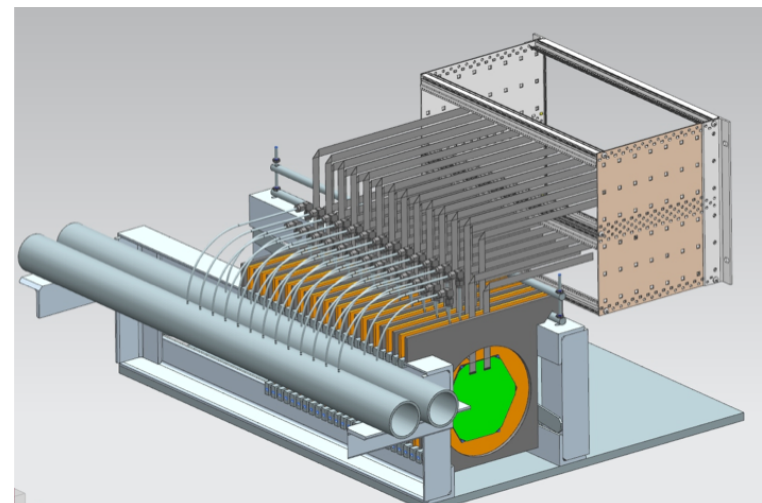
Figure 11: The intrinsic signal response timing resolution of the HGC SiPAD was demonstrated in the July 2015 test beam with high-gain Cividec amplifiers and measuring the time difference resolution with a pair of sensors for 50 GeV electrons.



Design Détecteurs Si  
Prototypes 6 "  
Livraison fin 2015



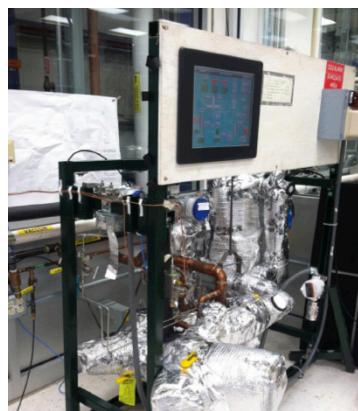
PCB de lecture utilisant  
l'ASIC ILC- SKIROC2  
(en production)



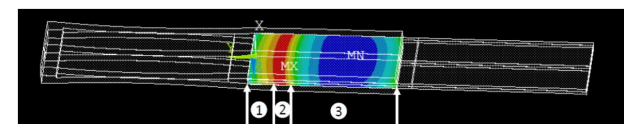
Mécanique pour test  
faisceau prévu mars 2016



Etude thermique d'une cassette avec refroidissement CO2



## Simulations:



① Debonded zone ② Damaged zone ③ Elastic zone

*LMR*

## Tests/Measurements:



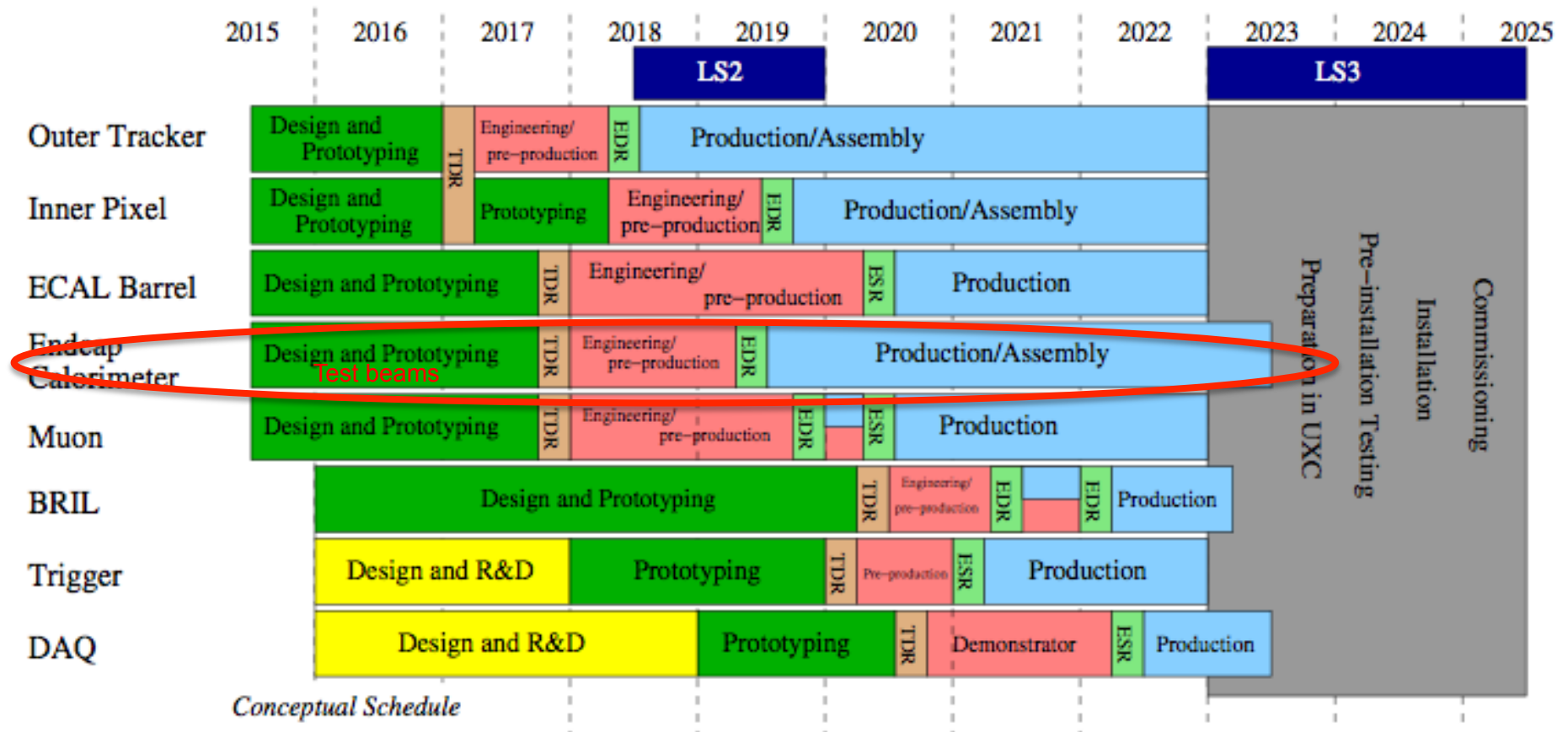
Simulation et tests de qualification  
de matériel (C-epoxy, W...)



date	item
Q4 2015	Premiers détecteurs Si et spécifications préliminaires
début 2016	Architecture et spécifications de l'électronique sur module
Q2 2016	Spécifications du module Si
Q2-Q4 2016	Prototype test faisceau FNAL puis CERN avec électronique existante SKYROC ou modifiée (SKYROC2-CMS)
Q1 2017	Soumission de la version V1 de l'ASIC FE
Q3 2017	Test module HGC avec ASIC V1
Q4 2017	Finalisation spécification détecteur Si
Q4 2017	<b>Technical Design Report</b>
Q2 2018	Soumission de la version V2 de l'ASIC FE
Q4-2018	Test faisceau module HGC avec ASIC V2
Q2 2019	Lancement de la production de détecteurs Si
Q2 2020	Lancement de la production de modules



planning de CMS pour les améliorations HL-LHC (« phase 2 »)



Après la découverte du H(125), mesurer ses couplages avec précision, explorer le secteur scalaire, rechercher d'autres bosons, chercher (ou approfondir !) les causes des propriétés non expliquées par le Modèle Standard sont des tâches essentielles.

Le HL-LHC offre l'opportunité de s'y atteler avec une luminosité intégrée X 10 fois Run 2+3 (et x 100 fois Run 1)  
Cette option a été mise en première priorité pour la Physique des Hautes Energies en Europe (et aussi aux USA).

Des améliorations substantielles de l'accélérateur et des expériences sont nécessaires pour profiter pleinement de ce nouvel environnement.

De par leur positionnement dans CMS mais aussi grâce au R&D effectué dans le laboratoire, les équipes du LLR sont bien positionnées dans ce programme pour y jouer un rôle majeur.