



Lyon 1



La mesure de l'énergie des photons dans CMS

Application à la découverte du boson de Higgs dans le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

Hugues BRUN

Journées Rencontres Jeunes Chercheurs
Barbaste

30 novembre 2009

Sommaire :

- 1 CMS et le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - le LHC et CMS
 - le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$
- 2 la reconstruction des photons dans CMS
 - un photon dans CMS
 - les corrections
- 3 Vérifications des corrections pour les photons
 - La méthode
 - quelques résultats



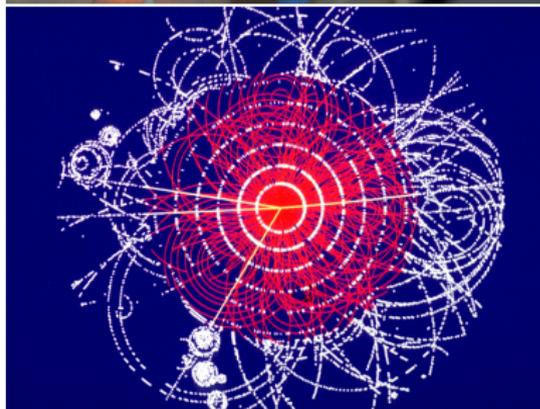
Le Large Hadron Collider



- Situé au CERN près de Genève
- Le plus puissant accélérateur de particules jamais construit
- 27 kilomètres de circonférence
- en cours de redémarrage



Le Large Hadron Collider



- Energie nominale = 14 TeV dans le centre de masse
- Luminosité nominale = $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{-2} \text{ fb}^{-1} \text{ s}^{-1}$

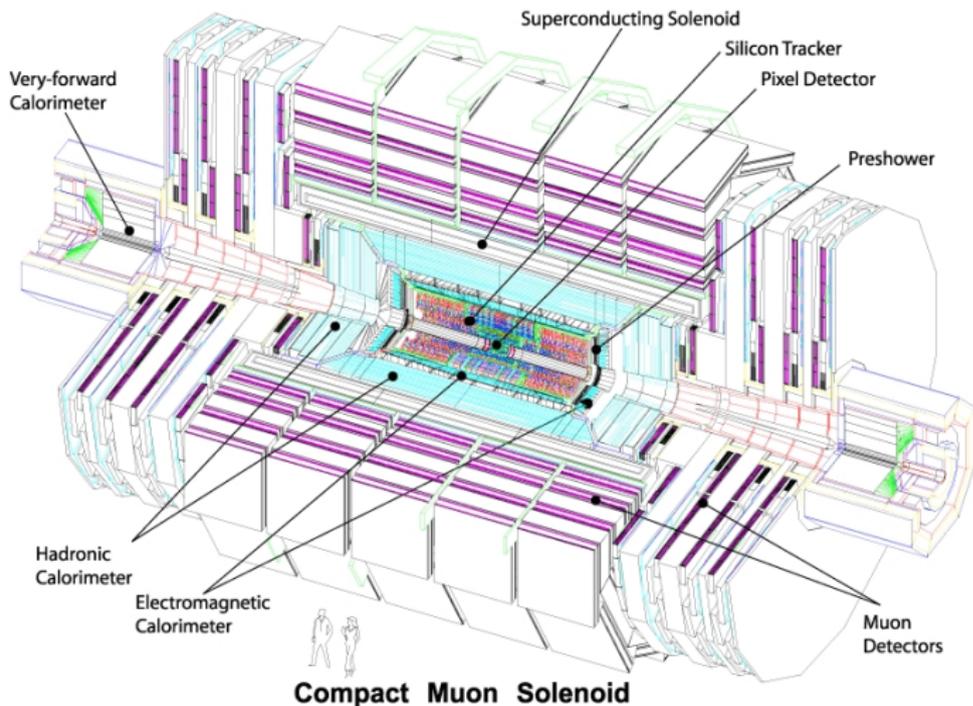
en 2009

- $E > 2 \text{ TeV}$ dans le centre de masse
- Luminosité $< 1 \text{ nb}^{-1} / \text{jour}$

en 2010

- $\rightarrow 5 \text{ TeV}$
- Luminosité maximale $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

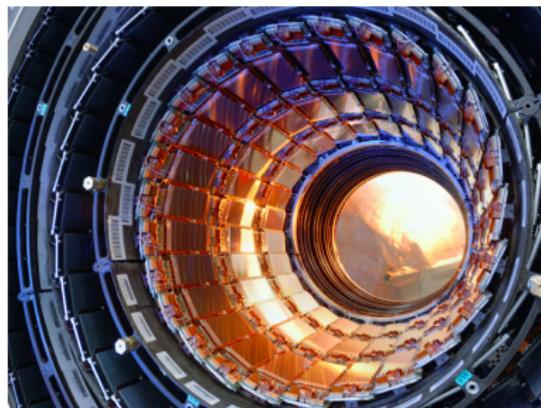
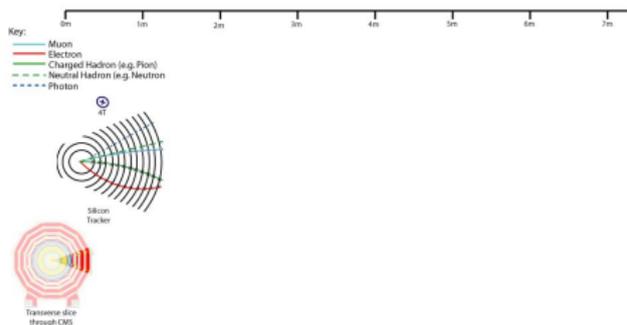
L'expérience CMS



- 21m de haut \times 15 m de large \rightarrow 12000 tonnes
- en deux parties : tonneau (barrel), bouchon (end-caps)



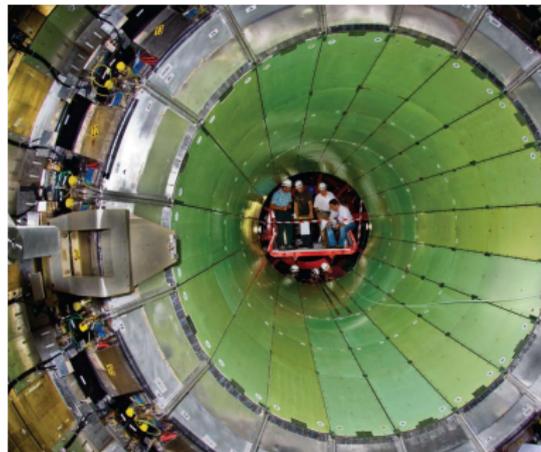
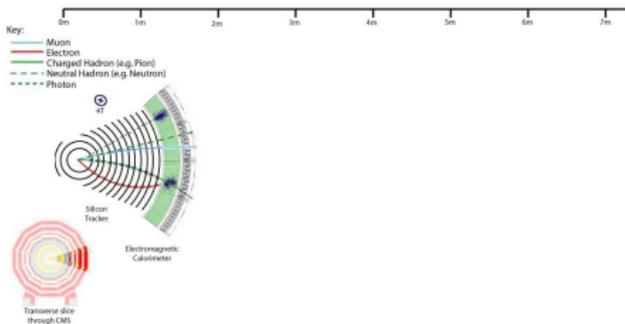
Le trajectographe



- il détecte la trajectoire des particules chargées
- résolution sur la trajectoire jusqu'à $10\mu m$



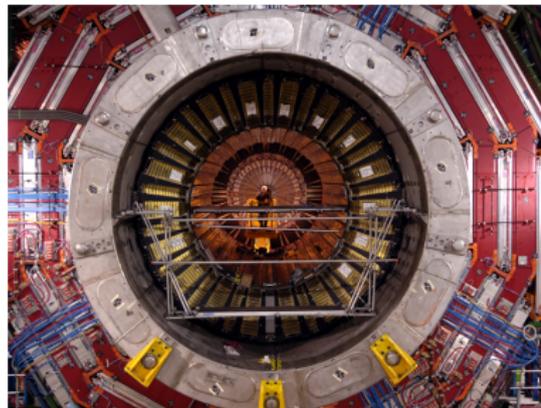
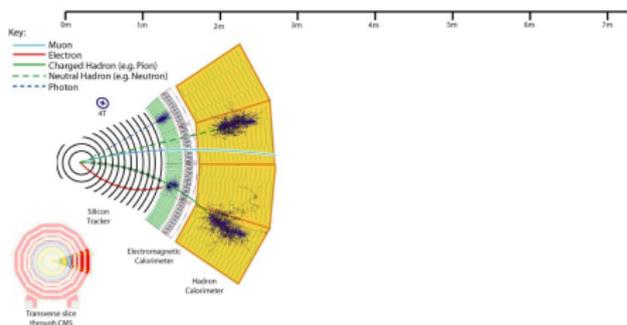
Le calorimètre électromagnétique (ECAL)



- détecte et mesure l'énergie des électrons et des photons
- 78 000 cristaux scintillants de tungstate de plomb



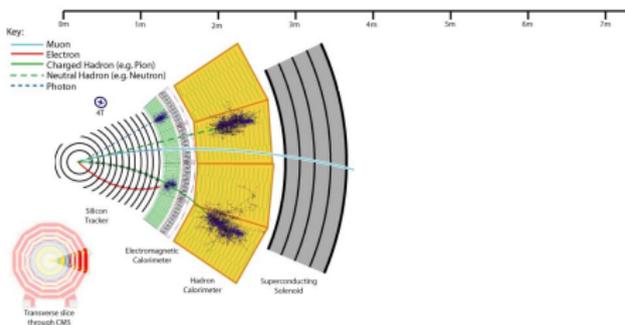
Le calorimètre hadronique (HCAL)



- détecte les hadrons et mesure leur énergie
- calorimètre à échantillonnage composé d'une alternance de plaques de laiton et de scintillateur



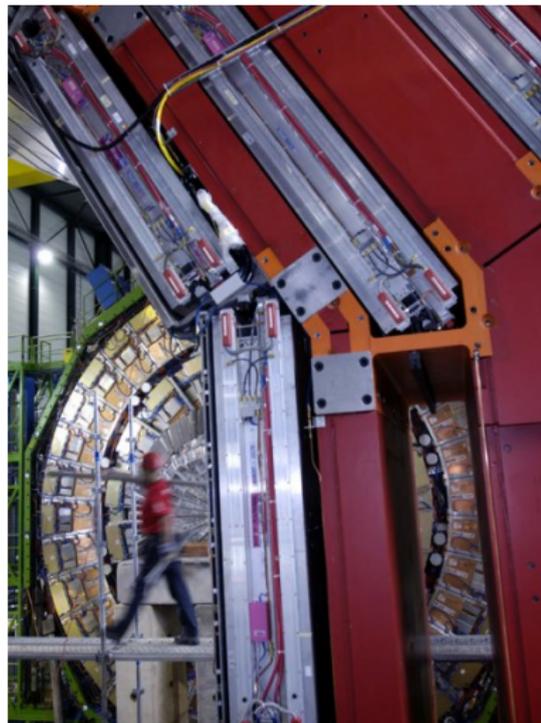
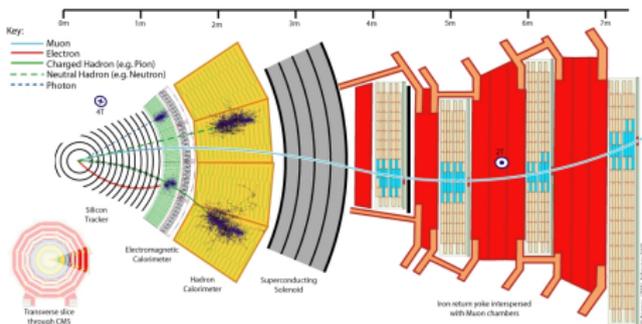
L'aimant



- un aimant supraconducteur de 13 m de long par 6 m de diamètre
- un champ magnétique de 4T \rightarrow 2,7 GJ emmagasinés



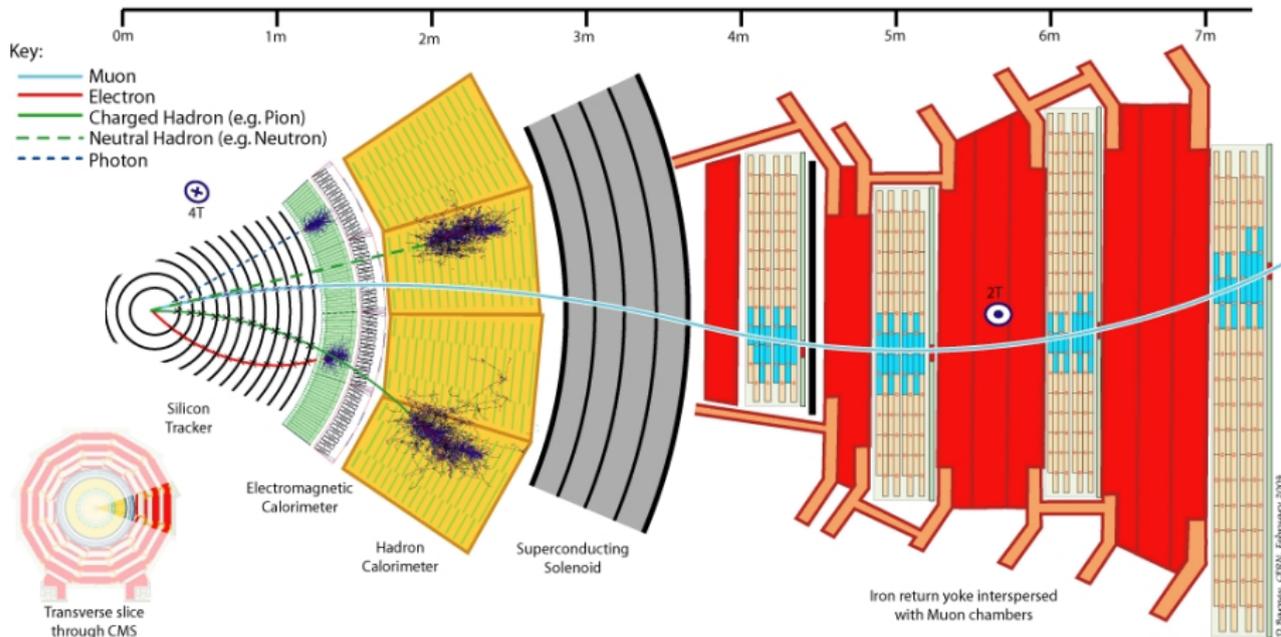
le système à muons



- détecte les muons (trigger) et mesure précisément leur impulsion
- 3 types de détecteurs gazeux (DT/CSC, RPC)

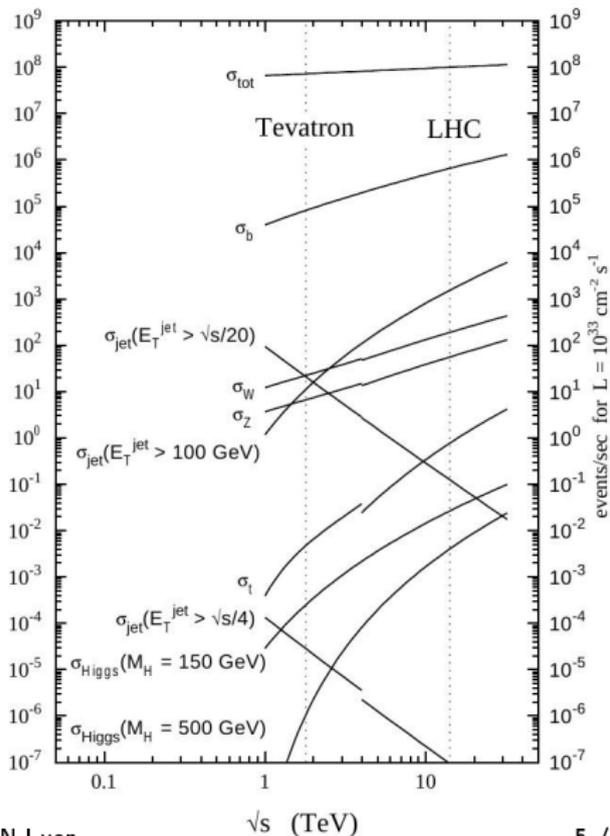


L'expérience CMS



le boson de Higgs au LHC

proton - (anti)proton cross sections

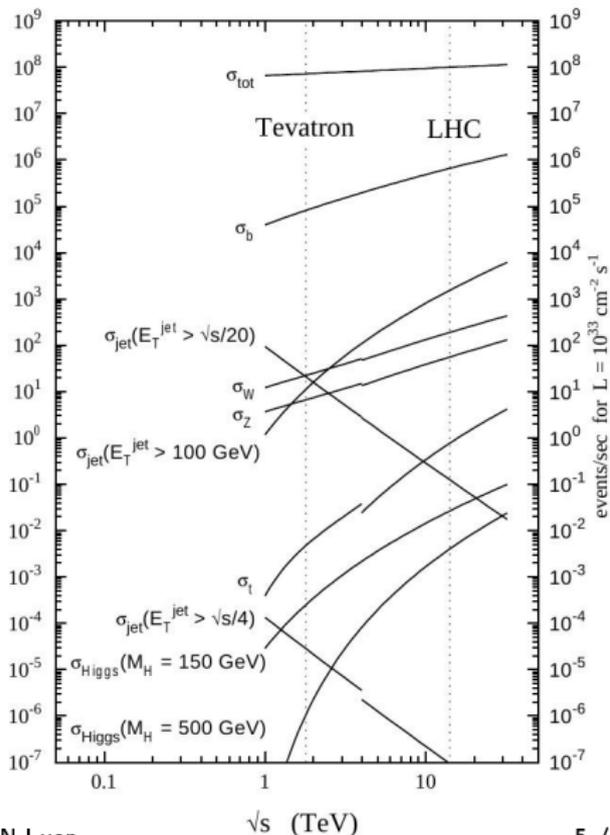


- $\sigma_{\text{proton-proton}} = 100 \text{ mb} \rightarrow \approx 10^9$ interactions par secondes $\rightarrow \approx 20$ interactions par croisement de faisceau
- $\sigma_{\text{higgs}} \approx 10 \text{ pb} \rightarrow 1$ boson de higgs toutes les 10 secondes



le boson de Higgs au LHC

proton - (anti)proton cross sections

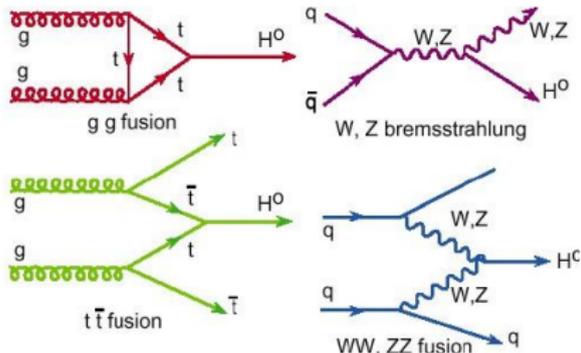


- $\sigma_{\text{proton-proton}} = 100 \text{ mb} \rightarrow \approx 10^9$ interactions par secondes $\rightarrow \approx 20$ interactions par croisement de faisceau
- $\sigma_{\text{higgs}} \approx 10 \text{ pb} \rightarrow 1$ boson de higgs toutes les 10 secondes

En 2010

- au max 5 TeV par faisceau avec une luminosité de $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- un boson de higgs toutes les 10000 secondes (2h45m)

le boson de Higgs au LHC

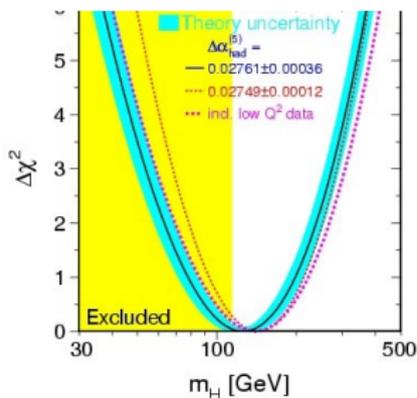


- $\sigma_{proton-proton} = 100 mb \rightarrow \approx 10^9$ interactions par secondes $\rightarrow \approx 20$ interactions par croisement de faisceau
- $\sigma_{higgs} \approx 10 pb \rightarrow 1$ boson de higgs toutes les 10 secondes
- 4 canaux de création du boson de Higgs \rightarrow le canal dominant est celui par fusion de gluons

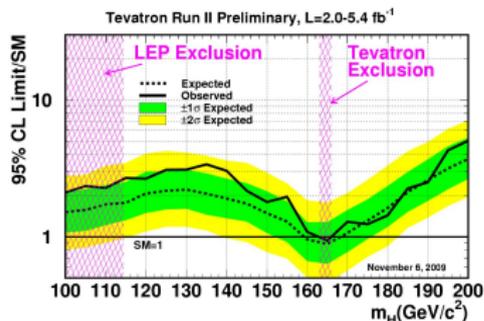
En 2010

- au max 5 TeV par faisceau avec une luminosité de $10^{32} cm^{-2} s^{-1}$
- un boson de higgs toutes les 10000 secondes (2h45m)

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

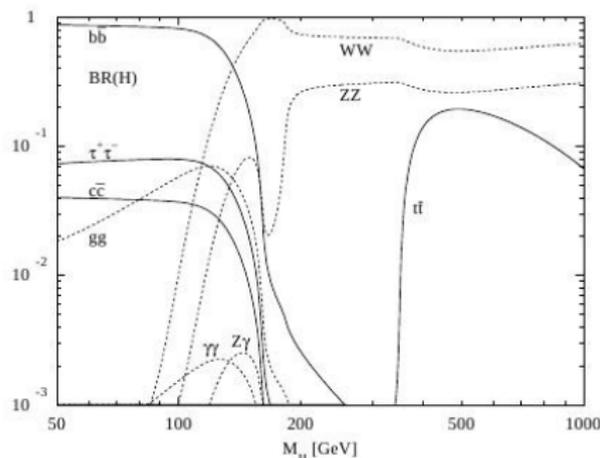


- les fits à partir des autres paramètres du modèle standard vont dans le sens d'un boson de Higgs léger.
- le tevatron a commencé à exclure les masses autour de 160 GeV
- le LEP a exclu les masses inférieures à 112 GeV



On s'attend donc à un boson de Higgs avec une masse autour de 120-130 GeV



Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ 

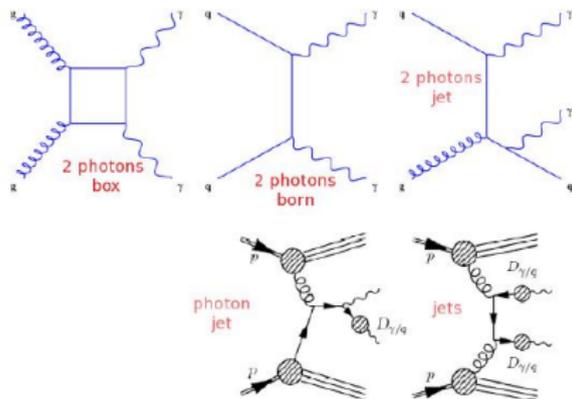
Remarque :

- En 2010, un boson de Higgs en 2 photons tous les 57 jours !

- le canal le plus facile à exploiter pour des masses du boson de Higgs < 130 GeV
- problème : son rapport de branchement ; $Br = 0.002$



L'analyse $H \rightarrow \gamma\gamma$

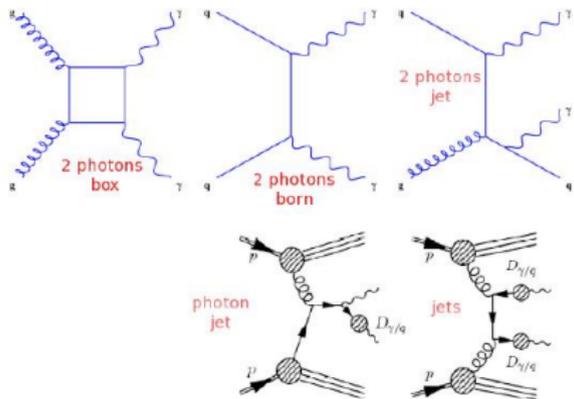


- peu de signal ...
- mais un bruit de fond copieux !
- Principe de l'analyse par coupure : coupures sur l'isolation des photons + coupures sur leurs énergies

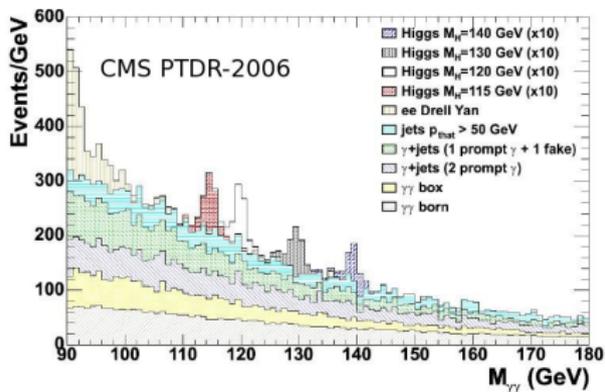
| Processus | σ 1er ordre (pb) |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| $pp \rightarrow \gamma\gamma$ (born) | 82 |
| $pp \rightarrow \gamma\gamma$ (box) | 82 |
| $pp \rightarrow \gamma + jet$ | 5×10^4 |
| $pp \rightarrow jets$ | 2.8×10^7 |



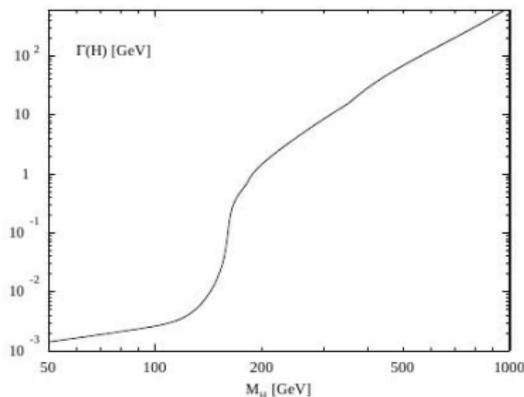
L'analyse $H \rightarrow \gamma\gamma$



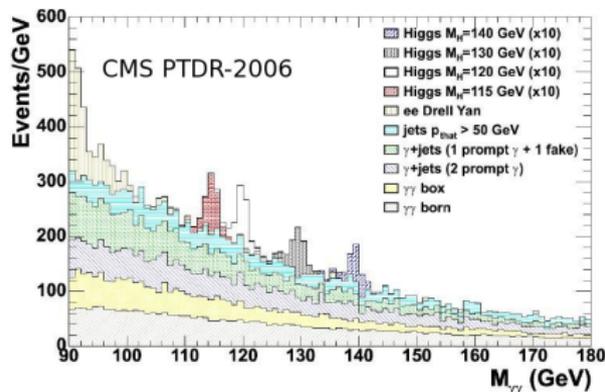
- peu de signal ...
- mais un bruit de fond copieux !
- Principe de l'analyse par coupure : coupures sur l'isolation des photons + coupures sur leurs énergies



L'analyse $H \rightarrow \gamma\gamma$



- peu de signal ...
- mais un bruit de fond copieux !
- Principe de l'analyse par coupure : coupures sur l'isolation des photons + coupures sur leurs énergies



Importance de la résolution en énergie

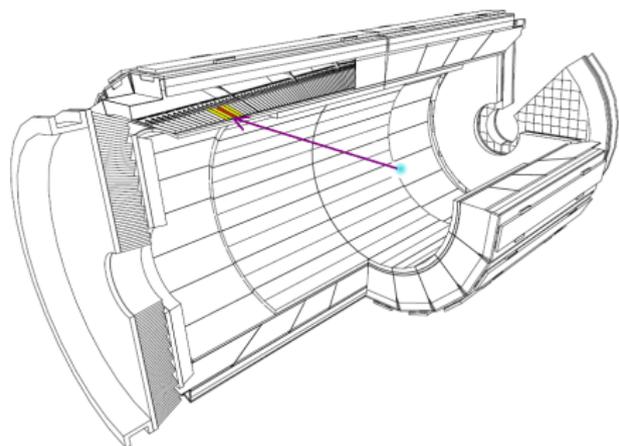
- vers 120 GeV, la largeur du pic du Higgs est totalement dominée par la résolution sur l'énergie des photons
- gain de résolution = gain de signficance

Sommaire :

- 1 CMS et le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - le LHC et CMS
 - le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$
- 2 la reconstruction des photons dans CMS
 - un photon dans CMS
 - les corrections
- 3 Vérifications des corrections pour les photons
 - La méthode
 - quelques résultats



Un photon dans CMS



- produit au point d'interaction
- Le photon arrive dans le calorimètre électromagnétique et y dépose son énergie sous la forme d'une gerbe électromagnétique
- l'électronique récupère une intensité lumineuse proportionnelle à l'énergie du photon

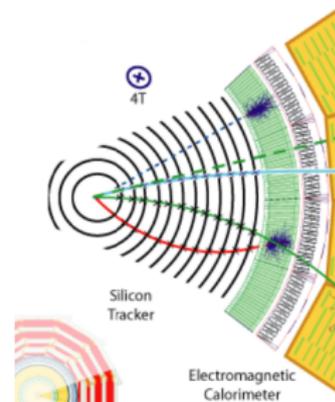
la réalité est plus compliquée à cause de la présence du trajectographe ...

- environ un photon sur deux va se convertir dans le trajectographe en une paire $e^+ e^-$



Un photon dans CMS

- si non converti
 - pas de trace dans le trajectographe
 - une gerbe dans le ECAL
- si converti
 - deux, un ou zéro trace dans le trajectographe
 - une ou deux gerbes dans le ECAL

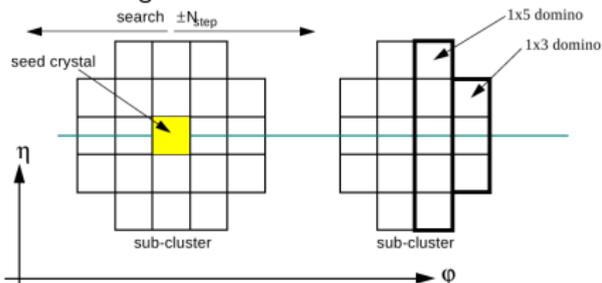


importance des conversions :

- près de la moitié des photons (importance statistique)
- difficiles à reconstruire
- la probabilité de conversion dépend de la densité de matière : radiographie du détecteur.
- les traces des électrons sont tangentes à la direction du photon (→ vertex d'interaction)
- variables spéciales (R_{conv} , $\frac{E_{calo}}{P_{track}}$, ...) (→ aide pour l'analyse)

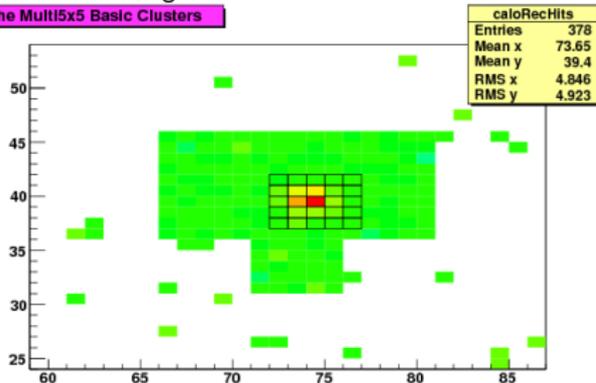
La clusterisation dans le calorimètre l'électromagnétique

hybrid clustering :



multi5x5 clustering :

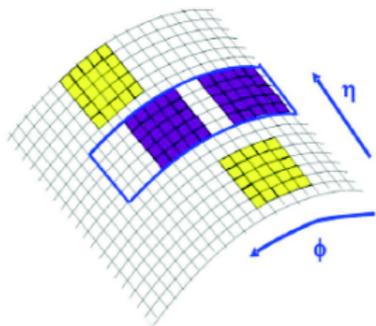
the Multi5x5 Basic Clusters



- but de la clusterisation : reconnaître les cristaux d'une même gerbe et additionner les énergies.
- difficulté : récupérer le maximum de l'énergie de la gerbe en évitant un maximum celle du bruit de fond.
- dans le tonneau, l'algorithme de clusterisation est "hybrid"
- dans les bouchons, l'algorithme de clusterisation est "multi5x5"



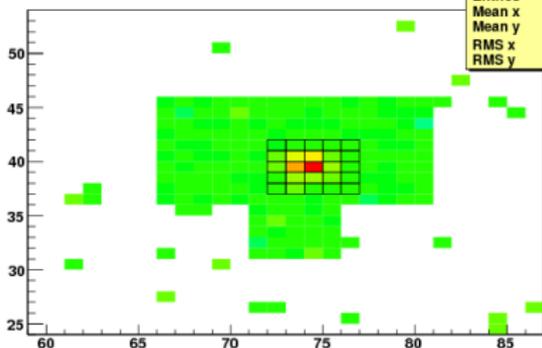
La clusterisation dans le calorimètre l'électromagnétique



clustering :

multi5x5

the Multi5x5 Basic Clusters



| caloRecHits | |
|-------------|-------|
| Entries | 378 |
| Mean x | 73.65 |
| Mean y | 39.4 |
| RMS x | 4.846 |
| RMS y | 4.923 |

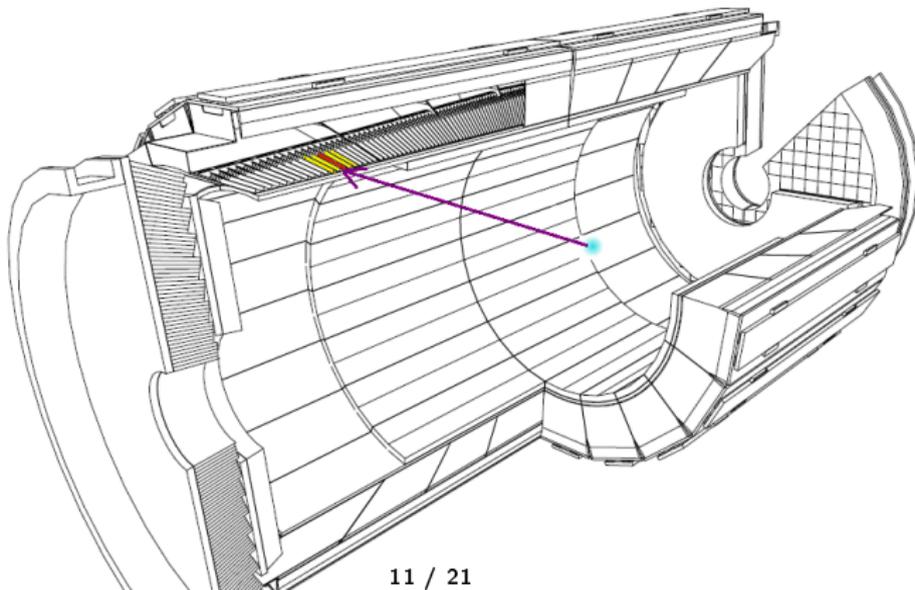
- les basics clusters sont agglomérés en un super cluster (récupération des brem)



Les photons dans CMSSW

$$R_9 = \frac{E_{3 \times 3}}{E_{SC}}$$

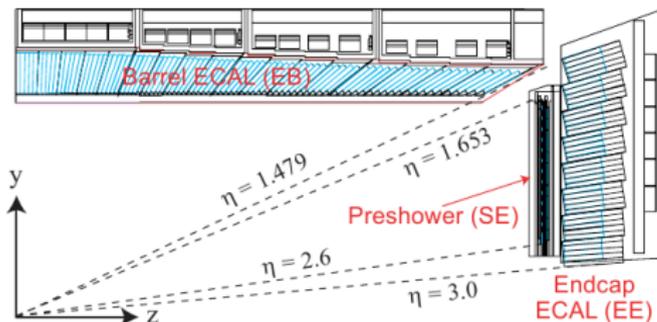
| | $R_9 < 0.93$ | $R_9 > 0.93$ |
|-----------|-------------------------|---|
| direction | position du SC - vertex | position de la germe avec corrections - vertex |
| energie | energie du SC | matrice 5x5 autour de la germe |

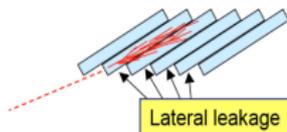


La correction $f(\eta)$

Qu'est ce que η ?

$\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$ où θ est l'angle entre la direction et le tube du faisceau :
c'est la rapidité selon l'axe du faisceau pour une particule ultrarelativiste ...



La correction $f(\eta)$ 

Jingzhi Zhang et al

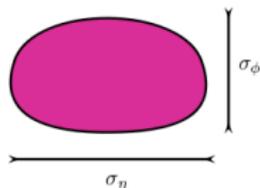
- corriger la perte latérale d'énergie des cristaux dans le tonneau.
- seulement dans le tonneau
- mesurée en faisceau test
- avec une bonne approximation la même pour les photons et les électrons



La correction f(brem)

Yourii Mavarin (Kansas state university)

- Pour corriger la perte d'énergie par bremsstrahlung due à la réponse de la clusterisation
- le bremsstrahlung est paramétrisé avec $brem = \frac{\sigma_\phi}{\sigma_\eta}$
 - σ_ϕ augmente avec le bremsstrahlung.
 - σ_η augmente avec la taille de la gerbe (normalisation en énergie)
- calculée pour les électrons



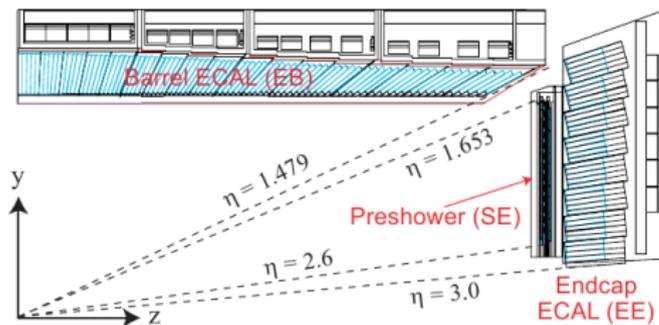
$$\sigma_\phi = \sum_{i \in \text{canaux}} \sqrt{\frac{E_i}{E_{SC}} (\phi_i - \phi_{SC})^2}$$

$$\sigma_\eta = \sum_{i \in \text{canaux}} \sqrt{\frac{E_i}{E_{SC}} (\eta_i - \eta_{SC})^2}$$



$$f(E_t, \eta)$$

- pour corriger non linéarité de la distribution matérielle et la dépendance en énergie



Bilan sur les corrections

- Les corrections sont calculées avec des monte carlo pour des électrons → que donne t'elles pour des photons ?
- Les corrections pour les électrons peuvent être vérifiées au démarrage du LHC avec des événements $Z \rightarrow ee$
- pour les photons on dispose des processus $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ → mais pas dans la gamme d'énergie des photons du boson de Higgs
- $Z \rightarrow \mu\mu\gamma$: assez faible statistique → bon pour donner l'échelle d'énergie des photons

importance de vérifier que photon converti et électron se corrigent de la même manière !



Sommaire :

- 1 CMS et le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - le LHC et CMS
 - le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$
- 2 la reconstruction des photons dans CMS
 - un photon dans CMS
 - les corrections
- 3 Vérifications des corrections pour les photons
 - La méthode
 - quelques résultats



La distribution de crystal-ball

un peu d'histoire : L'expérience Crystall-Ball

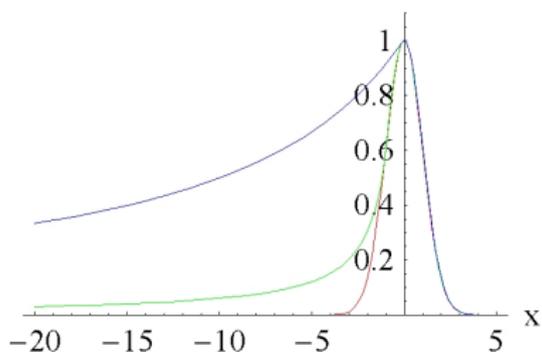


- un icosaèdre de cristaux de NaI
- construit dans les années 70' pour SPEAR à Stanford (mesure du J/ψ)
- utilisé plus tard à DESY, Broockhaven et maintenant à MAMI à Mayence



La distribution de crystal-ball

Crystal Ball Function



rouge : $\alpha = 10$ vert : $\alpha = 1$ bleu : $\alpha = 0.1$

back

expression mathématique

$f(x; \alpha, n, \bar{x}, \sigma) =$

$$N \times \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) & \text{si } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} > -\alpha \\ A \times \left(B - \frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^{-n} & \text{si } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases}$$

avec

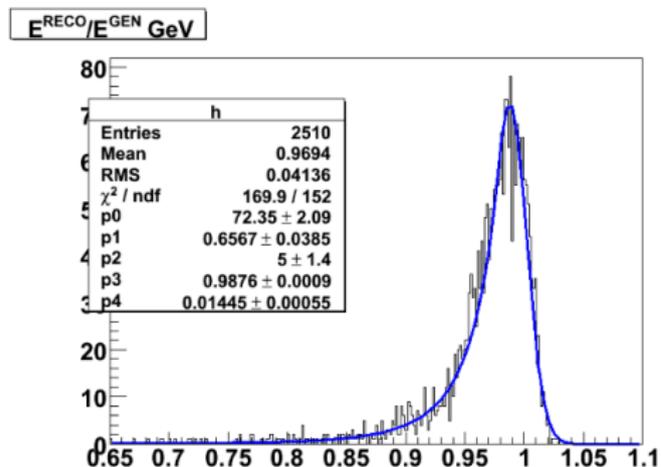
$$A = \left(\frac{n}{|\alpha|}\right)^n \exp\left(-\frac{|\alpha|}{2}\right)$$

et

$$B = \frac{n}{|\alpha|} - |\alpha|$$



Méthode de vérification

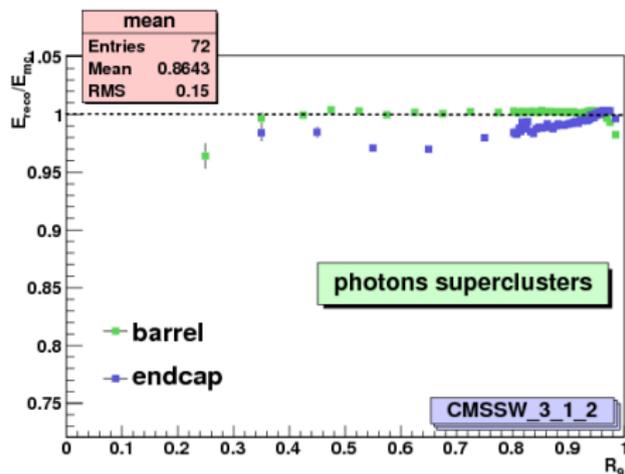


- On prend un échantillon d'événement diphoton
- on le divise en catégories de la variable à étudier par exemple R_9
- pour chaque catégorie, $\frac{E_{reco}}{E_{MC}}$ est ajusté par une fonction de crystal-ball

- on obtient une valeur moyenne de $\frac{E_{reco}}{E_{MC}}$ et l'erreur sur celle-ci.



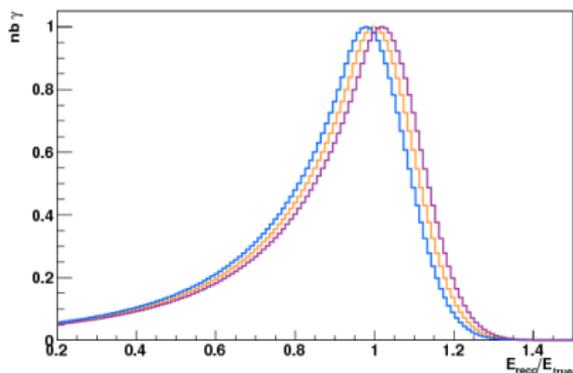
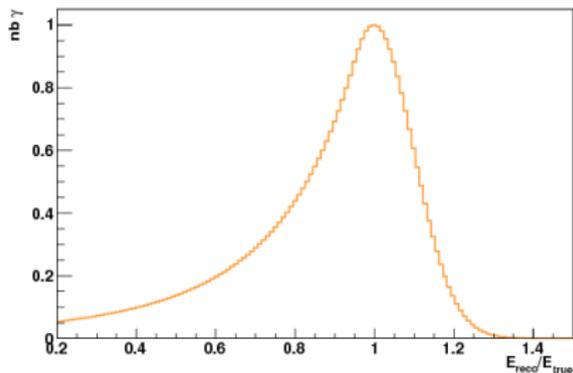
Méthode de vérification



- il est maintenant possible de tracer $\frac{E_{reco}}{E_{MC}}(R_0)$
- on s'attend à trouver tous les points à la valeur 1



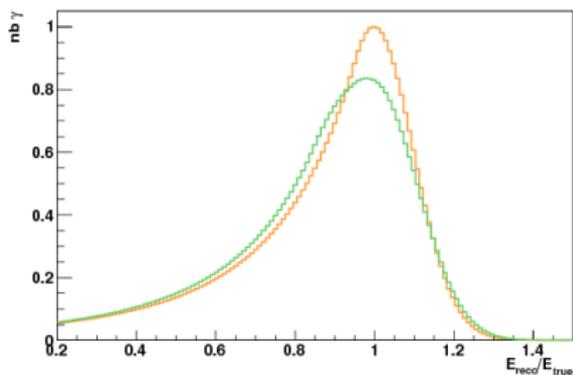
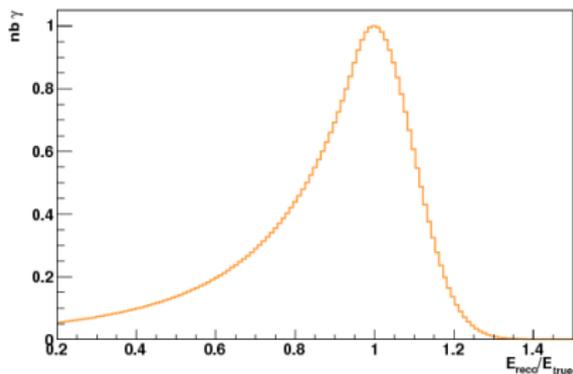
Pourquoi les courbes doivent être plates



- La somme de fonctions de Cristal-Ball avec une bonne résolution donne une cristal-ball avec une mauvaise résolution



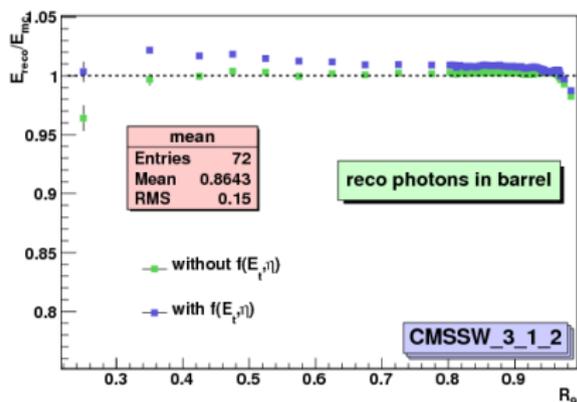
Pourquoi les courbes doivent être plates



- La somme de fonctions de Cristal-Ball avec une bonne résolution donne une cristal-ball avec une mauvaise résolution



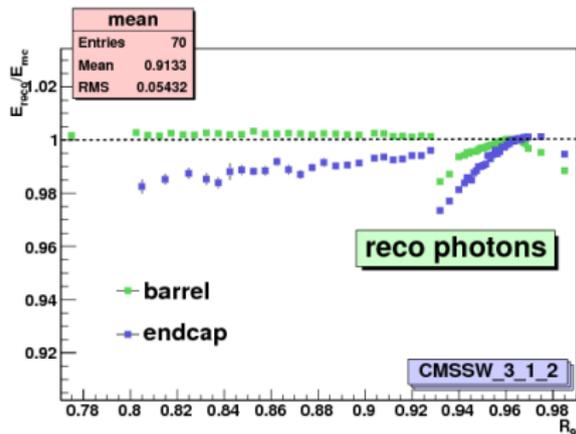
Quelques résultats :



- la correction $f(E_t, \eta)$ surcorrige les photons convertis dans le tonneau
- elle diminue aussi beaucoup la résolution
- → nécessité de mieux comprendre la différence entre photons convertis et électrons



Quelques résultats :



- important décrochage à $R_9 = 0.93$
- cause = une matrice 5x5 ne récupère pas toute l'énergie du photon à $R_9 = 0.93$
- on a envie de remonter le seuil MAIS la résolution du 5x5 est bien meilleure que celle du SC corrigé
- après une étude approfondie $R_9 = 0.94$ dans le tonneau et $R_9 = 0.95$ dans les bouchons



Conclusion

- utilisation des premières données à partir des événements $Z \rightarrow ee$
- méthode “tag and probe” pour la reconstruction des conversions
- implémentation des fonctions de correction mesurées en faisceau test
- ...

