

$H \rightarrow \gamma\gamma$ dans le détecteur ATLAS au LHC

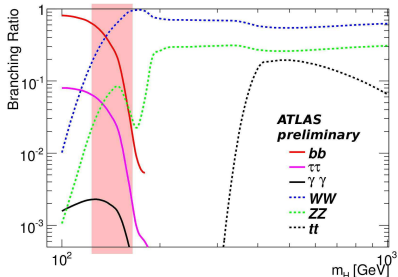
Jean-François MARCHAND

Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules

Journées Jeunes Chercheurs - 03/12/2008

Introduction

- $H \rightarrow \gamma\gamma$ est l'un des canaux de découverte les plus prometteurs pour un boson de Higgs du MS dans la région de basse masse ($114 < m_H < 150\text{GeV}$)



- Petit rapport de branchement ($\approx 2.2 \cdot 10^{-3}$ pour $m_H = 120\text{GeV}$)

MAIS

- Signature simple
- Très bonne résolution en masse ($\approx 1.5\text{GeV}$)

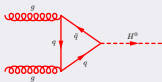
→ Nécessite une bonne reconstruction-identification des photons
→ Bonne manipulation des conversions
→ Bonne mesure de la direction des photons

- Corrections QCD d'ordre supérieur considérées pour signal et bruit de fond
- Contribution de la fragmentation des partons durs en photons prise en compte
- Analyse inclusive et production de 2 photons en association avec des jets
- Signification statistique : fit de max. de likelihood vs comptage d'évènements
- Etudes basées sur une simulation MC réaliste du détecteur

Signal et bruit de fond

Production du boson de Higgs

- gg fusion



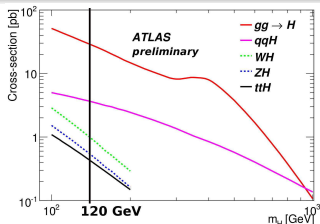
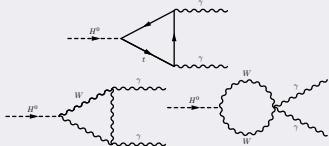
- Vector Boson Fusion (VBF)



- Production associée avec W, Z ou $t\bar{t}$

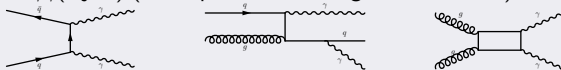


Signal



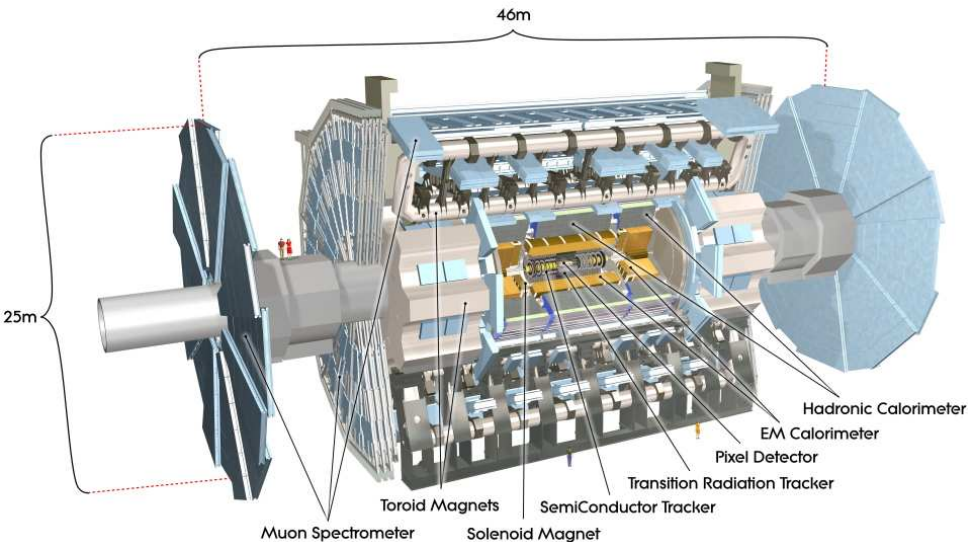
Bruit de fond

- Irréductible : $\gamma\gamma$ (+jets) (Born, processus de fragmentation, box)



- Réductible : γ /jet(s), jet(s)/jet(s)

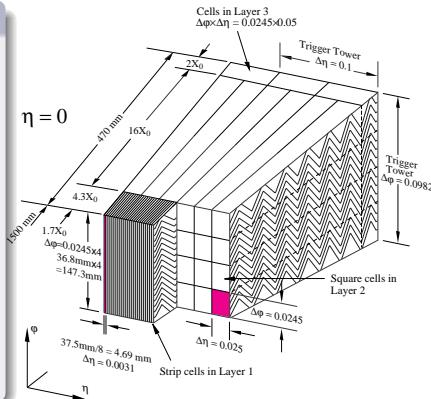
Le détecteur ATLAS



Reconstruction et identification des photons

Reconstruction et calibration

- En partant de clusters EM
(Barrel : 3×7 en $\eta \times \phi$ pour photons convertis, 3×5 pour les photons non convertis, EndCap : 5×5)
- Position des clusters corrigée pour les biais systématiques connus
- Energie reconstruite en utilisant des poids longitudinaux pour corriger :
 - Pertes d'énergie devant le calorimètre
 - Fuites longitudinal
 - Pertes d'énergie en dehors du cluster
- Des poids différents sont appliqués pour les photons convertis et non convertis



Identification et isolation

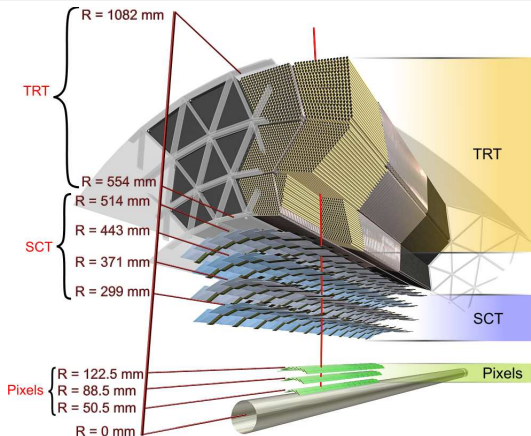
- Pour réduire le bruit de fond des jets en dessous du bruit de fond irréductible
- **Identification utilisant des coupures** (sur la forme des gerbes EM)
 - Second compartiment et calorimètre hadronique : Réjection des jets par large gerbes
 - Segmentation fine du premier compartiment : Séparation γ/π^0
- **Isolation** (utilisant les traces)

Reconstruction des conversions

- Etudes Monte Carlo :

→ 57% des $H \rightarrow \gamma\gamma$ avec ≥ 1 conversion avec $R_{\text{conv}} < 800\text{mm}$ (qui correspond \approx au dernier point où l'on peut espérer reconstruire une trace)

→ 35% des $H \rightarrow \gamma\gamma$ avec ≥ 1 conversion avec $R_{\text{conv}} < 350\text{mm}$ (Reconstructibles avec la version du software utilisé)



- 2 types de photons convertis sont utilisés :



- **Conversions à deux traces**

→ Reconstituées par un algorithme de vertexing utilisant 2 traces de charges opposées



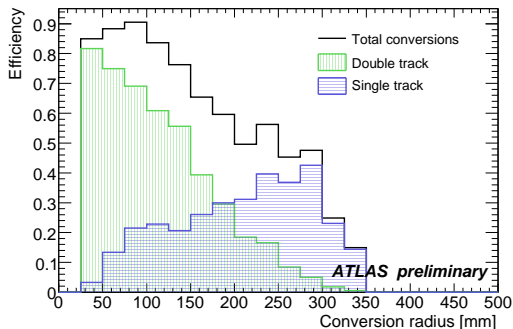
- **Conversions à une trace**

→ Une des 2 traces non reconstruite par le détecteur ou échec de vertexing

→ Séparation électrons primaires / électrons de conversion par le signal dans la première couche de pixel

Reconstruction des conversions

- Efficacité de reconstruction $\approx 66.4\%$ pour conversions avec $R_{\text{conv}} < 400\text{mm}$



- ⇒ Ajouter les photons convertis permet de gagner $\approx 21\%$ d'évènements $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $\approx 14\%$ de conversions à 2 traces
 - $\approx 7\%$ de conversions à 1 trace

Pointing - Vertex primaire

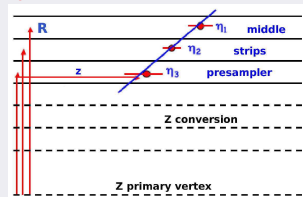
- **Mesure précise de la position du vertex primaire** très importante pour améliorer la résolution en masse du Higgs
- **Méthode itérative pour mesurer la direction des photons**

Fit linéaire utilisant :

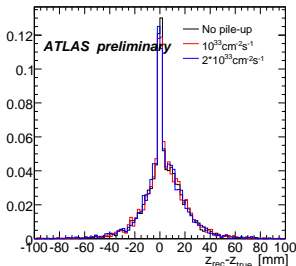
→ Structure multi-couche du **calorimètre EM**

→ Position du **vertex de conversion** quand c'est possible

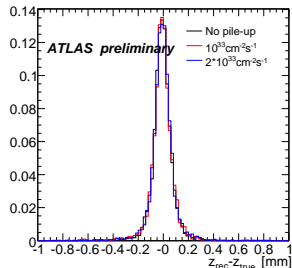
→ Et position du **vertex primaire reconstruit** par le tracker et choisi parmi les vertex à haute luminosité



$Z_{rec} - Z_{true}$
SANS
vertex primaire
reconstruit
 $\sigma_{queues} = 8\text{mm}$

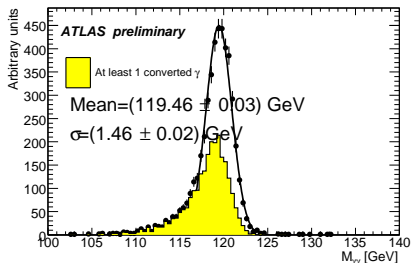


$Z_{rec} - Z_{true}$
AVEC
vertex primaire
reconstruit
 $\sigma_{pic} = 0.07\text{mm}$



Masse invariante et résolution

- Résolution en masse déterminée par fit Gaussien assymétrique ($[-2\sigma, +3\sigma]$)

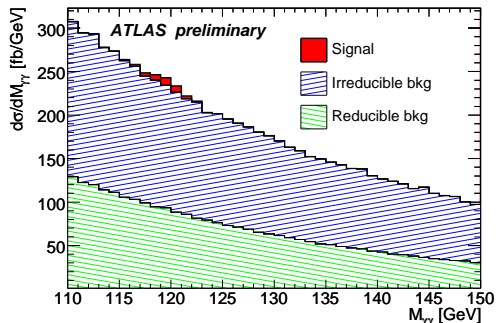


m_H	120GeV		130GeV	
	No pileup	Pileup	No pileup	Pileup
Mass fitted (GeV)	119.46	119.47	129.47	129.41
σ_m (GeV)	1.46	1.52	1.54	1.62

- Décalage en masse dû aux photons convertis
- La résolution en masse relative σ_m/m est proche de 1.2% et dégradée de quelques % quand on ajoute du pile-up $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

Analyse inclusive

- $0 < |\eta| < 1.37$, $1.52 < |\eta| < 2.37$ (motivés par l'identification offline des photons)
⇒ Aussi utilisé pour les analyses H+1jet et H+2jets
- $p_T^{\gamma_1} > 40\text{GeV}$, $p_T^{\gamma_2} > 25\text{GeV}$ (obtenus par des études d'optimisation)



Sections efficaces attendues :

σ_{signal}	25.4 fb
$\sigma_{\text{background}}$	947 fb

dans une fenêtre de masse $m_{\gamma\gamma} \pm 1.4\sigma$

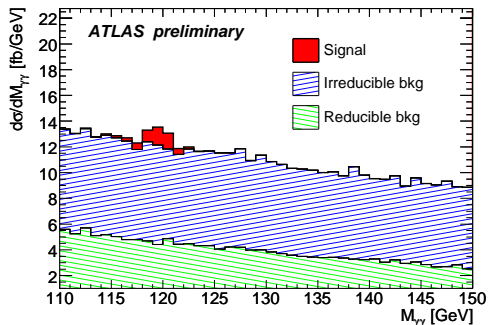
$$S/B = 0.02$$

K-facteur appliqué : $K_{\gamma j} = 2.1$ et $K_{jj} = 1.3$

Analyse H+1jet

Le jet principal dans $gg \rightarrow Hj$ et VBF tend à être plus dur et mieux séparé de $\gamma\gamma$ que pour le bruit de fond

- $p_T^{\gamma_1} > 45\text{GeV}$, $p_T^{\gamma_2} > 25\text{GeV}$
- ≥ 1 jet hadronique avec $p_T^{\text{jet}} > 20\text{GeV}$ en $|\eta| < 5$ (motivé par les possibilités de calibration des jets hadroniques dans ATLAS)
- $m_{\gamma\gamma\text{jet}} > 350\text{GeV}$



VBF + jets suppl. de $gg \rightarrow H$

Sections efficaces attendues :

	Inclusive	H+1jet
σ_{signal}	25.4 fb	4.0 fb
$\sigma_{\text{background}}$	947 fb	49 fb

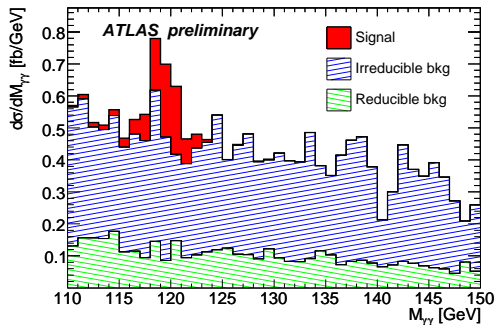
dans une fenêtre de masse

$$m_{\gamma\gamma} = 120 \pm 2\text{GeV}$$

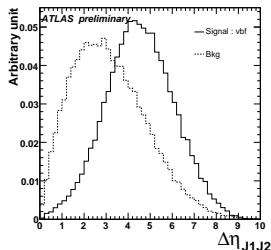
$$S/B = 0.08$$

Analyse H+2jets

- $p_T^{\gamma_1} > 50\text{GeV}$, $p_T^{\gamma_2} > 25\text{GeV}$
- ≥ 2 jets hadroniques avec $p_T^{\text{jet}_1} > 40\text{GeV}$, $p_T^{\text{jet}_2} > 20\text{GeV}$ avec $|\eta| < 5$
- Jets dos à dos : $\eta_1\eta_2 < 0$ (au LO, le processus VBF produit 2 jets de grand p_T et vers l'avant dans les hémisphères opposés)
- $\Delta\eta_{jj} > 3.6$
- $m_{jj} > 500\text{GeV}$
- Photons entre les jets
- Veto sur jet central : $p_T > 20\text{GeV}$, $|\eta| < 3.2$

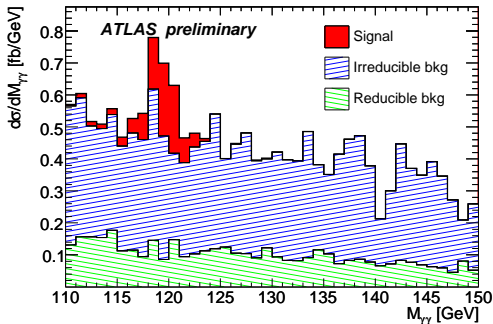


Principalement VBF



Analyse H+2jets

- $p_T^{\gamma_1} > 50\text{GeV}$, $p_T^{\gamma_2} > 25\text{GeV}$
- ≥ 2 jets hadroniques avec $p_T^{\text{jet}_1} > 40\text{GeV}$, $p_T^{\text{jet}_2} > 20\text{GeV}$ avec $|\eta| < 5$
- Jets dos à dos : $\eta_1\eta_2 < 0$ (au LO, le processus VBF produit 2 jets de grand p_T et vers l'avant dans les hémisphères opposés)
- $\Delta\eta_{jj} > 3.6$
- $m_{jj} > 500\text{GeV}$
- Photons entre les jets
- Veto sur jet central : $p_T > 20\text{GeV}$, $|\eta| < 3.2$



Principalement VBF

Sections efficaces attendues :

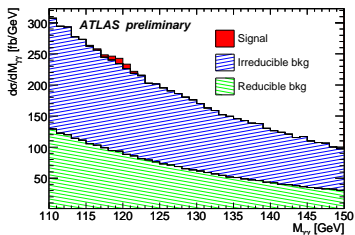
	Inclusive	H+1jet	H+2jets
σ_{sig}	25.4 fb	4.0 fb	0.97 fb
σ_{bkg}	947 fb	49 fb	1.95 fb

dans une fenêtre de masse

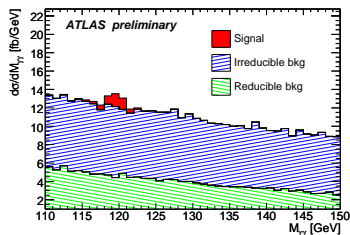
$$m_{\gamma\gamma} = 120 \pm 2\text{GeV}$$

$$S/B = 0.5$$

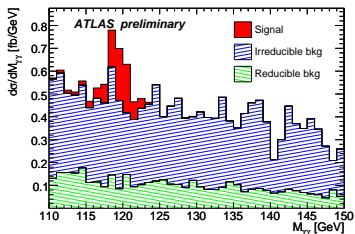
Analyse inclusive, H+1jet, H+2jets - Résumé



$$S/B_{\text{Inclusive}} = 0.02$$



$$S/B_{H+1jet} = 0.08$$



$$S/B_{H+2jets} = 0.5$$

Sections efficaces attendues :

	Inclusive	H+1jet	H+2jets
σ_{sig}	25.4 fb	4.0 fb	0.97 fb
σ_{bkg}	947 fb	49 fb	1.95 fb

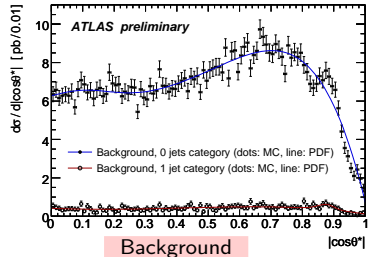
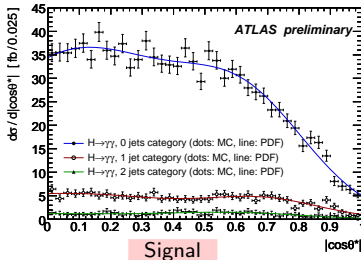
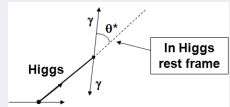
Maximum-likelihood fit

- Fit multivariable du max. likelihood

→ Utilise les informations discriminantes des propriétés cinématiques et topologiques de $H \rightarrow \gamma\gamma$

Variables du fit

- $m_{\gamma\gamma}$
- PT_{Higgs}
- $|\cos\theta^*|$ où θ^* est l'angle de désintégration du Higgs



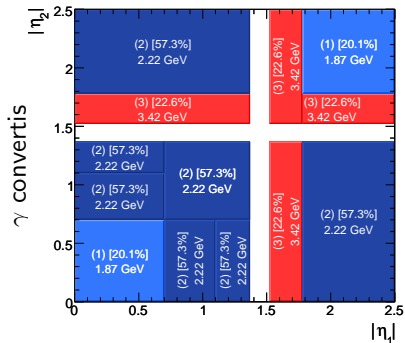
Maximum-likelihood fit

Utilisation de catégories pour séparer les données en plusieurs parties

- Sépare des sous-populations d'évènements avec des propriétés différentes
- Les différentes catégories peuvent avoir des valeurs de PDF différentes
- Donne une description fine des données / Réduit les biais de corrélation
⇒ **Augmente la précision du modèle de likelihood**

Catégories du fit

- 3 catégories en η
- catégories pour photons convertis/non-convertis
- 3 catégories de production du Higgs :
H + 0, 1, 2 jets



Potentiel de découverte

- Signification statistique attendue pour 10 fb^{-1} de luminosité intégrée (dans une fenêtre de masse $\pm 1.4\sigma$ autour de m_H)

Avec comptage d'évènements

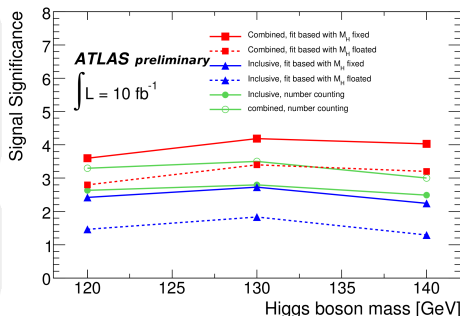
m_H (GeV)	Inclusive	H + 1 jet	H + 2 jets	Combiné
120	2.6	1.8	1.9	3.3
130	2.8	2.0	2.1	3.5
140	2.5	1.8	1.7	3.0

⇒ Signification combinée $\approx 25\%$ plus grande que celle obtenue par l'analyse inclusive

Avec fit

m_H (GeV)	Masse libre	Masse fixée
120	2.8	3.6
130	3.4	4.2
140	3.2	4.0

⇒ Le fit avec masse fixée permet d'augmenter la signification de $\approx 40\%$ par rapport à l'analyse inclusive



Conclusion

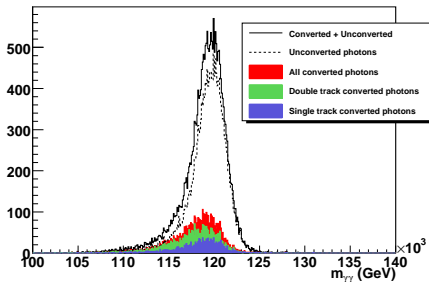
- L'analyse combinée de H+0jet, H+1jet et H+2jets augmente la signification statistique de $\approx 25\%$ par rapport à l'analyse inclusive
- L'utilisation d'un fit de maximum de likelihood a été étudiée pour augmenter la sensibilité
⇒ Augmente la signification statistique de $\approx 40\%$ par rapport à l'analyse inclusive
- Une découverte à 5σ devraient être possible avec une luminosité intégrée de $20\text{-}30\text{fb}^{-1}$
- Beaucoup d'améliorations ont été faites depuis les études précédentes... et beaucoup sont toujours en cours (conversions, pointing, isolation...)

⇒ *Et bien sûr : du travail sera nécessaire pour comprendre les performances du détecteur avec les premières données...*

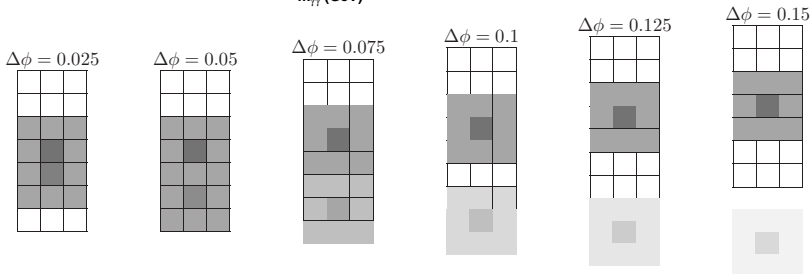
BACKUP

Masse invariante et conversions

Di-photon invariant mass spectrum



- Clusters 3×7 en $\eta \times \phi$ sont utilisés pour les photons convertis
- Ouverture en ϕ des paires électron/positron de conversions
- Perte d'énergie augmente avec $\Delta\phi$, puis re-diminue pour des conversions très asymétriques



Impacts de la paire électron/positron dans un cluster en fonction de $\Delta\phi$

- L1 menu : 2EM13l $\rightarrow \geq 2$ isolated electron or photon candidates with $E_T = 13\text{GeV}$
- L2 and EF : 2g17i - Refine the analysis of L1

Efficiency for the 2g17i menu item to trigger on $H \rightarrow \gamma\gamma$ events with $m_H = 120\text{GeV}$ - Normalized with respect to the offline selection

Trigger Level	2g17i Trigger efficiency
L1	96 ± 0.3
L2 Calo	95 ± 0.4
EF Calo	94 ± 0.4

- Efficiency loss mainly due to the calorimeter isolation at L1 which is not applied in the offline photon selection
- 2g17i should be usable up to luminosities of $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

MC event generation

Signal

- Events generated using PYTHIA : LO matrix element calculation for all processes
- MC@NLO also used to simulate gluon fusion process
- HERWIG also used to model VBF process

⇒ Full detector simulation used

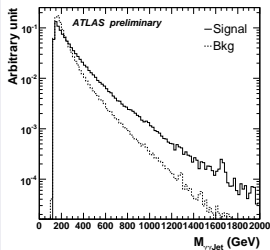
All generated samples used for signal are normalized to the NLO cross-sections taking into account only QCD corrections

Background

Process	σ calculator	Cuts	σ (pb)	Full simulation # of events	Fast simulation # of events
$q\bar{q}, g\bar{g} \rightarrow \gamma\gamma x$	ReBos/ DIPHOX	$80 < m_{\gamma\gamma} < 150\text{GeV}$ $p_{T\gamma} > 25\text{GeV}, \eta < 2.5$	20.9	PYTHIA/ALPGEN 200000/1300000	ALPGEN 1670000
$g\bar{g} \rightarrow \gamma\gamma$	ReBos	$80 < m_{\gamma\gamma} < 150\text{GeV}$ $p_{T\gamma} > 25\text{GeV}, \eta < 2.5$	8.0	PYTHIA 200000	PYTHIA 850000
γj	JETPHOX	$p_{T\gamma} > 25\text{GeV}$	$180 \cdot 10^3$	PYTHIA 3000000	ALPGEN 36700000
jj	NLOJET++	$p_{T\gamma} > 25\text{GeV}$	$477 \cdot 10^6$	PYTHIA 10000000	ALPGEN 37000000

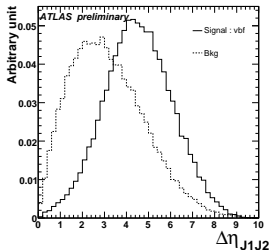
Discriminating variables for H+1, 2 jets analysis

H+1 jet

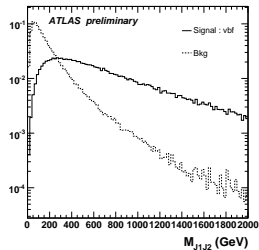


- $m_{\gamma j} > 350\text{GeV}$

H+2 jets



- $\Delta\eta_{jj} > 3.6$
- $m_{jj} > 500\text{GeV}$



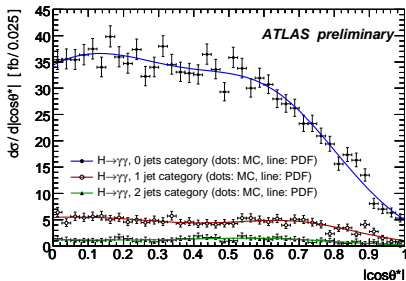
Hfitter Performs unbinned extended maximum likelihood fits, arbitrary number of samples, categories and fit variables (based on RooFit)

$$\text{Likelihood : } L = \prod_{c=1}^{n_{\text{cat}}} e^{-\bar{N}^c} \prod_{i=1}^{N^c} P_i^c$$

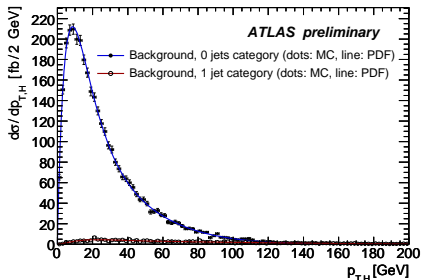
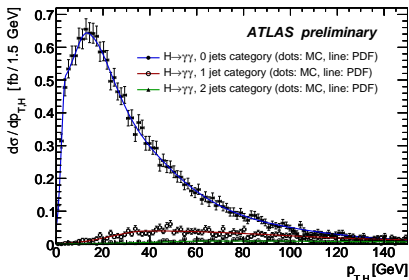
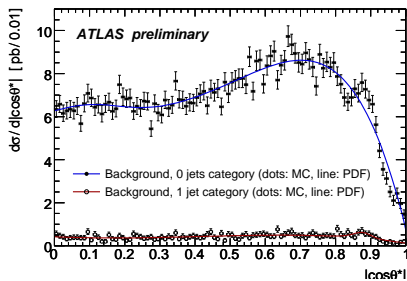
$$\text{with } P_i^c = N_H f_H^c P_{H,i}^c + \sum_{j=1}^{n_{\text{bkg}}} N_{B_j}^c P_{B_j,i}^c \quad \text{and} \quad P_{U_j,i}^c = \prod_{k=1}^{n_{\text{var}}} p_{U_j}^c(x_{k,i}) \quad \text{where } U = H, B_j$$

$$\text{and with } \left\{ \begin{array}{l} N_H : \text{total number of } H \rightarrow \gamma\gamma \text{ events in sample} \\ c : \text{category with distinct properties } (\eta, p_T \text{ region, production mechanism...}) \\ f_H^c : \text{fraction of signal events in category } c \\ N_{B_j}^c : \text{number of background event of type } j \text{ in category } c \\ \bar{N}^c : \text{number of events expected in category } c \\ n_{\text{bkg}} : \text{number of background types } \gamma/\text{jet}, 2\gamma+\text{jet}, \text{di-jet}, \dots \\ p_{U_j}^c(x_{k,i}) : \text{probability density for event } i \text{ in category } c \text{ of type } U \\ \text{for discriminant variable } x_k \end{array} \right.$$

Signal

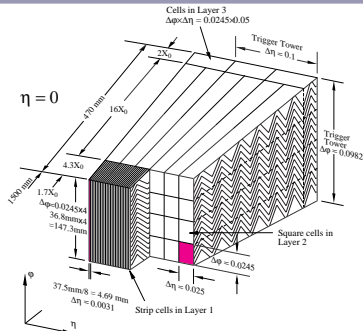


Background



(VBF topology not shown for background because of a too low relative cross-section)

Calorimeter granularity



	$ \eta $ range	Cell η size		Cell ϕ size	
		Layer 1	Layer 2	Layer 1	Layer 2
Barrel	0-1.4	0.025/8	0.025	0.1	0.025
	1.4-1.475	0.025	0.075	0.1	0.025
EndCap	1.375-1.425	0.05	0.05	0.1	0.025
	1.425-1.5	0.025	0.025	0.1	0.025
	1.5-1.8	0.025/8	0.025	0.1	0.025
	1.8-2.0	0.025/6	0.025	0.1	0.025
	2.0-2.4	0.025/4	0.025	0.1	0.025
	2.4-2.5	0.025	0.025	0.1	0.025

Granularity of layer 3 : $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.050 \times 0.025$

$H+E_T^{\text{miss}}$ and $H+1$ lepton from associated production

$H+E_T^{\text{miss}}+1$ lepton

- Signal : Mainly from $WH \rightarrow \ell\nu\gamma\gamma$ and $t\bar{t}H$
- Background : Mainly from $t\bar{t}\gamma\gamma$, $W\gamma\gamma$ where W decays to $\ell\nu$ and $W\gamma \rightarrow e\nu\gamma$ where the other photon is radiated by the electron or is a jet faking photon

$H+E_T^{\text{miss}}$

- Signal : Mainly from $ZH \rightarrow \nu\nu\gamma\gamma$
- Background : Mainly from $t\bar{t}\gamma\gamma$, $Z\gamma\gamma$ and $W\gamma \rightarrow e\nu\gamma$ where the other photon is radiated by the electron or is a jet faking photon

Reminder: a Monte-Carlo generator in one figure

Matrix elements (ME):

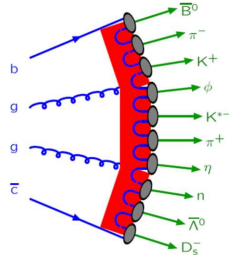
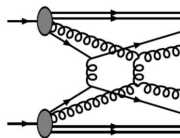
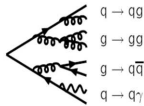
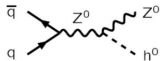
Parton Showers (PS):

5) Multiple parton-parton interactions.

7) Hadronization

1) Hard subprocess:
 $|\mathcal{M}|^2$, Breit-Wigners,
 parton densities.

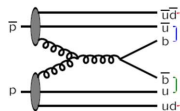
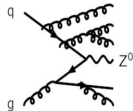
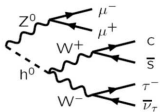
3) Final-state parton showers.



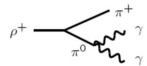
2) Resonance decays:
 includes correlations.

4) Initial-state parton showers.

6) Beam remnants,
 with colour connections.



8) Ordinary decays:
 hadronic, τ , charm, ...



5) + 6) = Underlying Event