



# Etude et recherche du boson de Higgs dans le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ avec ATLAS

JJC 2008

Pauline Bernat\*

Directeur de thèse : Marumi Kado\*\*

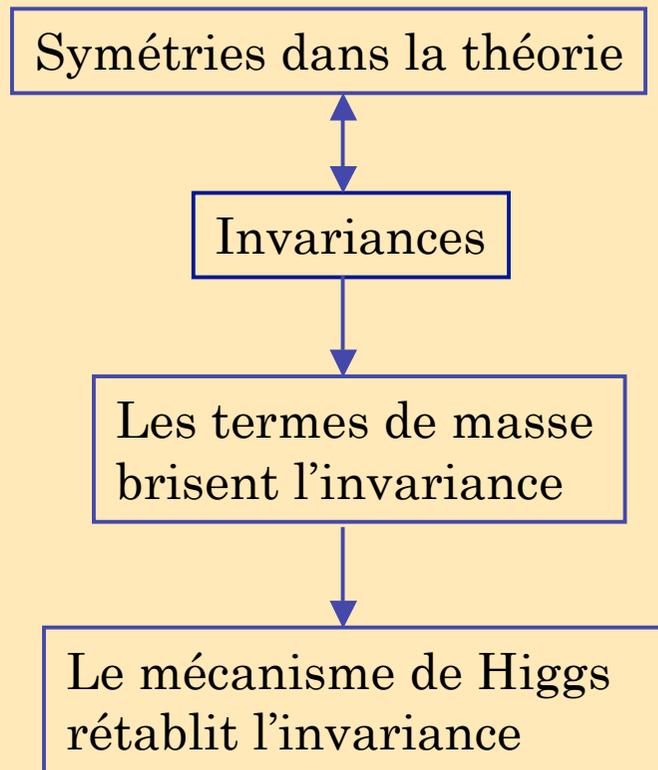
\* [bernat@lal.in2p3.fr](mailto:bernat@lal.in2p3.fr)

\*\* [kado@lal.in2p3.fr](mailto:kado@lal.in2p3.fr)

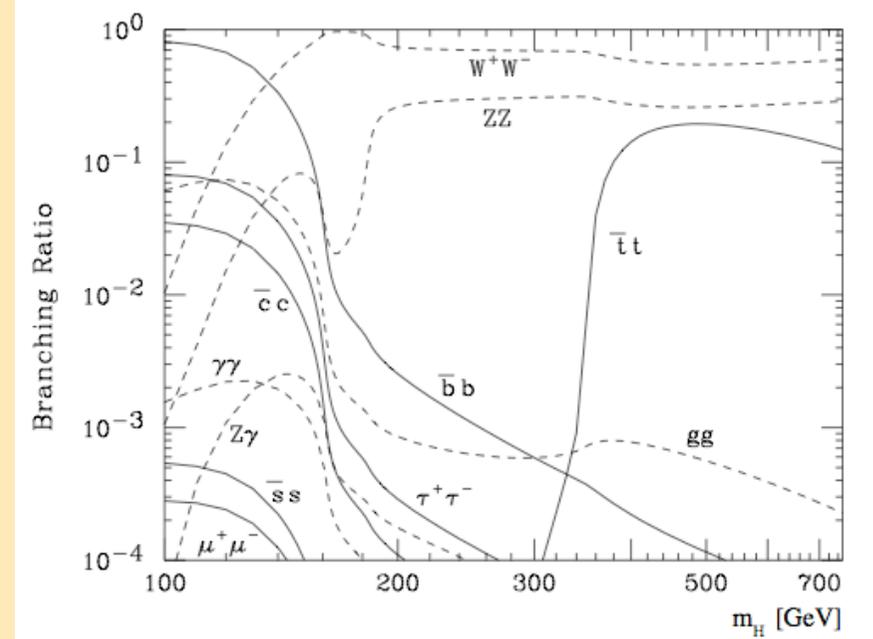
# Motivations

Cadre du MS : recherche du boson de Higgs

Mécanisme de Higgs pour comprendre la brisure spontanée de l'échelle EW qui génère la masse des bosons faibles W et Z<sup>0</sup>



Modes de désintégration du MS Higgs

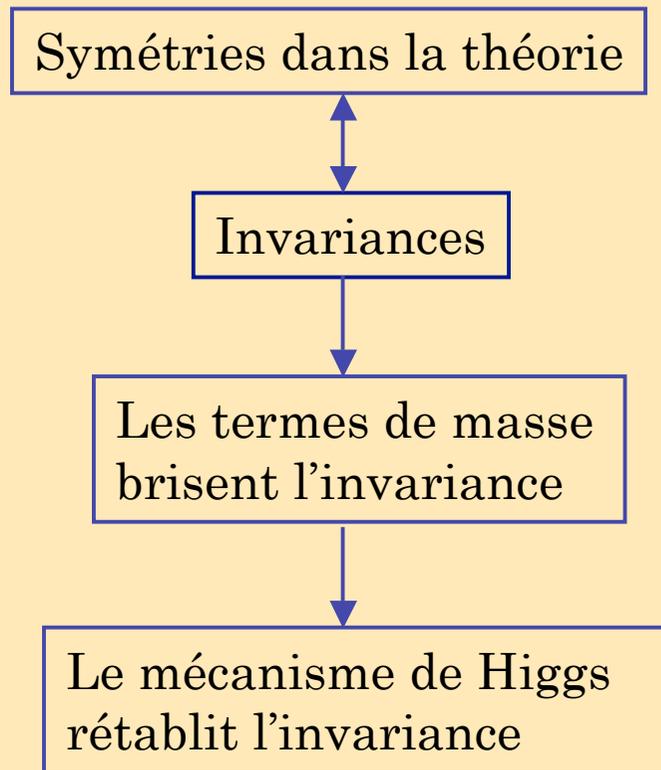


Masse du Higgs : paramètre libre  
(contraintes théoriques et expérimentales)

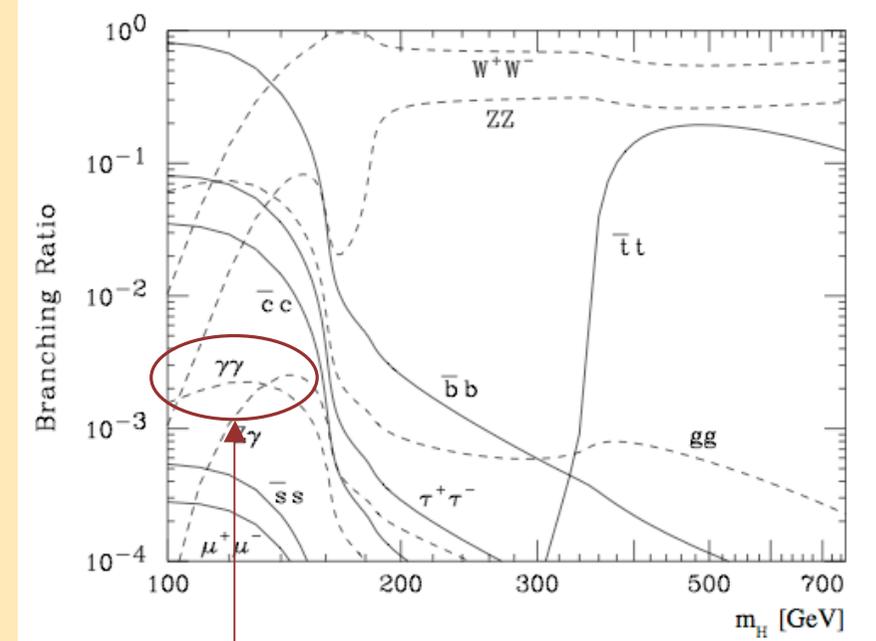
# Motivations

Cadre du MS : recherche du boson de Higgs

Mécanisme de Higgs pour comprendre la brisure spontanée de l'échelle EW qui génère la masse des bosons faibles W et Z<sup>0</sup>



Modes de désintégration du MS Higgs



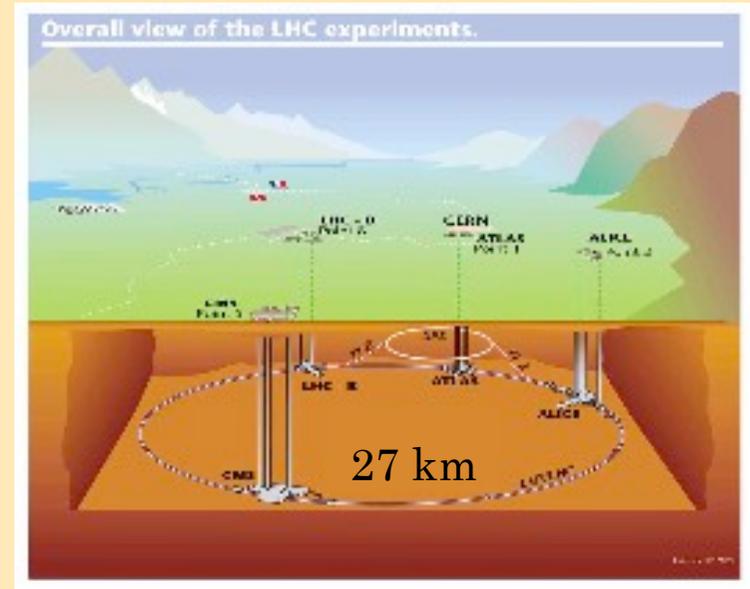
Canal  $H \rightarrow \gamma\gamma$  :  $115 < M_{\gamma\gamma} < 150 \text{ GeV}/c^2$

Masse du Higgs : paramètre libre  
(contraintes théorique et expérimentales)

# Les moyens expérimentaux

## Le LHC

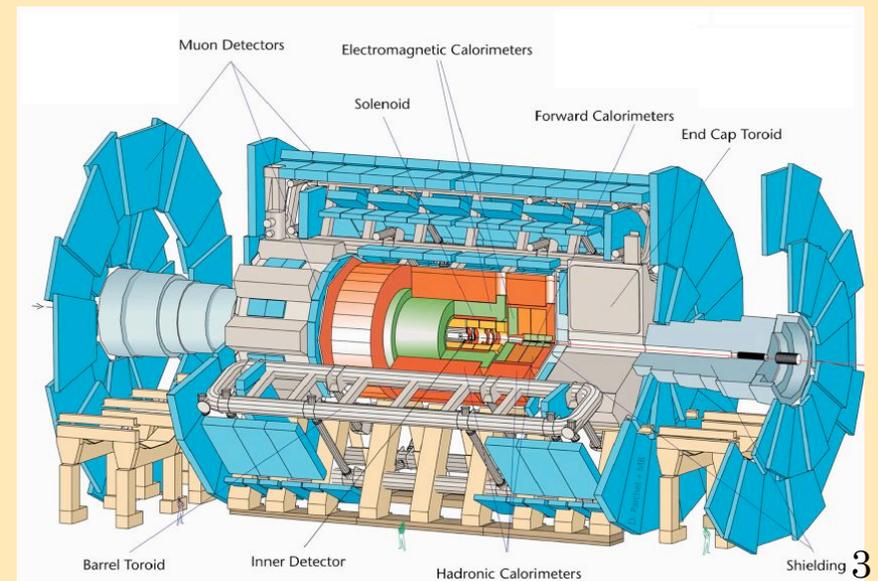
- collision p-p à 14/10 TeV toutes les 25/75 ns
- pile-up : entre 2 et 25 interactions/collision
- phase basse/haute lumi.  $10^{33} / 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$   
(30 fb<sup>-1</sup> en 2011, 300 fb<sup>-1</sup> en 2015 )



## ATLAS

- détecteur de trace interne (ID)
- solénoïde (2 T)
- calorimètre électromagnétique (EM)
- calorimètre hadronique
- spectromètre à muons
- système toroïdal (0.5 à 1 T)

L : 44 m  
D : 22 m  
P : 7 kt



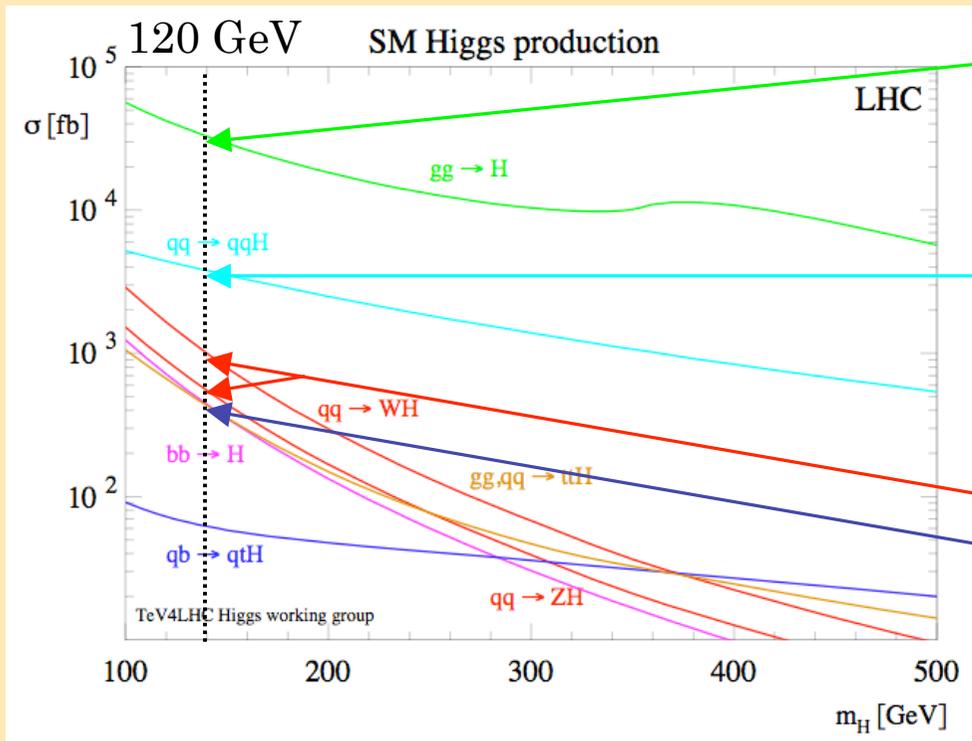
# Phénomène étudié

$$pp \rightarrow H(\rightarrow \gamma\gamma) + X \text{ (analyse inclusive)}$$

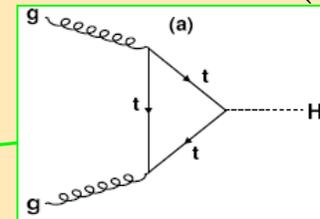
Canal favori dans la région de basse masse, B.R  $\sim 0.2\%$

Signature claire, utilise tous les modes de production au LHC

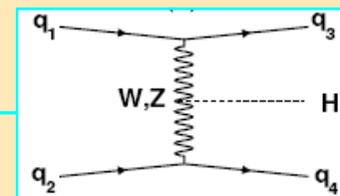
*Production du Higgs au LHC*



Gluon fusion (74%)

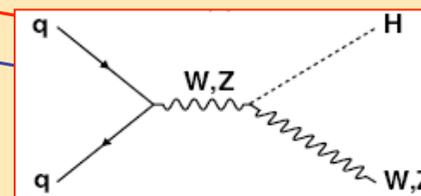


Vector Boson Fusion (17%)

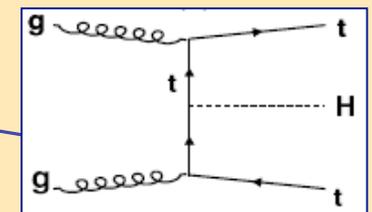


Associated production :

- with bosons (W,Z) (7%)



- with top (2%)



# Les enjeux de l'analyse

1./ Discrimination du fond (production diphoton)

2./ Résolution sur la masse (calorimétrie d'ATLAS)

# Calorimètre EM d'ATLAS

Design du calo EM optimisé pour l'étude du canal  $H \rightarrow \gamma\gamma$  :  
**résolution en énergie (et angulaire)** nécessaire à une reconstruction précise de la masse invariante)

$$M_{\gamma_1\gamma_2} = \sqrt{2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta_{\gamma_1\gamma_2})}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\%$$

Calorimètre à échantillonnage  
(Argon liquide/Plomb)

Structure en 4 compartiments :

0./ pre-sampler (mesure l'énergie d'une gerbe en amont du calo)

1./ strip (granularité fine)

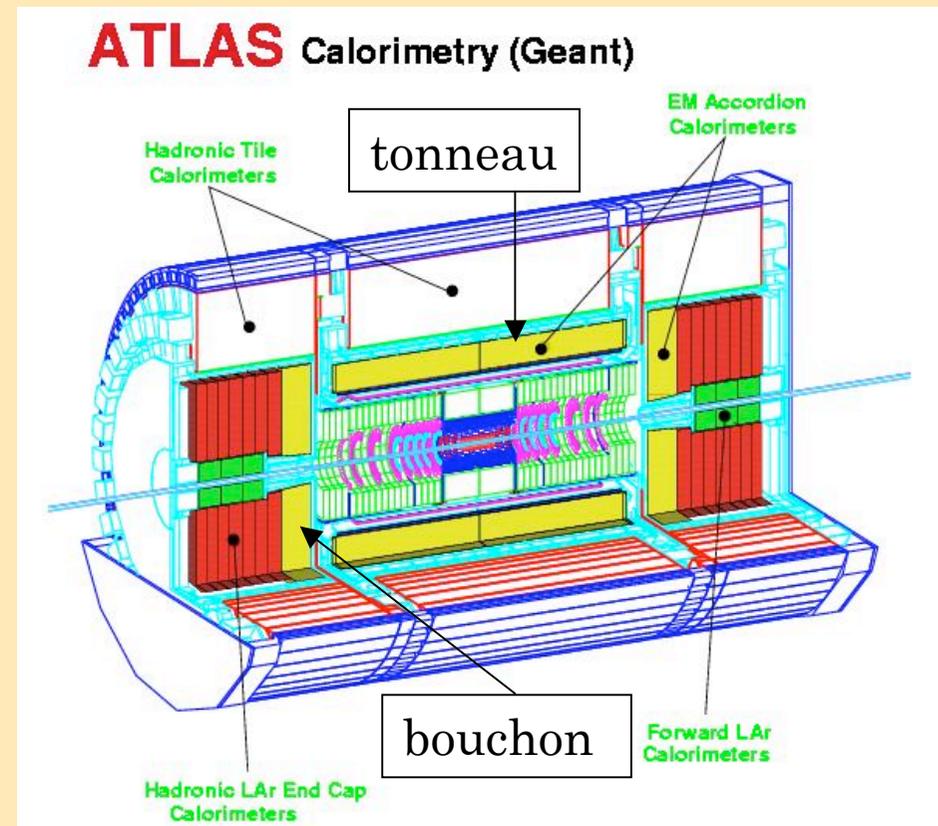
→ séparation  $\gamma/\pi^0$ , début de gerbe EM

2./ middle

→ mesure une grande fraction de l'énergie de la gerbe

3./ back

→ queue de gerbe (EM vs. Had)



# Calorimètre EM d'ATLAS

Design du calo EM optimisé pour l'étude du canal  $H \rightarrow \gamma\gamma$  :  
**résolution en énergie (et angulaire)** nécessaire à une reconstruction précise de la masse invariante)

$$M_{\gamma_1\gamma_2} = \sqrt{2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta_{\gamma_1\gamma_2})}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\%$$

Photon  $\Leftrightarrow$  Gerbe ElectroMagnétique (EM)  
 dans le détecteur.

Gerbe EM : cascade de photons et de  $e^+/e^-$

Structure en 4 compartiments :

0./ pre-sampler (mesure l'énergie d'une gerbe en amont du calo)

1./ strip (granularité fine)

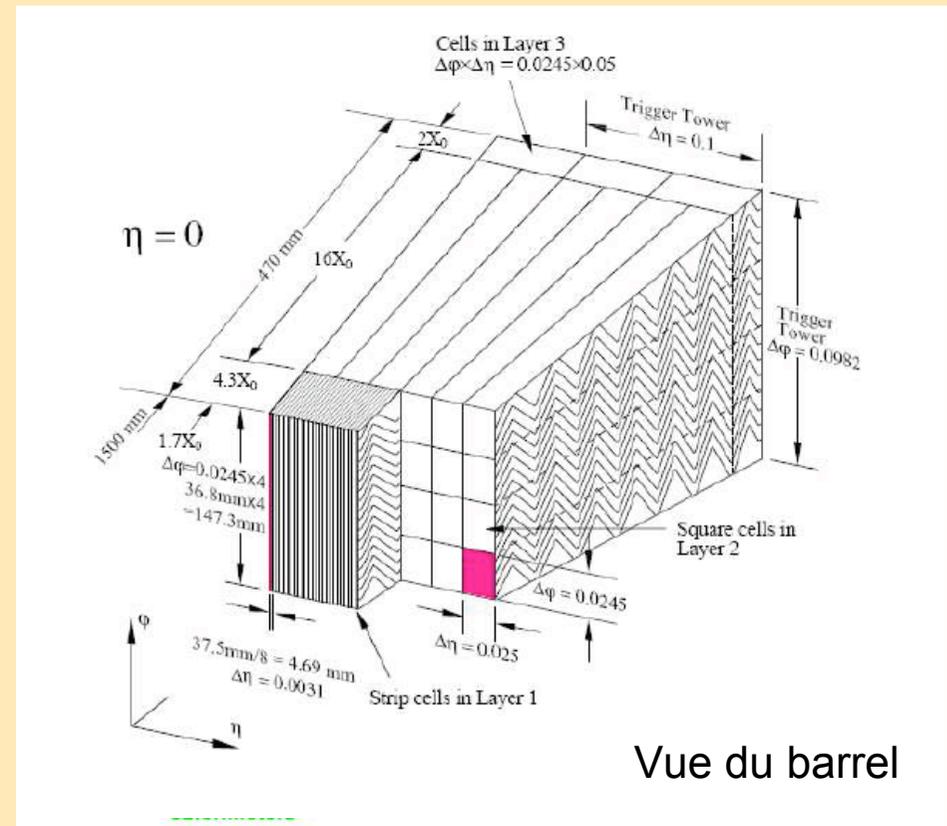
→ séparation  $\gamma/\pi^0$ , début de gerbe EM

2./ middle

→ mesure une grande fraction de l'énergie de la gerbe

3./ back

→ queue de gerbe (EM vs. Had)

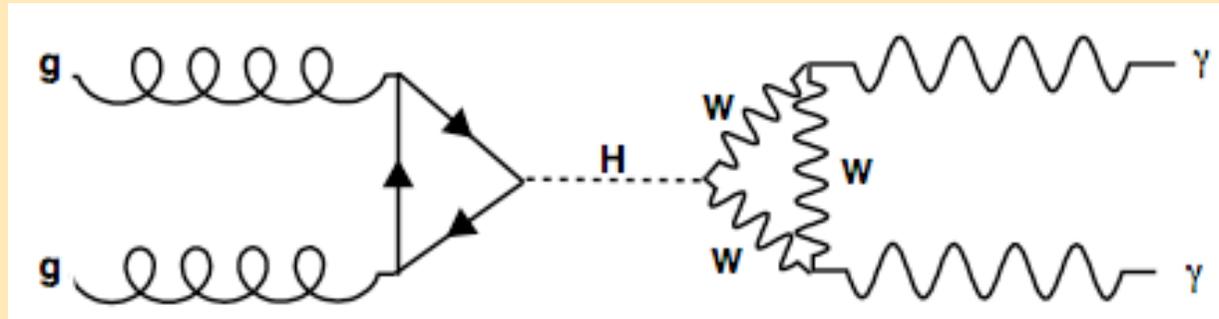


Vue du baril

Structure en accordéon

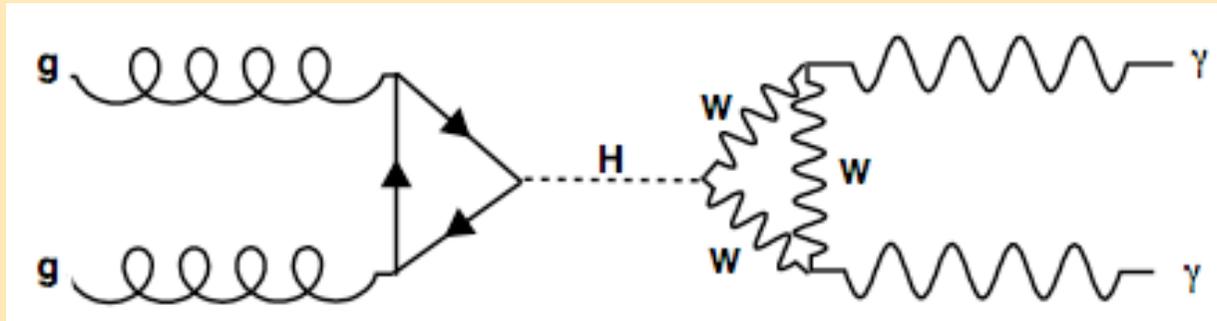
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

Rappel : signal (gluon fusion)



# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

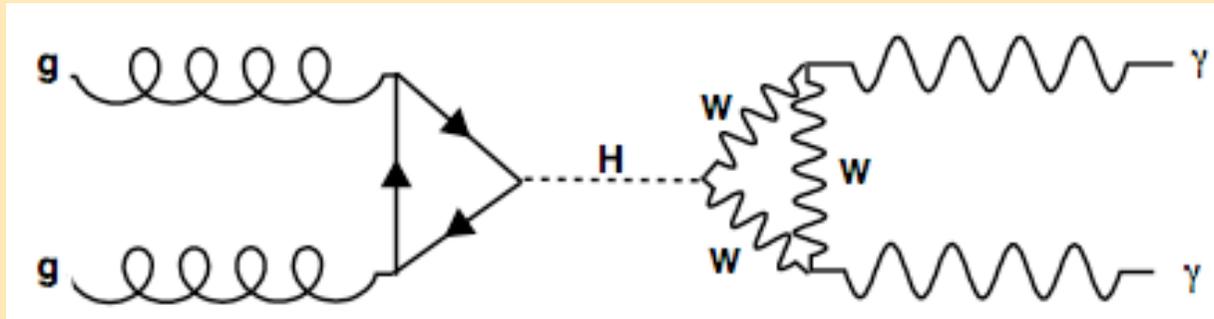
Rappel : signal (gluon fusion)



Bruit de fond : production diphoton

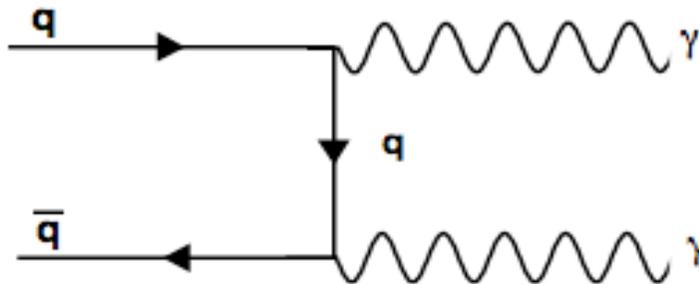
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

Rappel : signal (gluon fusion)



Bruit de fond : production diphoton

born :  $\alpha^2$



IS :  $qq$  vs  $gg$  for signal

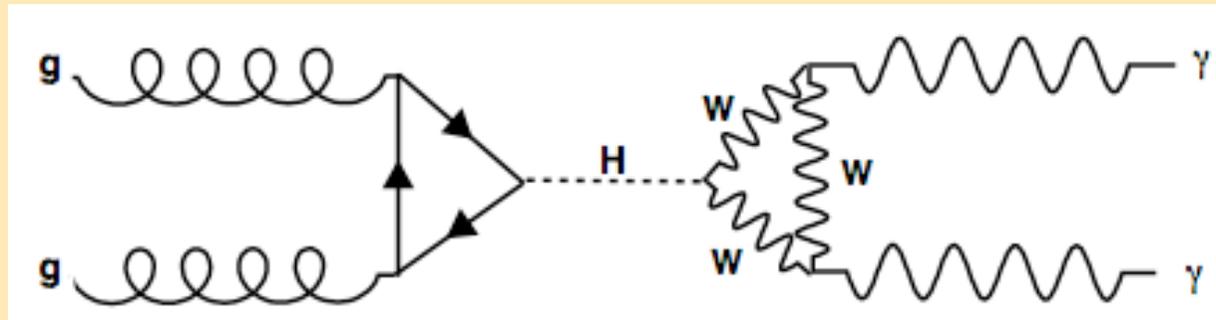
Effets QCD (IS gluon radiation) différents

$\rightarrow$  Impact sur le spectre en  $P_{T\gamma\gamma}$

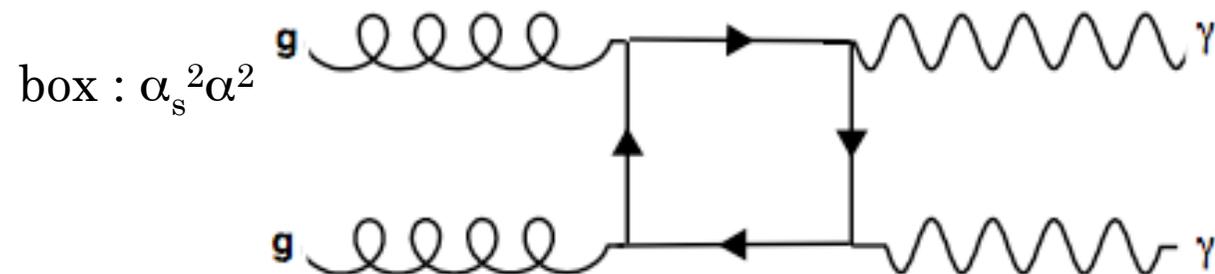
IS : Initial State

# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

Rappel : signal (gluon fusion)



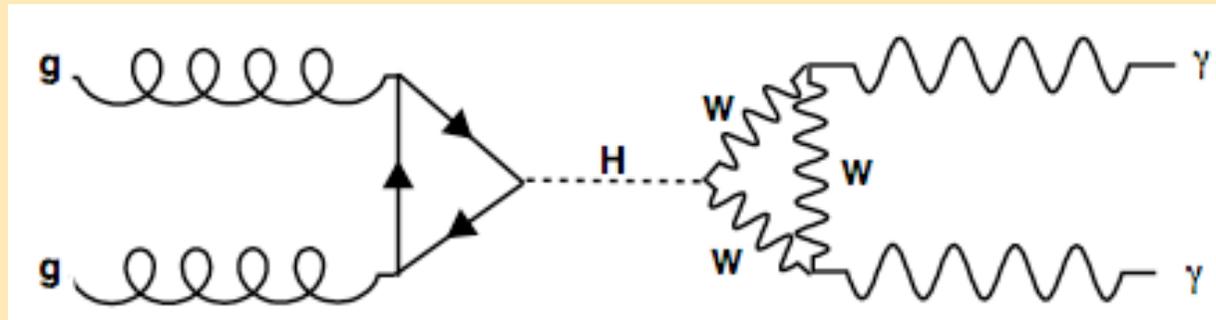
Bruit de fond : production diphoton



Same IS : gg

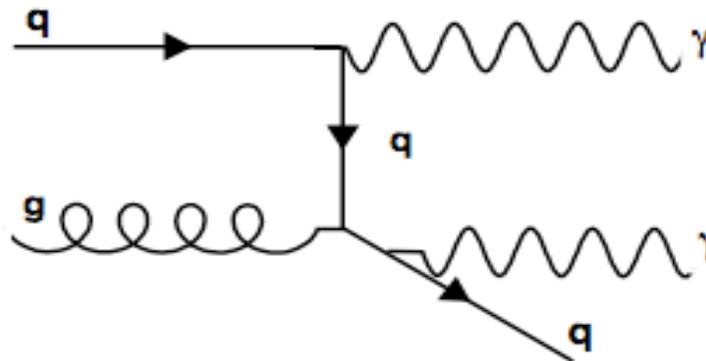
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

Rappel : signal (gluon fusion)



Bruit de fond : production diphoton

brem :  $\alpha_s \alpha^2$



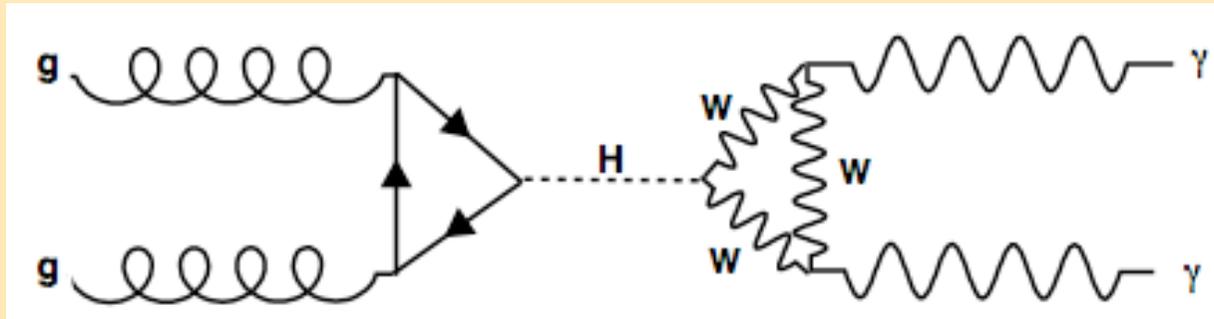
IS :  $qg$  vs  $gg$  for signal

FS photon radiation  $\rightarrow$  divergence colinéaire et IR

$\rightarrow$  fonction de fragmentation

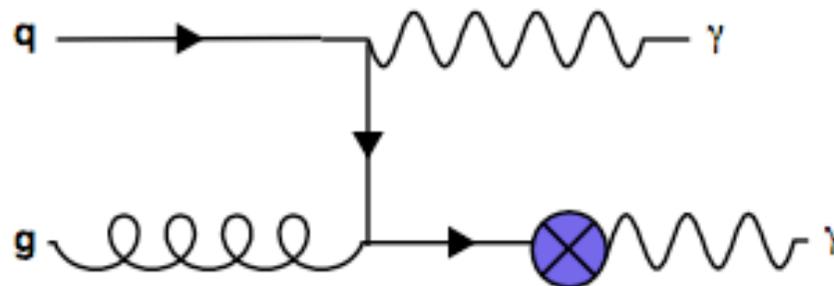
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

Rappel : signal (gluon fusion)



Bruit de fond : production diphoton

frag :  $\alpha_s \alpha (\alpha/\alpha_s)$



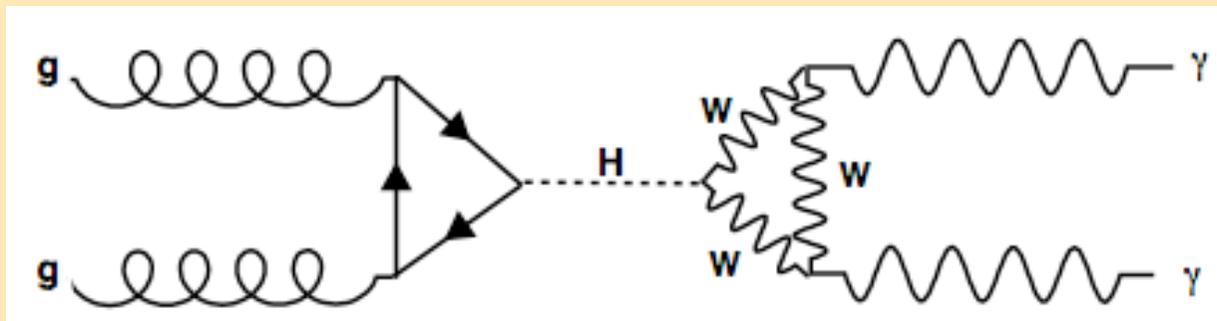
IS :  $qg$  vs  $gg$  for signal

FS photon radiation  $\rightarrow$  divergence colinéaire et IR

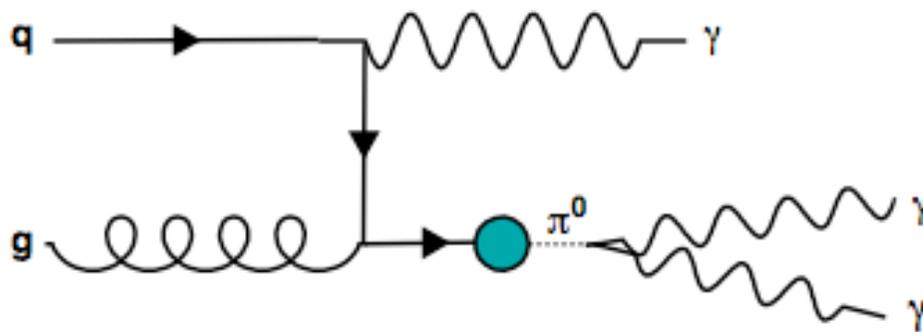
$\rightarrow$  fonction de fragmentation

# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

Rappel : signal (gluon fusion)



Bruit de fond : production diphoton



Un  $\pi^0$  (de gd  $P_T$ ) peut être reconstruit comme un photon si la séparation des photons est plus petite que la taille d'une cell du calo

Etape de reconstruction  $\rightarrow$  fake-photon ( $\pi^0$ )  
 $\rightarrow$  fine granularité du strip

# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

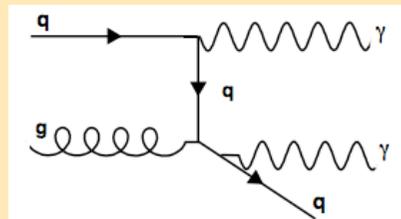
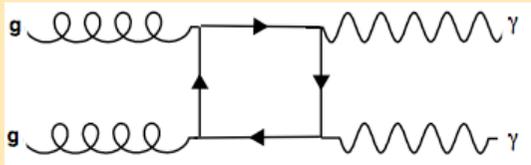
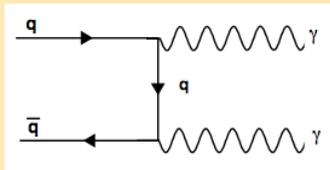
Catégories

# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

## Catégories

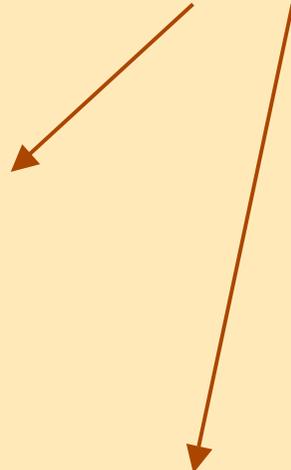


### Cont. directe 2 photons

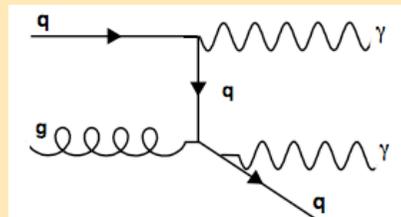
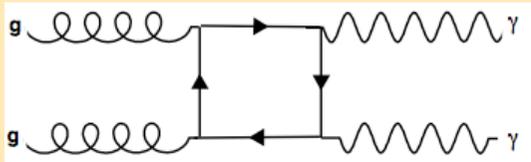
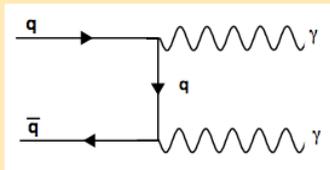


# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

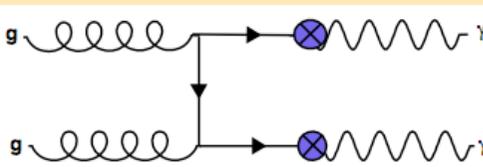
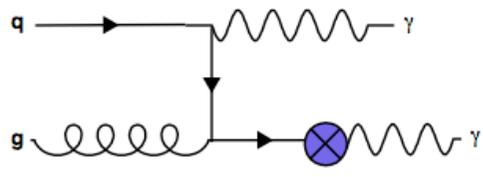
## Catégories



### Cont. directe 2 photons

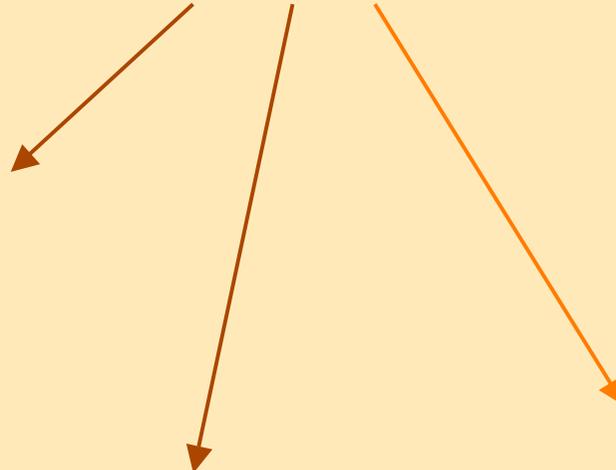


### Cont. fragmentation

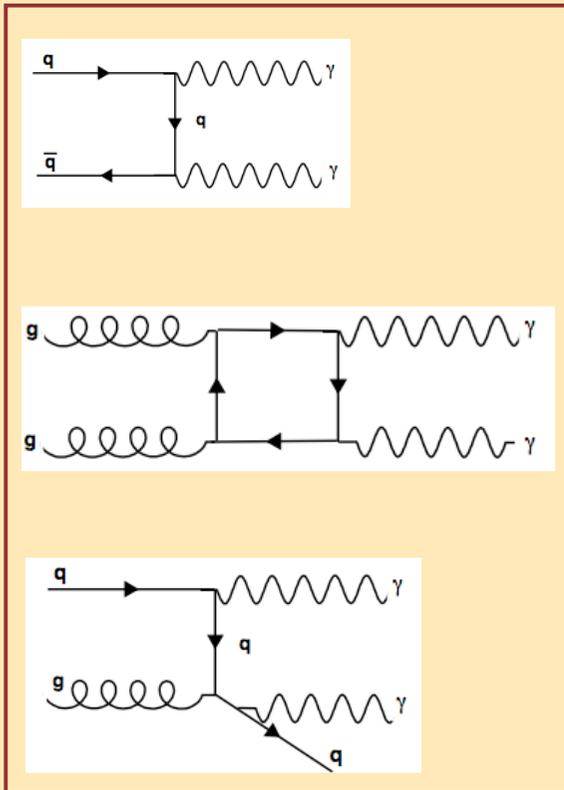


# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

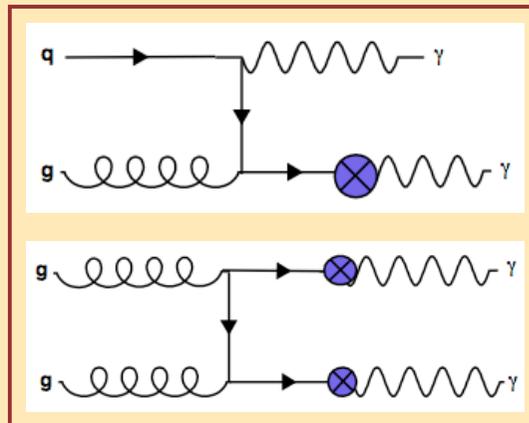
## Catégories



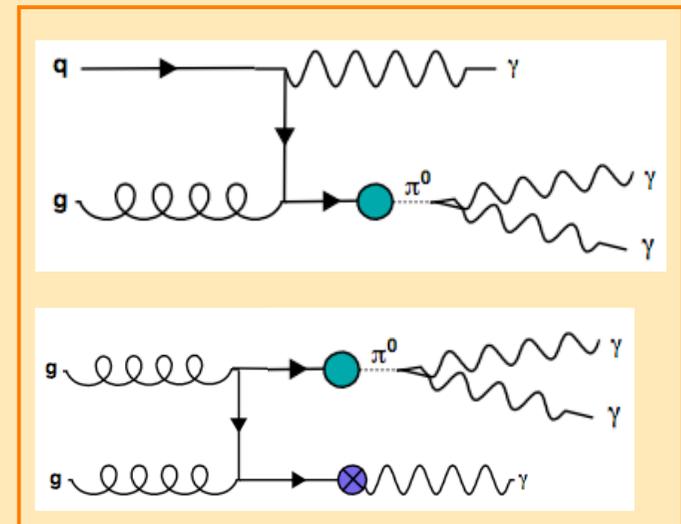
### Cont. directe 2 photons



### Cont. fragmentation



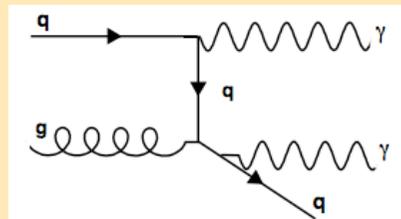
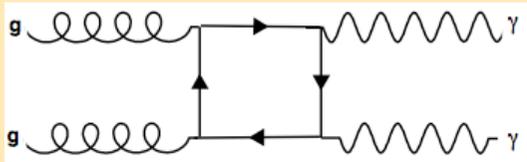
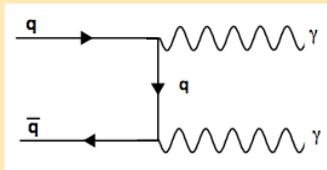
### Cont. 1 photon-1 jet



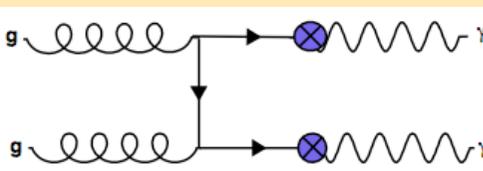
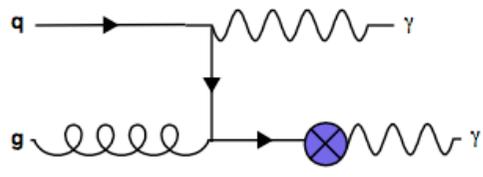
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

## Catégories

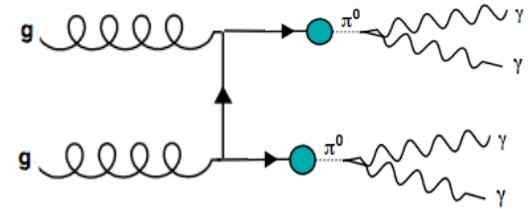
### Cont. directe 2 photons



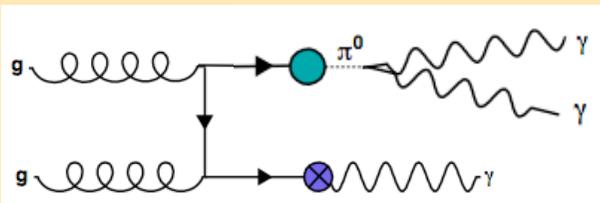
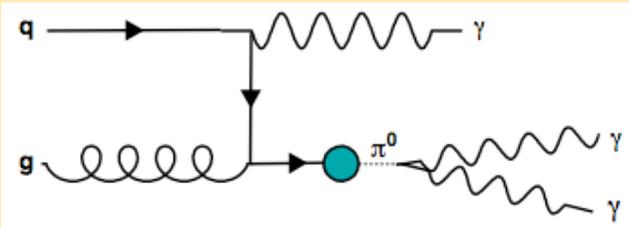
### Cont. fragmentation



### Cont. Multi-jets



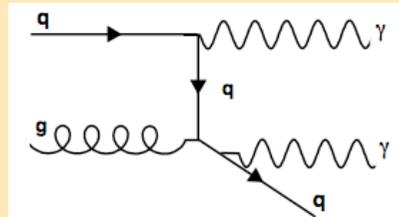
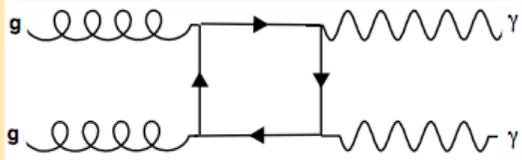
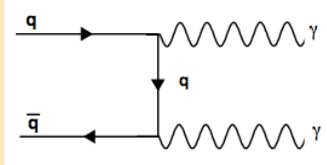
### Cont. 1 photon-1 jet



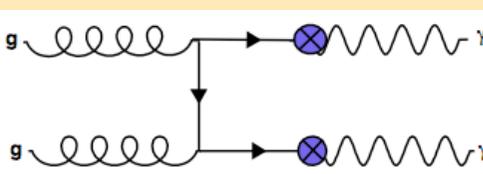
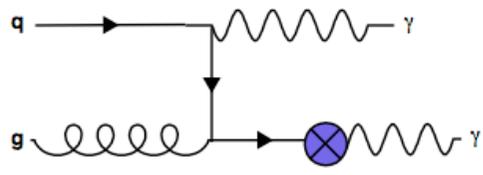
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

## Catégories

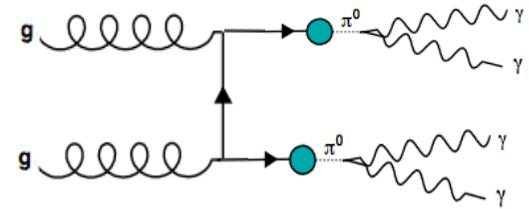
### Cont. directe 2 photons



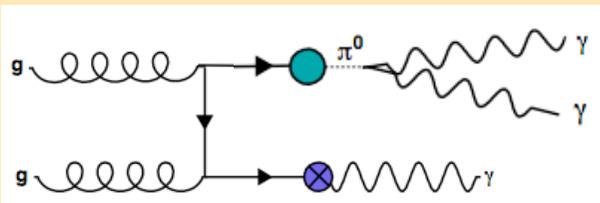
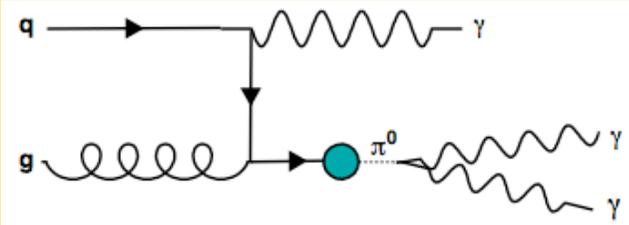
### Cont. fragmentation



### Cont. Multi-jets



### Cont. 1 photon-1 jet

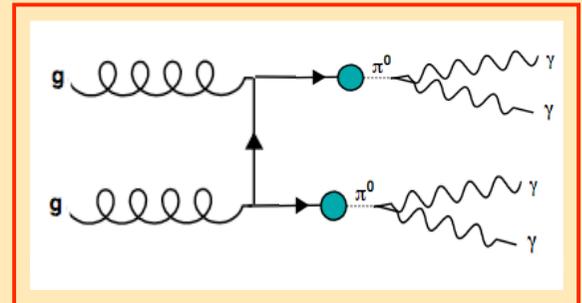


Bruit de fond irréductible

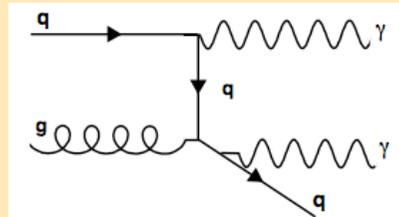
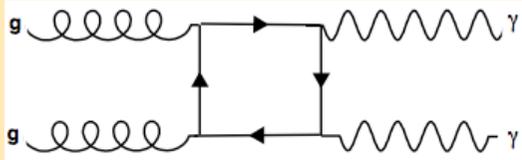
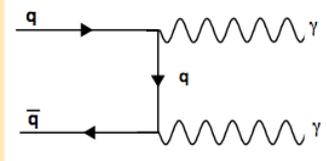
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

## Catégories

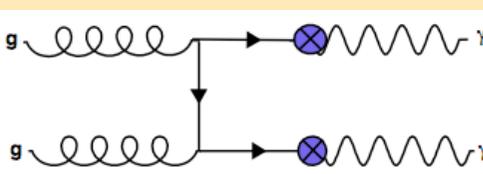
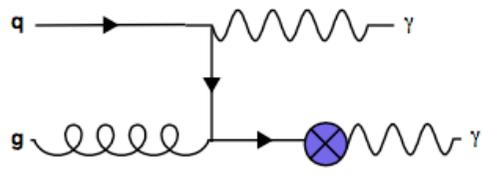
### Cont. Multi-jets



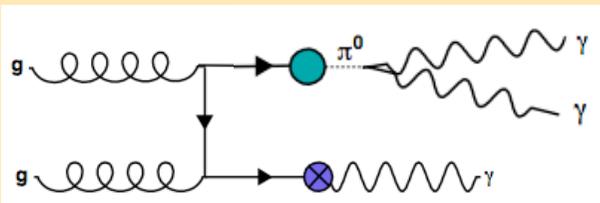
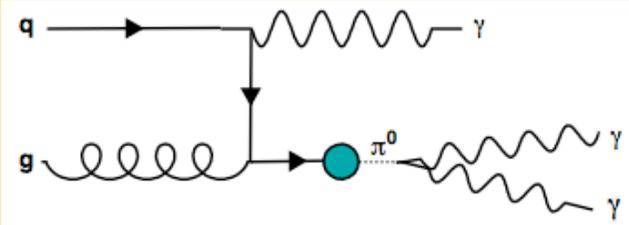
### Cont. directe 2 photons



### Cont. fragmentation



### Cont. 1 photon-1 jet



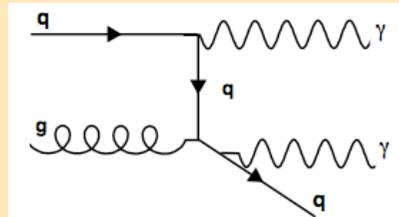
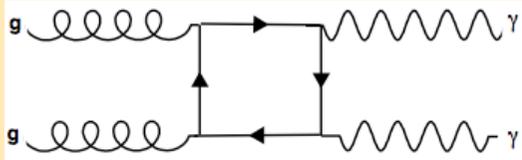
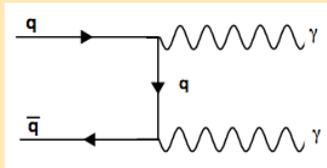
Bruit de fond irréductible

Bruit de fond semi-réductible 8

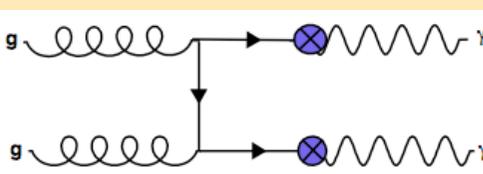
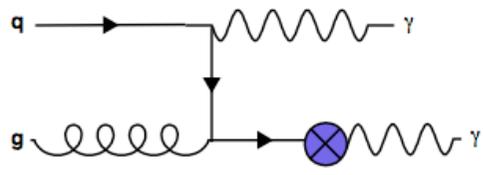
# Bruits de fond $H \rightarrow \gamma\gamma$

## Catégories

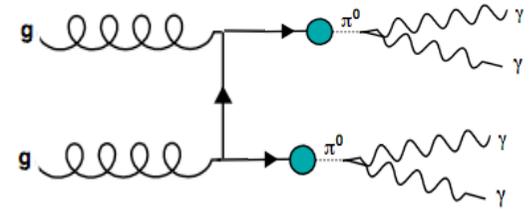
### Cont. directe 2 photons



### Cont. fragmentation

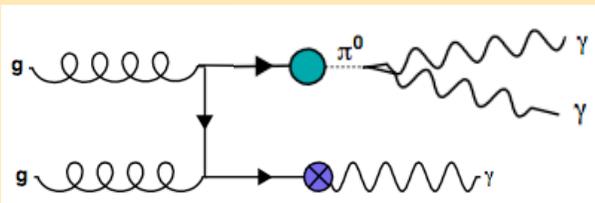
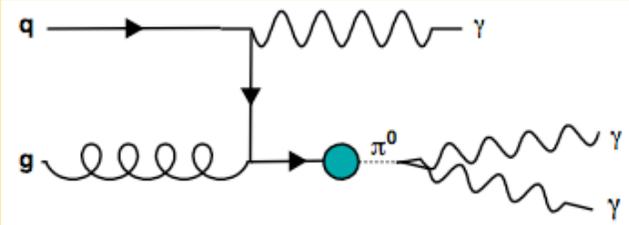


### Cont. Multi-jets



Bruit de fond réductible

### Cont. 1 photon-1 jet



Bruit de fond irréductible

Bruit de fond semi-réductible 8

# Stratégie d'analyse

1./ Système de déclenchement (trigger) :

- pour réduire le fond
- pour pallier aux limites de stockage

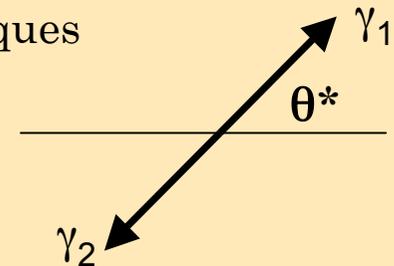
**Trigger** (3 niveaux) utilisé : 2g20i

isolation calorimétrique et coupures sur la forme des gerbes

	Level1	Level2	Event Filter
Taux d'Evts :	40 MHz → 75 kHz	→ 3 kHz	→ 200 Hz
Taux de jets :	140 Hz	→ 5 Hz	→ 1.6 Hz

2./ Analyse offline : **coupures cinématiques**

- optimise la réjection du bruit (vs. le signal)
- optimise le pouvoir discriminant des variables cinématiques  
(  $P_{T\gamma\gamma}$ ,  $M_{\gamma\gamma}$ ,  $\cos\theta^*$ , ... )



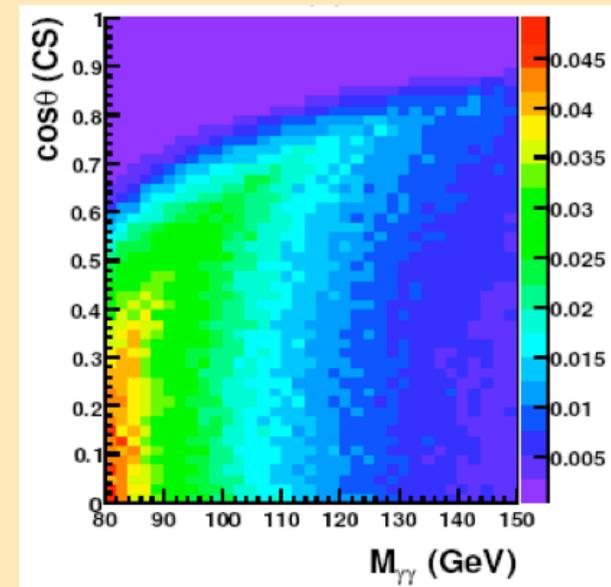
# Bruits de fond (et signal)

Points développés pendant la thèse :

- normalisation des bruits de fond irréductible et semi-réductible (et aussi du signal)

- étude des variables discriminantes ( $P_{T\gamma\gamma}$ ,  $M_{\gamma\gamma}$ ,  $\cos\theta^*$ , ...)

- corrélations des variables  
(*Exemple* :  $M_{\gamma\gamma}$  vs.  $\cos\theta^*$ )



→ Gain en signification statistique (mesure du potentiel de découverte) vs. comptage d'évts

Etude basée sur les simulations et la comparaison des résultats des  $\neq$  Monte-Carlo (MC)

# Résultats

≠ générateurs MC

- Différentes sections efficaces
- Différentes distributions des variables cinématiques  
(*exemple* :  $P_{T\gamma\gamma}$  sensible aux radiations QCD)

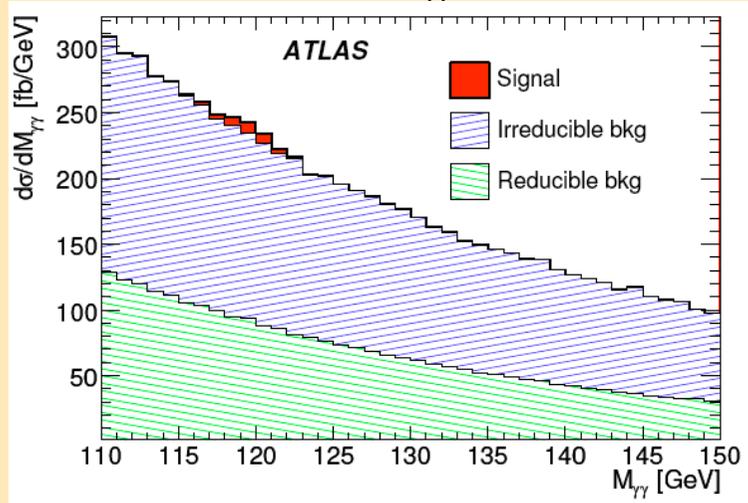
Sources d'incertitudes  
systématiques

***Incertitudes systématiques :***

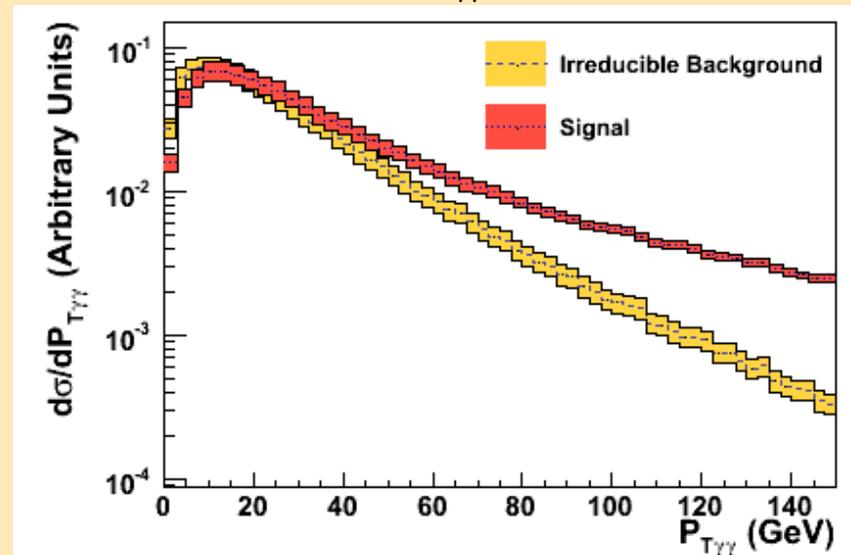
- signal → 15%
- bruit de fond irréductible → 18%
- bruit de fond semi-réductible → 32%

# Résultats (Analyse inclusive)

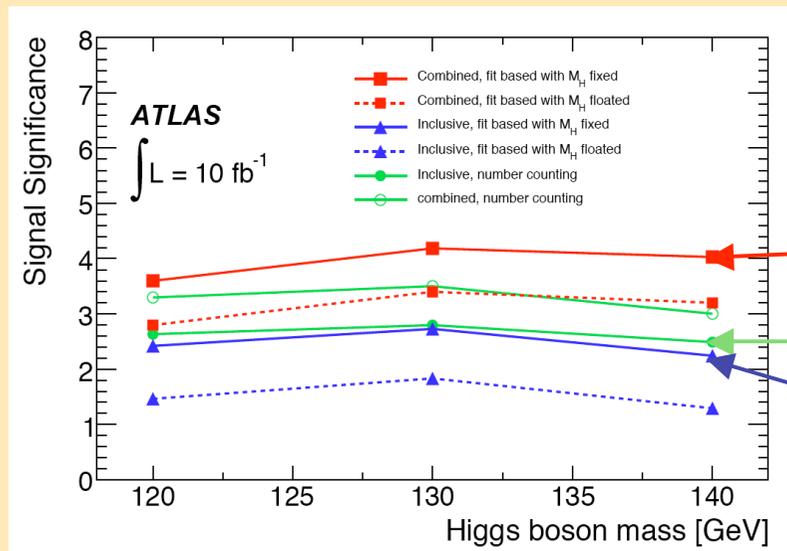
Distribution de  $M_{\gamma\gamma}$  ( $M_H = 120$  GeV)



Distribution de  $P_{T\gamma\gamma}$



Significance (1 an à basse lumi.)



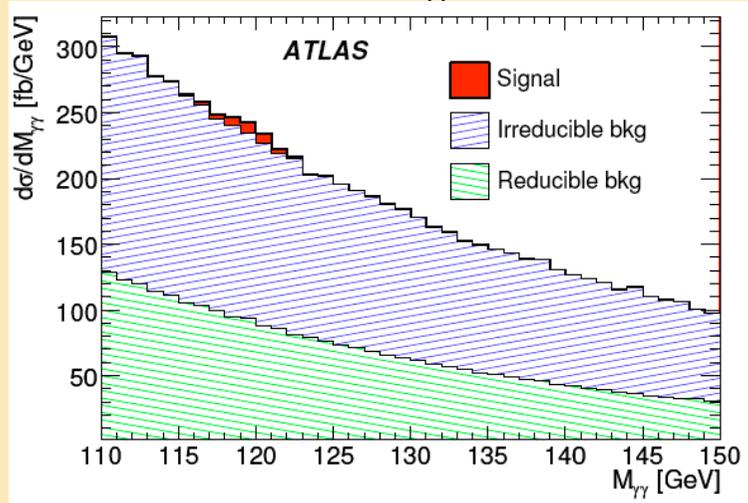
Fit combiné (catégories, variables)

Comptage des evts

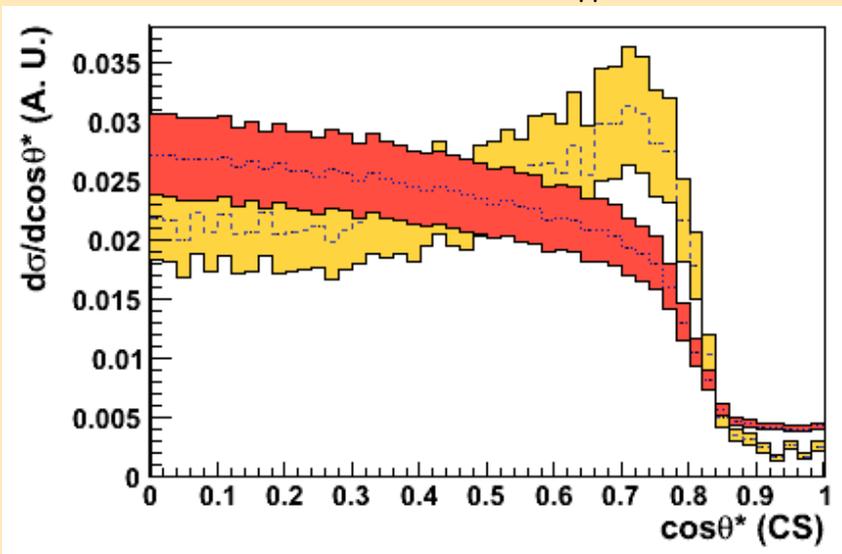
Fit combiné (catégories)

# Résultats (Analyse inclusive)

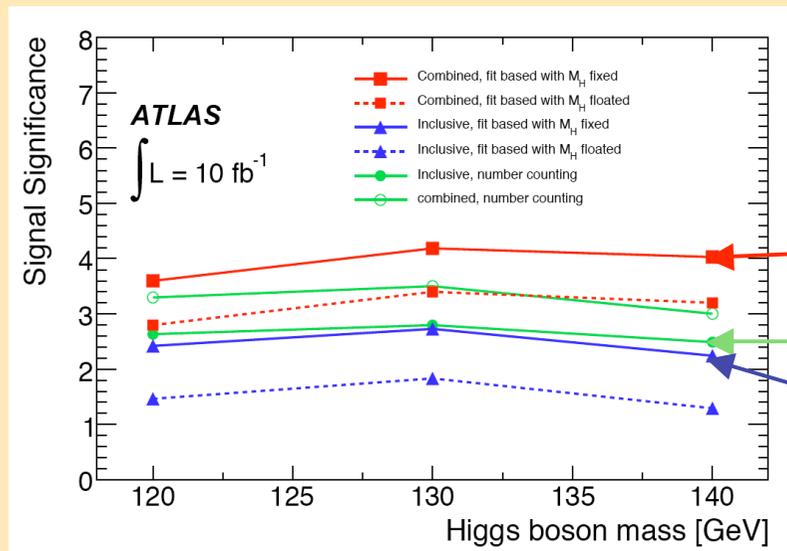
Distribution de  $M_{\gamma\gamma}$  ( $M_H = 120$  GeV)



Distribution de  $\cos\theta^*$  ( $M_{\gamma\gamma} \in M_H \pm 2$  GeV)



Significance (1 an à basse lumi.)



Fit combiné (catégories, variables)

Comptage des evts

Fit combiné (catégories)

# Conclusion et perspectives

## Conclusion :

- Canal avec un faible rapport d'embranchement, mais favori pour un Higgs léger (signature claire au LHC)
- Estimation du signal et des sources de bruit de fond avec MC
- Stratégie d'analyse : coupures, variables discriminantes, analyse exclusive/inclusive

## Perspectives :

- Préparation de l'analyse à 10 TeV (prévu au prochain démarrage)
- Etude du bruit de fond réductible
- Construire une stratégie d'analyse (prise en compte de nouvelles variables, des corrélations)

# Back-Up

# Bruits de fond (et signal)

2 types de MC

## Programmes :

Calcul d'**Elément de Matrice (ME)**

avec :

- corrections QCD
- effets fins de QCD (fragmentation, ...)

## *Exemple (bruit de fond irr.) :*

- ResBos (NLO)
- Diphox (NLO+frag.)

## générateurs MC :

calcul de ME à l'arbre (Leading Order)  
+ **Parton Shower (PS)** : simule  
l'évolution du processus dur dans le  
détecteur (radiations à l'état initial et  
final, interactions multiples,...)

## *Exemple :*

- PYTHIA
- Herwig

- Différentes section efficaces
- Différentes distributions des variables cinématiques  
(*exemple* :  $P_{T\gamma\gamma}$  sensible aux radiations QCD)

Sources d'incertitudes  
systématiques

# Résultats

## Incertitudes systématiques

*Différentes sources (quelques exemples) :*

- calcul d'EM à **un ordre fixe** en th. des perturbations  
→ dépendance aux échelles de **normalisation**, **factorisation** (et **fragmentation**)
- calcul de la section efficace avec certaines **pdf**
- effets du détecteur (résolution en énergie ...)
- ...

*Résultats :*

- signal → **15%**
- bruit de fond irréductible → **18%**
- bruit de fond semi-réductible → **32%**

## Normalisations

Estimation des k-factors pour les **bruits de fond irréductible et semi-réductible**

k-factor :  $\sigma_{\text{NLO}}/\sigma_{\text{LO}}$  (général :  $\sigma_{\text{N}^n\text{L}}/\sigma_{\text{N}^{n-1}\text{L}}$ )

+ effets QCD ( cf. fragmentation), PS,...

*Résultats :*

- bruit de fond irréductible →  **$k = 1.18 \pm 0.21$**
- bruit de fond semi-réductible →  **$k = 1.84 \pm 0.59$**