

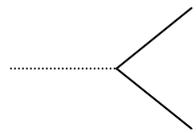
Le boson de Higgs du Modèle Standard

Masse entre 115 GeV et ~ 250 GeV

Couplages du Higgs

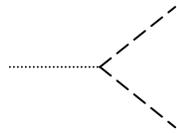
- Couplages proportionnels à la masse

- H f fbar



$$\frac{-i g m_f}{2 m_W}$$

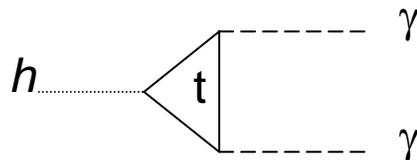
- H V V



$$i g m_W g^{\mu\nu}$$

$$\frac{i g m_Z g^{\mu\nu}}{2 \cos(\theta_W)}$$

- Couplage aux photons et gluons via des boucles avec particules lourdes (top, W pour photons)



Désintégration du Higgs

Désintégration en fermions lourds:

$$\Gamma(h \rightarrow f\bar{f}) = \frac{N_c g^2 m_f^2}{32\pi m_W^2} \beta^3 m_H$$

- $N_c = 1$ ou 3 (quarks)
- $\beta = 1 - 4m_f^2/m_H^2$
- Pour m_H jusqu'à ~ 140 GeV, $H \rightarrow b\bar{b}$ est le mode dominant de désintégration
- Corrections NLO QCD à la largeur $H \rightarrow b\bar{b}$ complètement calculées. L'effet dominant consiste à utiliser la masse du b évaluée à l'échelle de $M_h \Rightarrow$ réduction de $\sim 40\%$ de la largeur

Désintégration en bosons W,Z :

$$\Gamma(H \rightarrow ZZ) = \frac{g^2}{128\pi} \frac{m_H^3}{m_W^2} \sqrt{1-x_Z} \left(1-x_Z + \frac{3}{4}x_Z^2\right)$$

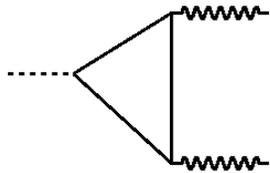
$$\Gamma(H \rightarrow WW) = \frac{g^2}{64\pi} \frac{m_H^3}{m_W^2} \sqrt{1-x_W} \left(1-x_W + \frac{3}{4}x_W^2\right)$$

- $x_W = 4 m_W^2/m_H^2$
- Mode de désintégration dominant pour $m_H > 160$ GeV
- En prenant en compte la largeur du W, Z on peut aussi calculer les largeurs en WW^* ou ZZ^*
- Corrections radiatives à une boucle calculées, effet $\sim < 10\%$
- Domination de W,Z longitudinaux pour $m_H \gg m_W, m_Z$

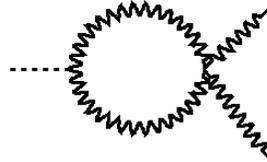
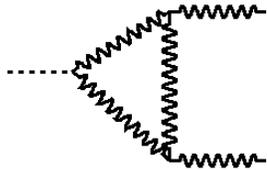
$$\frac{V_T V_T}{V_L V_L} = \frac{\frac{1}{2} x_v^2}{\left(1 - \frac{1}{2} x_v\right)^2}$$

- Pour un Higgs lourd, la largeur totale devient $\sim 1/2 (m_H/1\text{TeV})^3$ (en TeV)

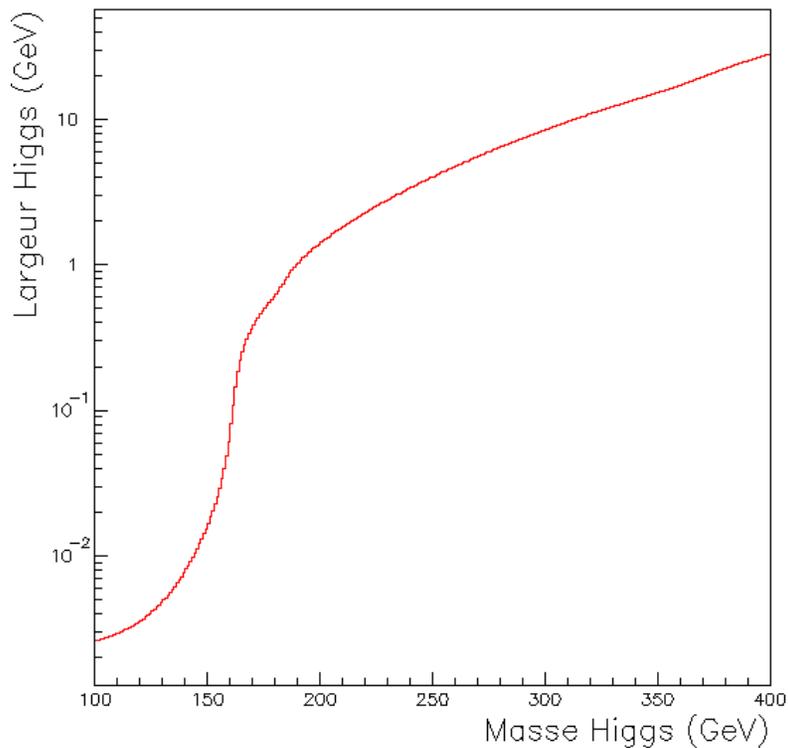
Désintégration via boucles: $H \rightarrow \gamma \gamma$ (gg et $Z\gamma$ similaires)



$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^2 g^2}{1024\pi^3} \frac{m_H^3}{m_W^2} \left| \sum_i N_{ci} e_i^2 F_i \right|^2$$



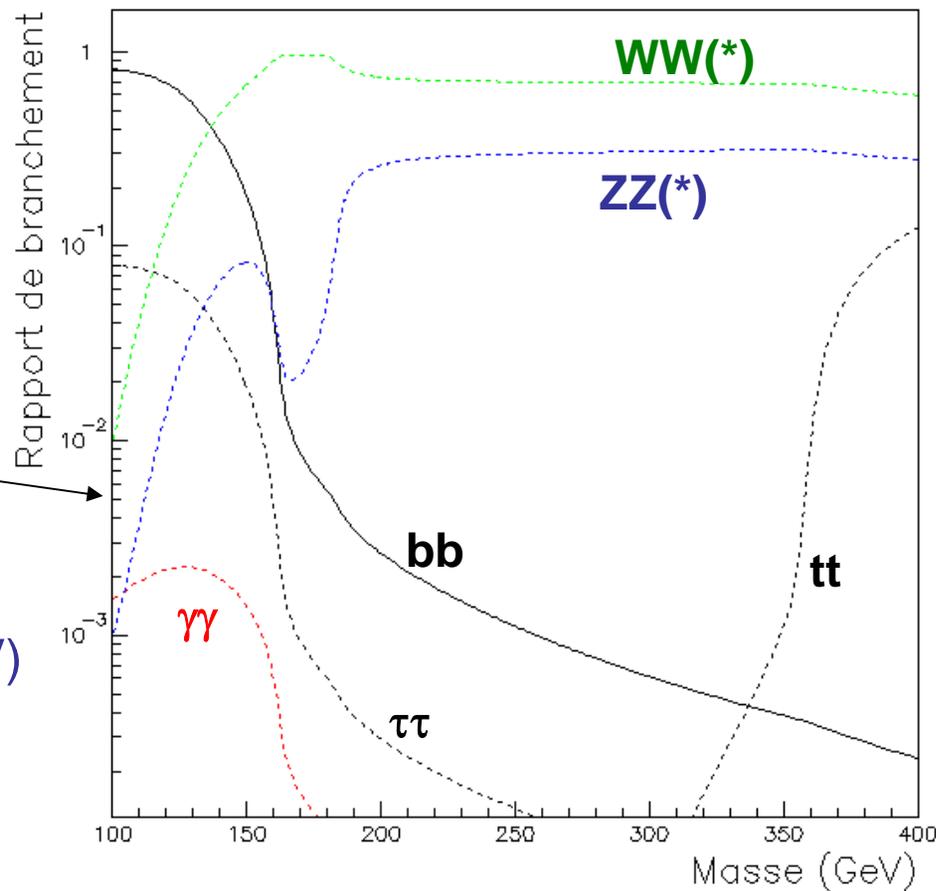
- Somme sur les différentes particules dans la boucle
- N = facteur de couleur
- e_i = charge électrique
- F_i = fonction de masse particule, différentes fonctions pour spin 0, $\frac{1}{2}$ et 1. Pour $m_i > m_h$, $F_1 > F_{\frac{1}{2}} > F_0$
- Contributions principales : W et top



Largeur totale du Higgs

M.Spira, HDECAY

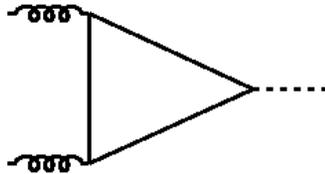
Rapports d'embranchement
(principaux modes intéressants)



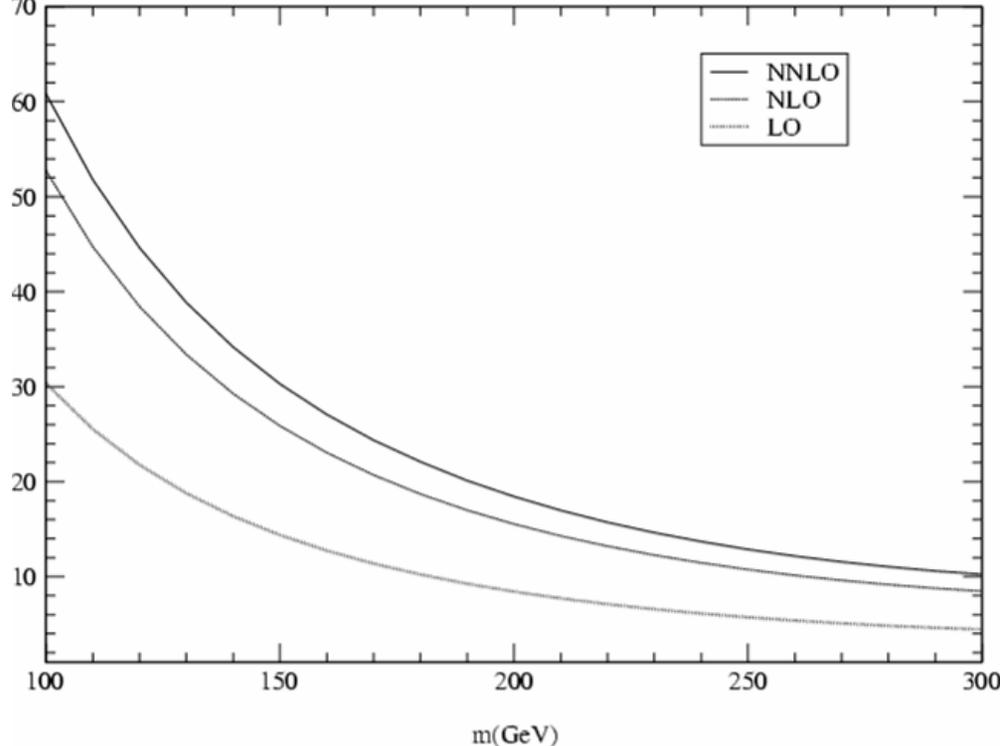
Incertitude sur Br $\sim 2\%$ (à 120 GeV)
(sauf pour cc 20% et gg 6%)

Production du Higgs

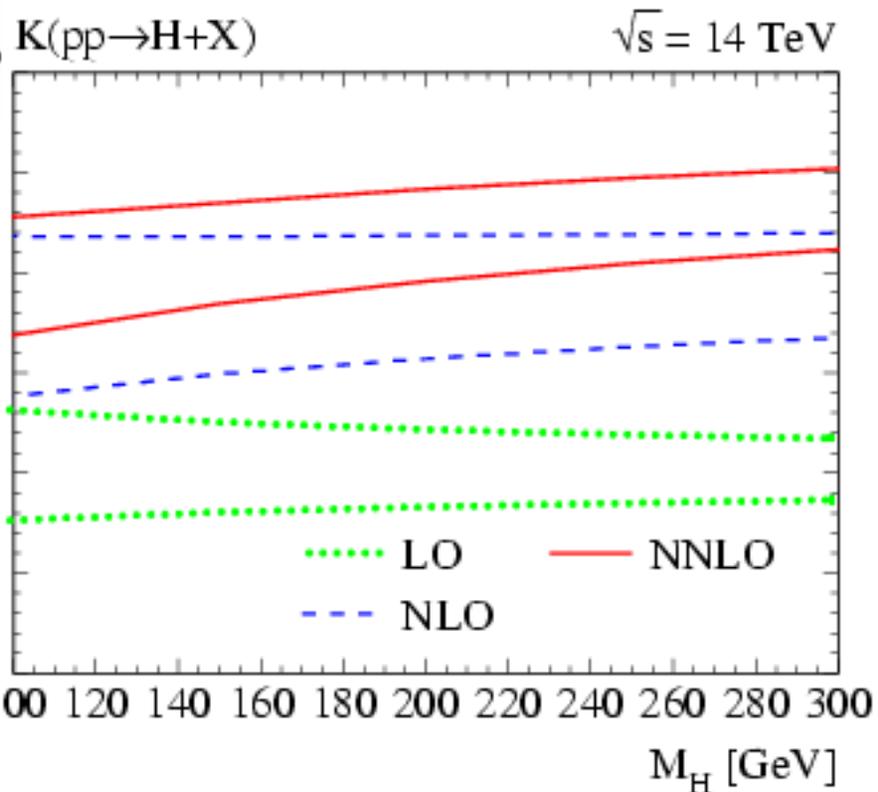
gg \rightarrow H



- Mode de production dominant (fonctions de structure de gluon)
- Dominé par le quark top dans le triangle
- Pour $m_{\text{top}} > m_h$, on peut utiliser l'approximation $m_{\text{top}} \rightarrow \text{infini}$ (la boucle se réduit à un vertex effectif ponctuel)
- Correction NLO calculée (pour tout m_{top}):
 - **K ~ 2**. Principalement à cause de la grande probabilité d'émission d'un gluon réel (échelle m_{top} dans la boucle)
 - Conséquence: le Higgs est souvent produit en association avec un jet
- Calcul NNLO accompli récemment dans la limite m_{top} infinie: rapport NNLO/NLO plus petit que NLO/LO et stabilisation de la variation avec le choix de l'échelle d'énergie



Stabilité de la section efficace en fonction du choix de l'échelle d'énergie à LO, NLO et NNLO

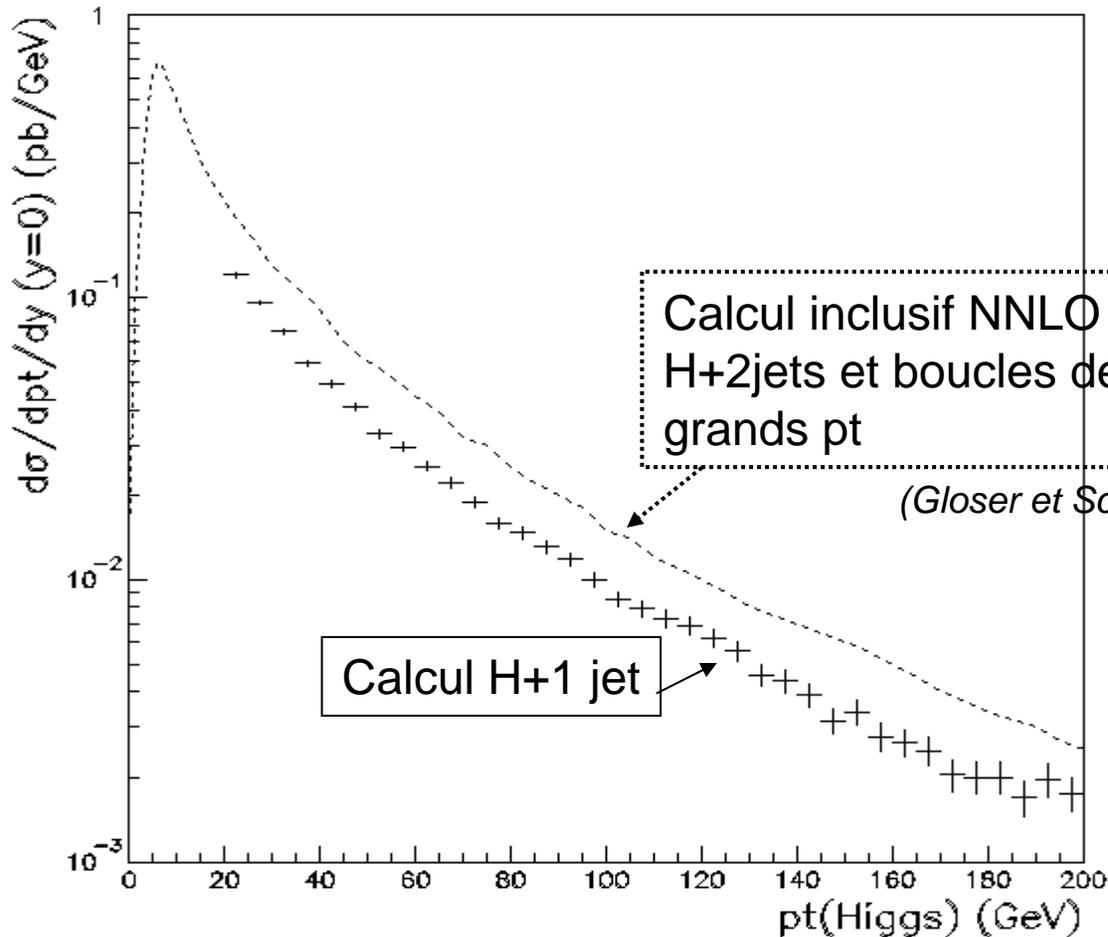


Ravindran, Smith, Van Neerven hep-ph/0302135
Harlander, Kilgore hep-ph/0201206
Catani, deFlorian, Grazzini hep-ph/011164

Impulsion transverse du boson de Higgs produit:

gg-> H: $pt(H)=0$ à LO

$pt > 0$ aux ordres supérieurs

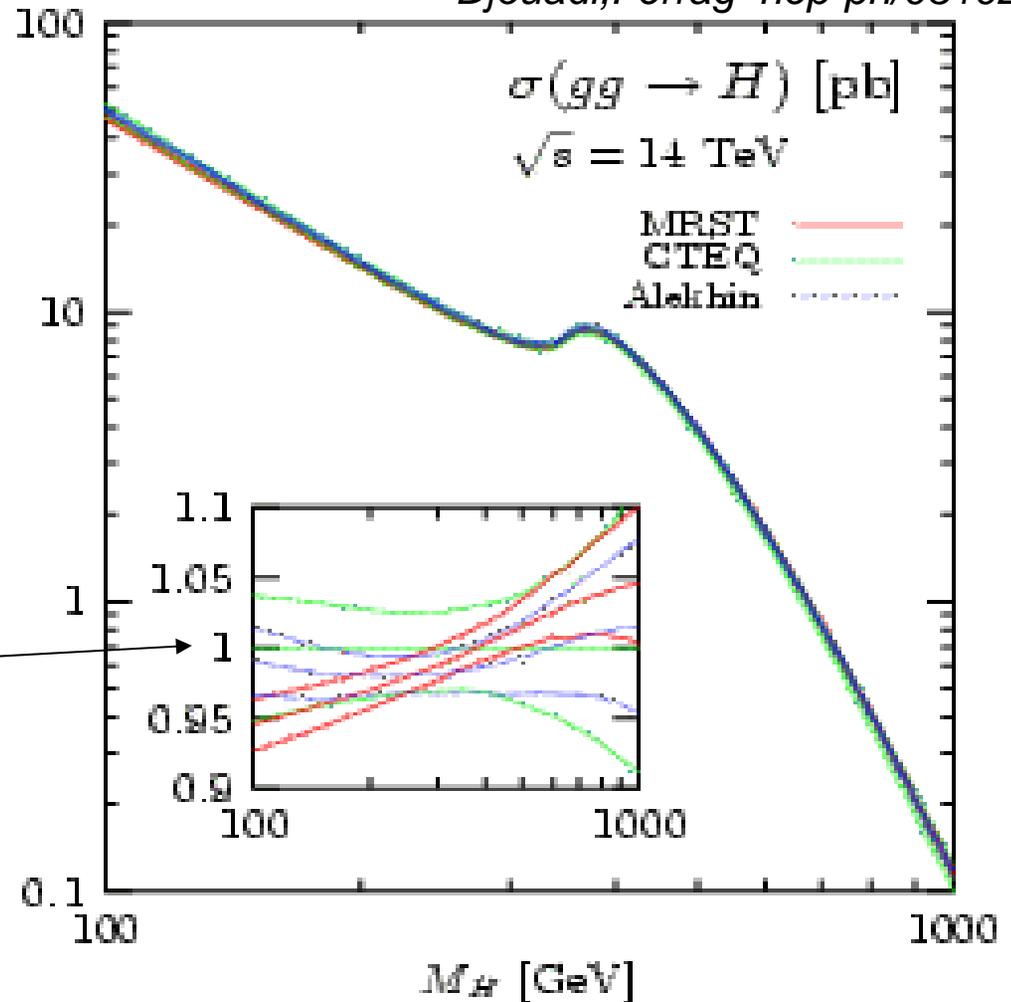


Incertitude due aux fonctions de structure

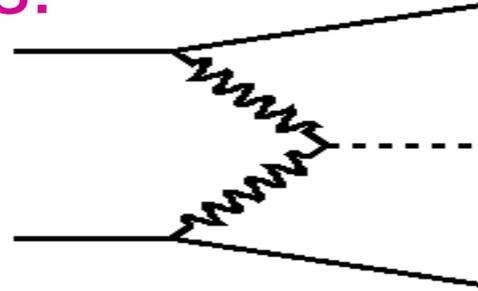
Djouadi, Ferrag hep-ph/0310209

- Différentes paramétrages (CTEQ, MRST)
- Pour chaque paramétrage, propagation des erreurs expérimentales

Comparaison avec valeur centrale CTEQ



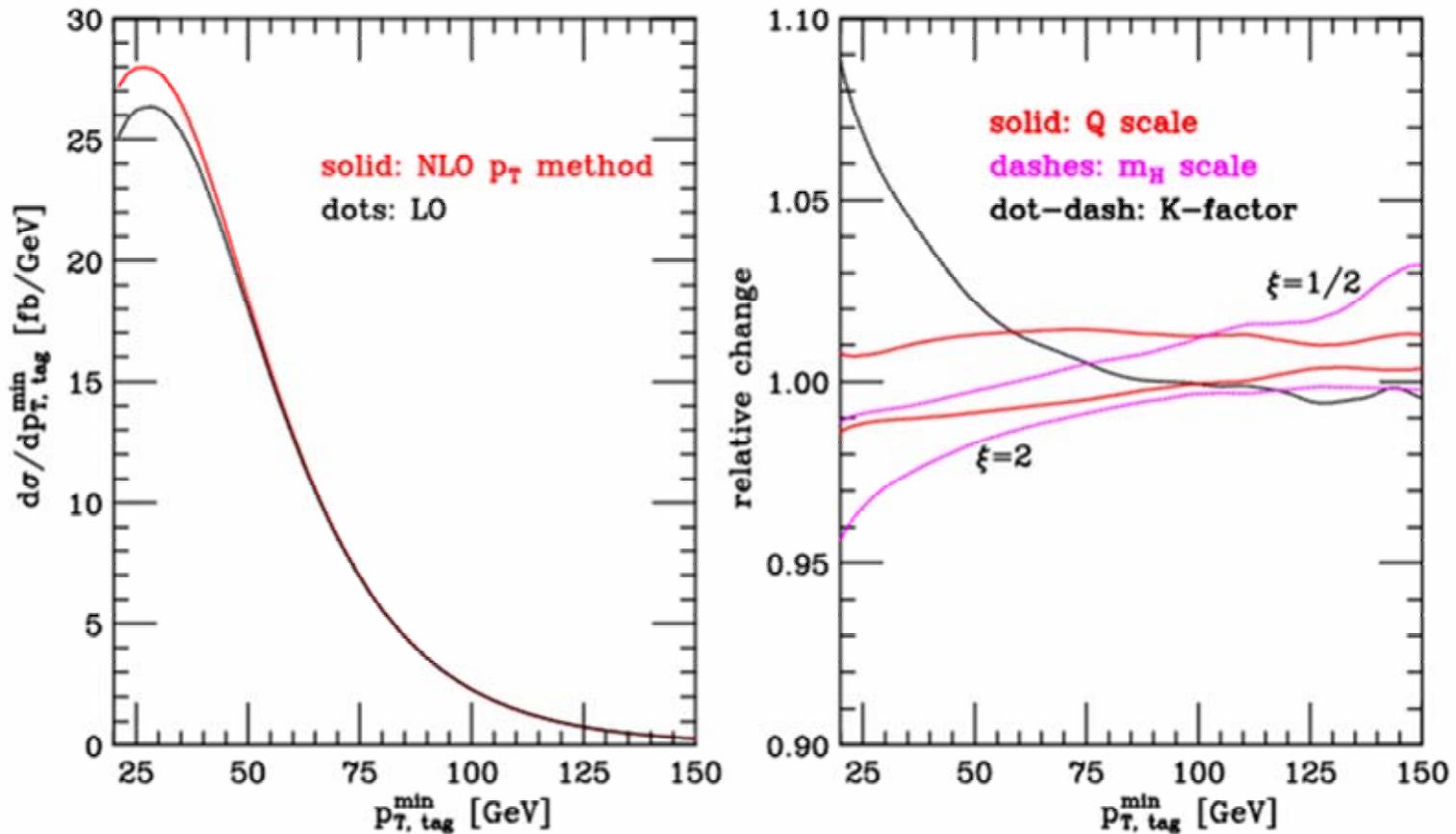
Fusion de bosons vecteurs:



- Cinématique particulière avec 2 quarks diffusés ($p_t \sim m_W/2$) à « petit » angle
 - Pas d'échange de couleur entre les 2 quarks initiaux
 - corrections QCD petites $K \sim 1.1$
 - rayonnement de gluon faible
- (plus de détails par la suite)

Han, Vallencia, Willenbrock hep-ph/9206246

Exemple de modification de la cinématique à NLO:
Pt(min) parton vres l'avant produit en association avec Higgs
(Fig, Oleari, Zeppenfeld hep-ph/0306109)



Production associée avec objet lourd

Section efficaces plus faibles

- WH, ZH

- $K \sim 1.3$

- déclenchement aisé si $W, Z \rightarrow$ lepton

- ttH (et bbH)

- section efficace NLO calculée

- $t \rightarrow bW \Rightarrow$ lepton+jets. Combinatoire compliquée si on veut complètement reconstruire l'événement

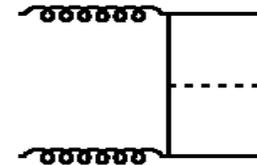
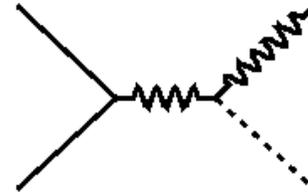
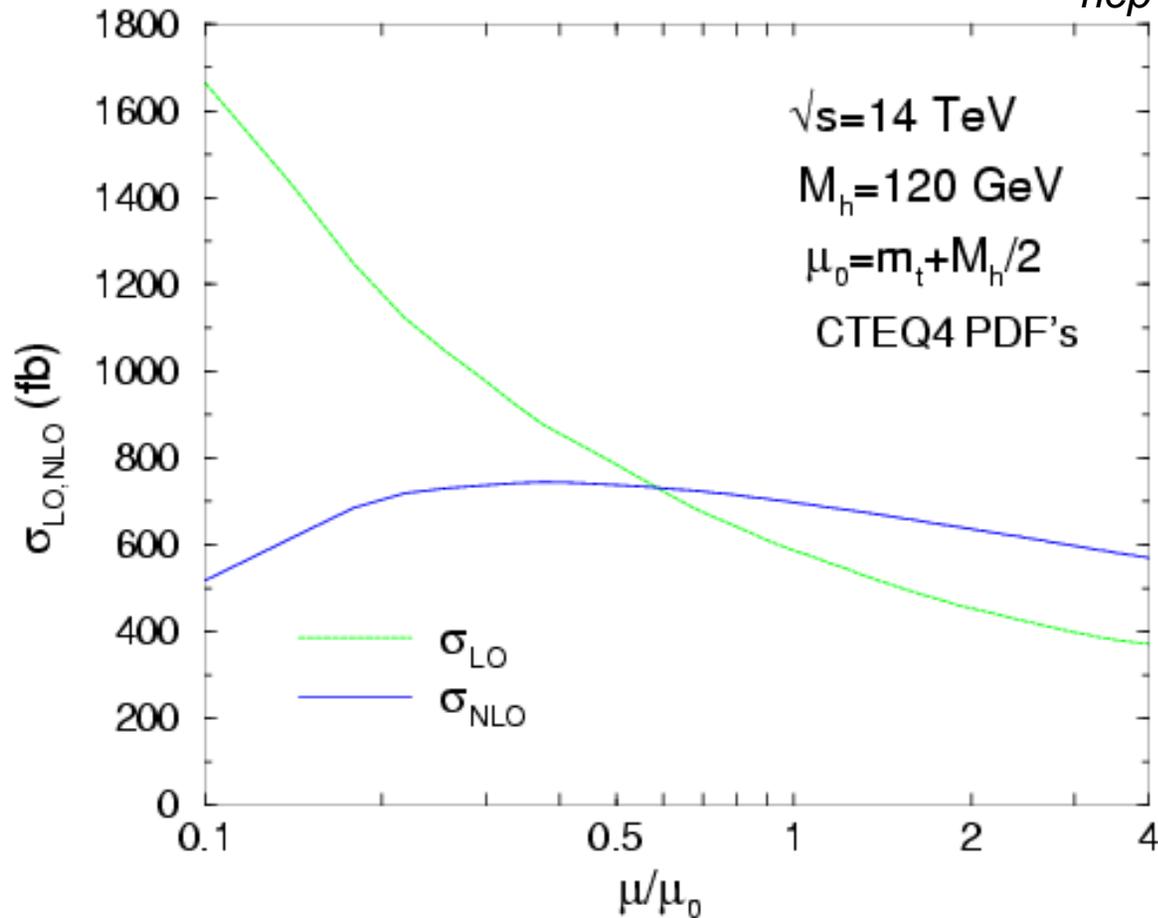


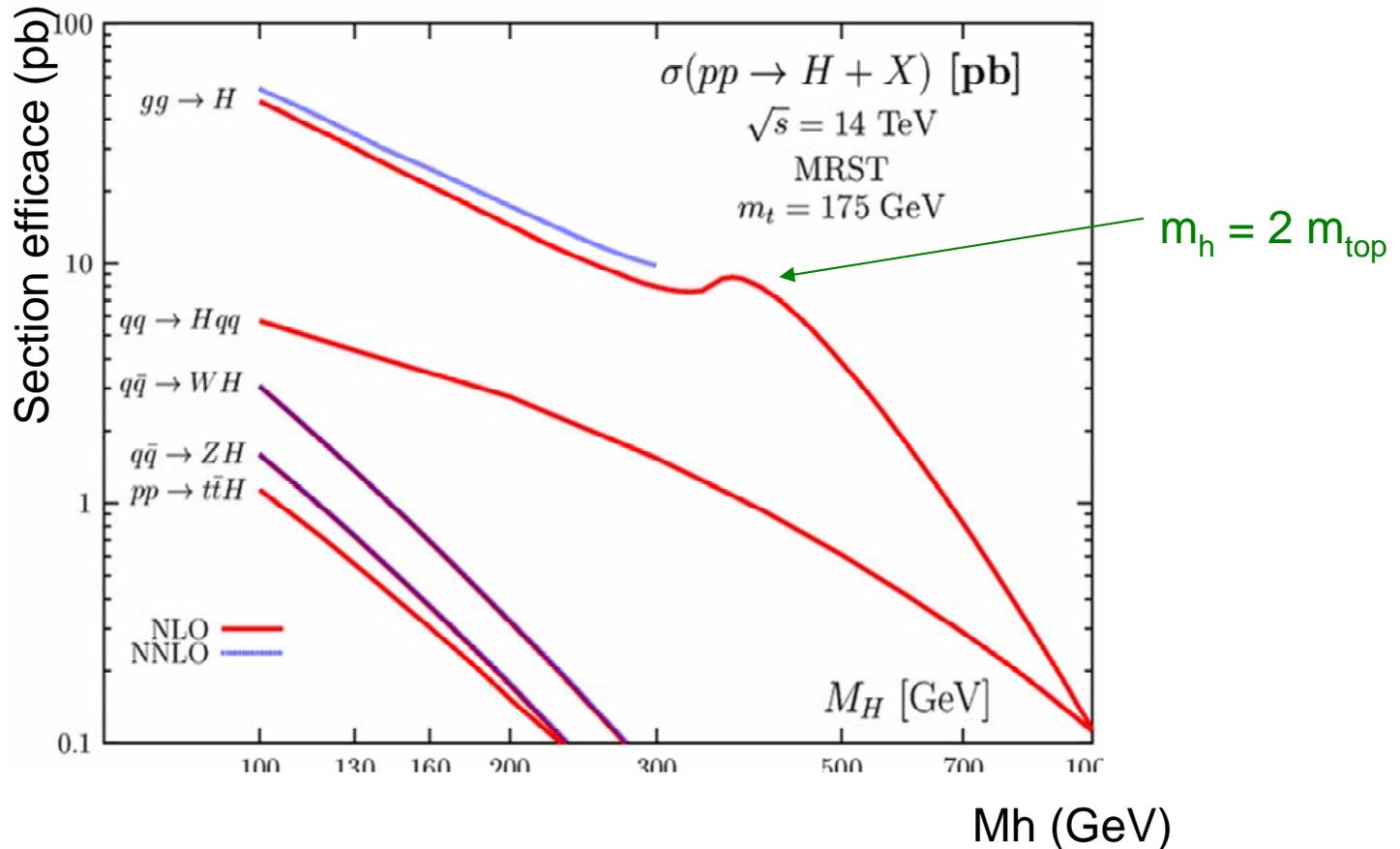
Illustration du calcul NLO de la section efficace ttH

L.Reina et al
hep-ph/0305282



Variation avec choix échelle énergie

Résumé sur sections efficaces de production



Incertitudes typiques sur sections efficaces totales:

- gg 10-20 % (NNLO)
- VBF ~ 5% (NLO)
- WH,ZH ~< 5% (NNLO)
- tth 10-20 % (NLO)

(voir par exemple
Djouadi, talk à Vienne 04)

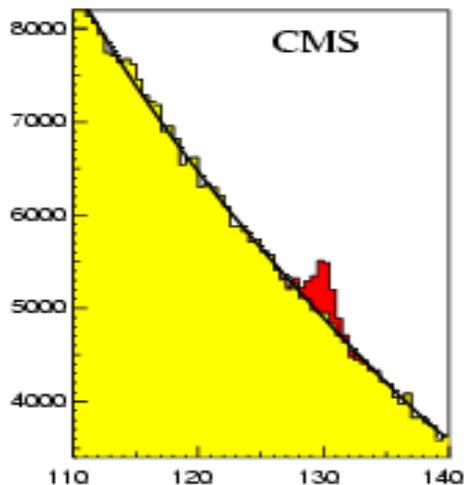
Canaux accessibles au LHC

- Si $m_H > 2 m_Z$, désintégration $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptons permet d'accéder à des masses plus basses si un Z est virtuel (taux d'événements réduit)
- $H \rightarrow W W^*$, notamment si le H est produit par fusion de bosons vecteurs
- $H \rightarrow b \bar{b}$ inclusif impossible (trop de bruit de fond)
 - possible en production associée $t \bar{t} H$ pour $m_H < 120$ GeV
- $H \rightarrow \tau \tau$ en production par fusion de bosons vecteurs (topologie permettant d'améliorer le rapport signal/bruit)
- Mode rare $H \rightarrow \gamma \gamma$: permet une très bonne reconstruction de la masse (précision du calorimètre électromagnétique).

$m_H < 2m_Z$

H \rightarrow $\gamma\gamma$

- Mode rare (BR $\sim 0.2\%$ pour $m_h=120$ GeV)
- $\Gamma(H) < 0.1$ GeV
- Reconstruction précise de la masse possible par calorimètre électromagnétique
- Production non résonante de paires $\gamma\gamma \gg$ signal
- \Rightarrow observer un pic dans la distribution de masse invariante $\gamma\gamma$ au dessus du bruit de fond



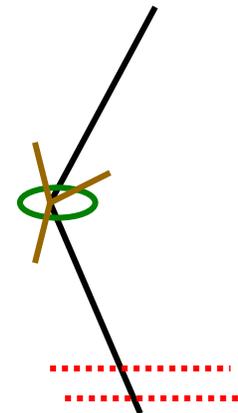
S = Signal dans intervalle de masse autour de m_h
B = bruit de fond dans cet intervalle
(\sim résolution en masse)
 \sqrt{B} = fluctuations statistiques du bruit de fond
S/ \sqrt{B} = signification statistique attendue du signal
 $=5 \Leftrightarrow$ si que du bruit de fond, 1 expérience sur 3.5 millions produira l'excès observé

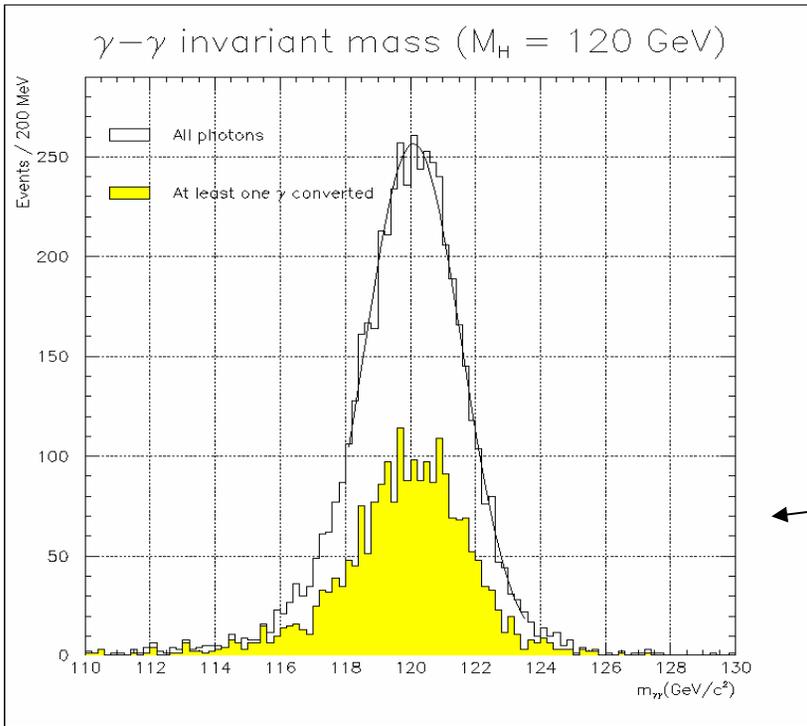
Sélection:

- 2 photons dans l'acceptance du détecteur (typiquement $\eta < 2.5$), région de transition entre calorimètres tonneau et bouchon exclue ($\sim -10\%$) pour garantir une mesure précise de l'énergie
 - $P_t(\text{max}) > 40 \text{ GeV}$
 - $P_t(\text{min}) > 25 \text{ GeV}$
- Compromis entre niveau du bruit de fond et efficacité pour le signal
- $\sim 50\%$ des désintégrations $H \rightarrow \gamma \gamma$ satisfont ces critères

Reconstruction de la masse $\gamma\gamma$

- $M^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\Theta)$
- **Résolution en énergie (basse luminosité):**
 - Atlas: $\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\% \oplus (\sim 0.3)/E$
 - CMS: $\sigma_E/E = 2.5(5.7)\%/\sqrt{E} \oplus 0.55\% \oplus 0.15(0.77)/E$
for barrel (end-cap)
 - queues non-gaussiennes à cause des conversions des photons avant le calorimètre
 - Corrections pour photons convertis (fonction de la matière inactive avant le calorimètre)
 - Bruit dépend de la luminosité: effet d'empilement => particules de basse énergie dans les cellules de calorimètre utilisées pour mesurer le photon
- **Mesure de Θ :**
 - mesure du point d'impact du photon au niveau du calorimètre: résolution \sim mm => pas d'effet sur M
 - **Position du vertex primaire: dispersion de 5cm => il faut connaître la position événement par événement**
 - traces de l'événement sous-jacent
 - mesure directe de la direction (angle polaire) des photons avec le calorimètre (segmentation longitudinale)





Resolution Position:

$\theta \sim 60 \text{ mrad}/\sqrt{E}$ (mesure de la direction polaire du photon)

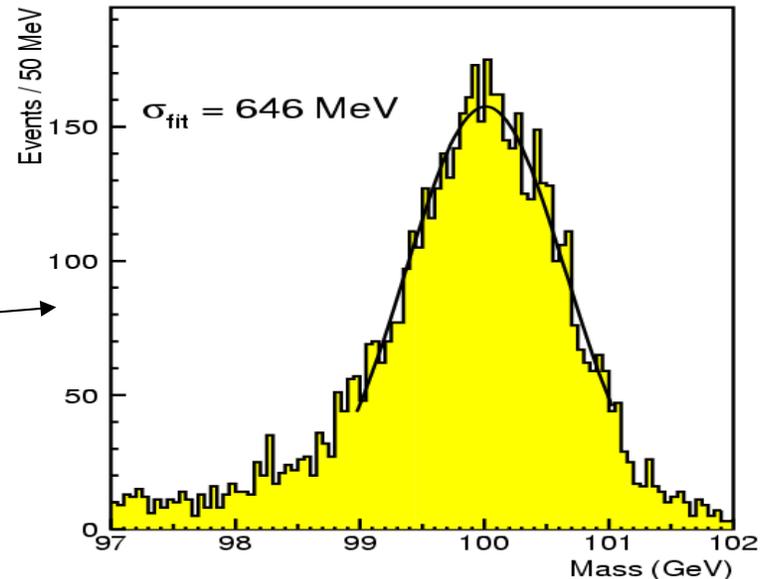
$\varphi \sim 4 \text{ mrad}/\sqrt{E}$ (plan transverse:vertex connu)

$Z(\text{vertex}) \sim 16 \text{ mm}$

Résolution en masse (Atlas): avec

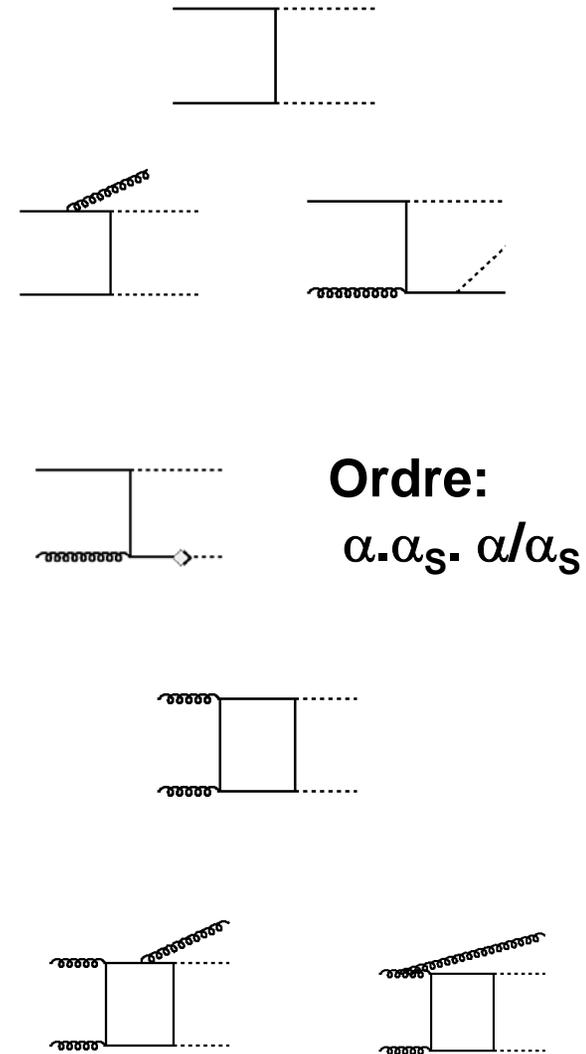
mesure de la direction des photons (haute luminosité), 20% des événements en dehors de $\pm 1.4 \sigma(\text{masse})$

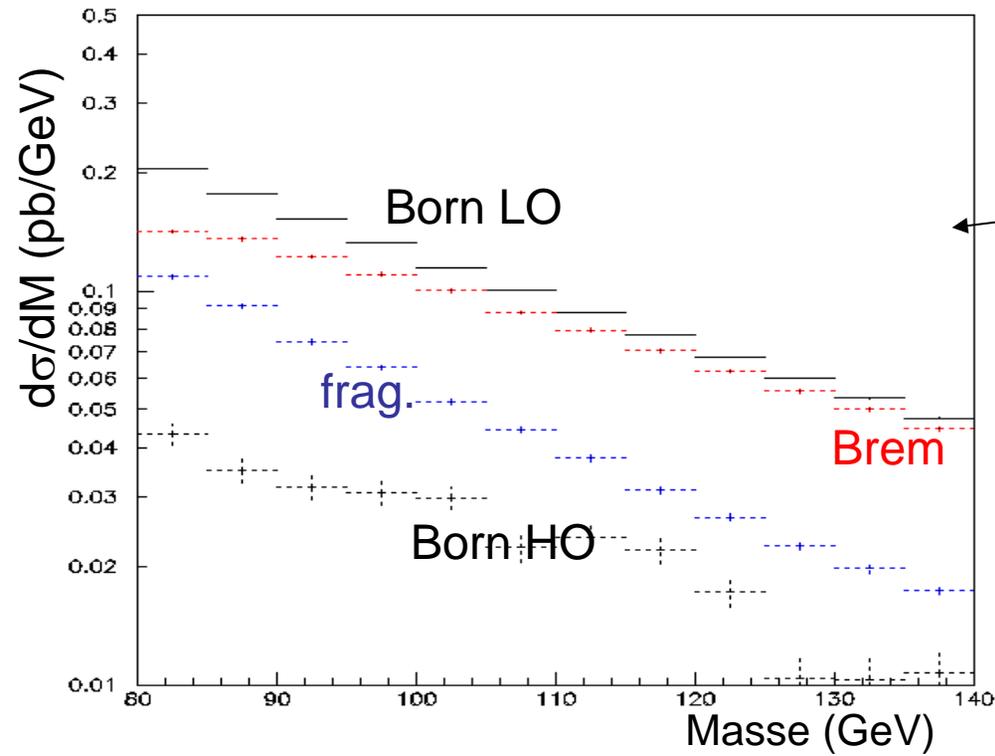
Résolution en masse (CMS)
(basse luminosité)
(pour $m_h = 100 \text{ GeV}$)



Bruit de fond irréductible $\gamma\gamma$

- Diagramme LO: Born
- Calcul complet NLO existe: inclut corrections d'ordre supérieur à Born + diagramme Bremsstrahlung => **augmente section efficace par facteur > 2**
- **Complication 1:** fragmentation de quarks/gluons en photons: inclus dans le calcul NLO (paramétrage à partir de données)
- **Complication 2:** Production $\gamma\gamma$ à partir de l'état initial gg: diagramme en boîte est \sim comparable à Born LO (fonctions de structure). Formellement d'ordre NNLO de $\gamma\gamma$ inclusif
- Diagramme en boîte est maintenant calculé à NLO: corrections \sim sous contrôle

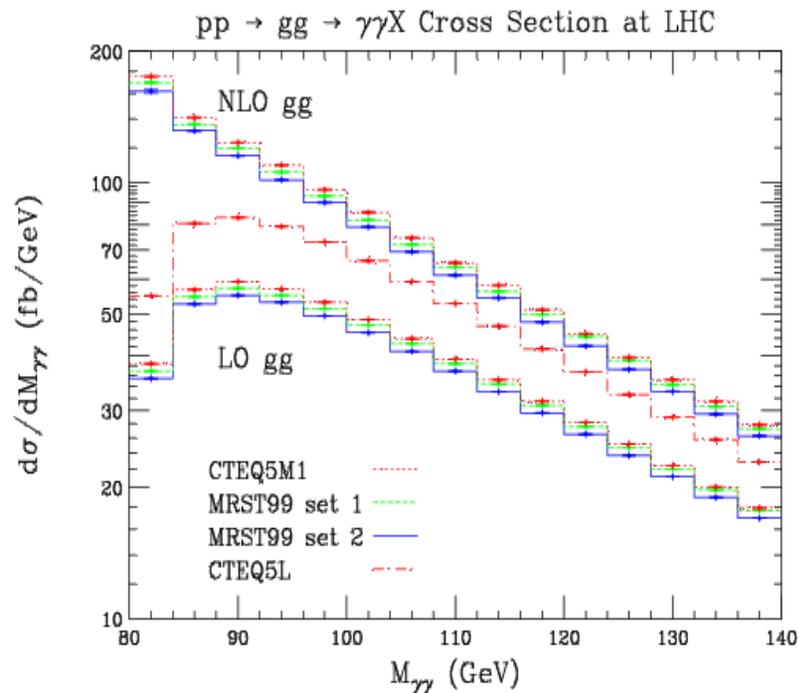




Brem ~ comparable a Born
 Résultat dépend du critère de
 séparation entre les photons et les
 quarks (isolation)

*Binoth, Guillet, Pilon, Werlen in
 Eur.Phys.J.C16(2000)311*

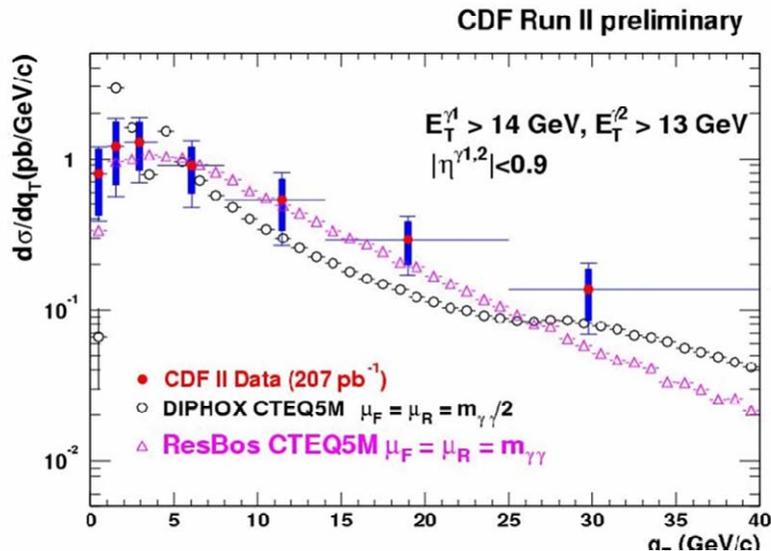
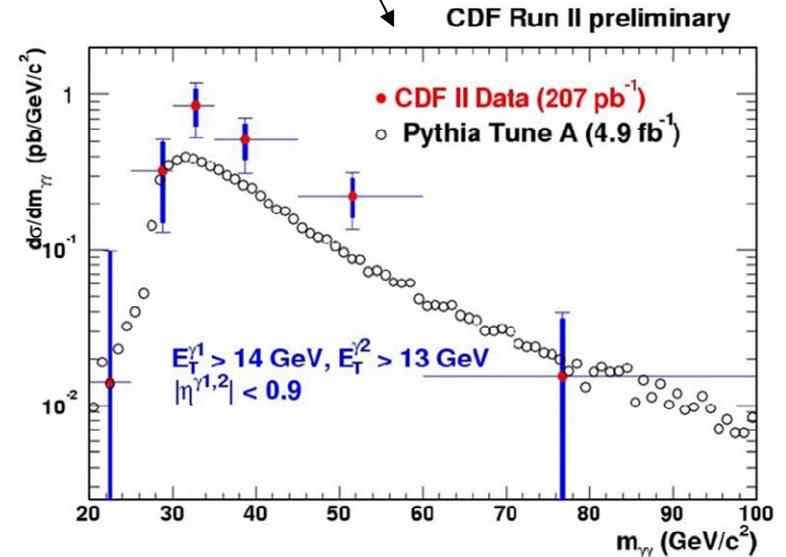
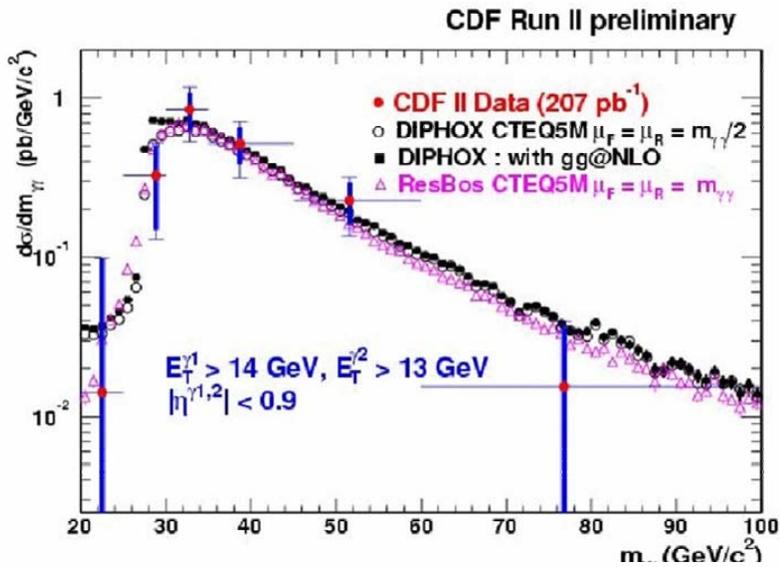
Correction NLO à Boite:
 Facteur K < Facteur du signal
 gg-> Higgs



(Bern, Dixon, Schmidt hep-ph/0206194)

Étude des événements $\gamma\gamma$ au Tevatrons

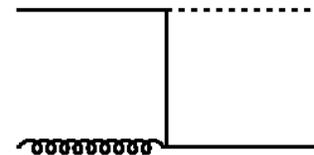
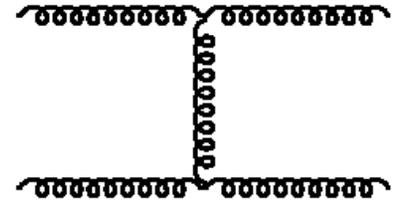
Masse($\gamma\text{-}\gamma$)
 Note: Boite est $\leq 10\%$ pour $m > 40$ GeV
 Calcul LO n'est pas suffisant pour décrire les données



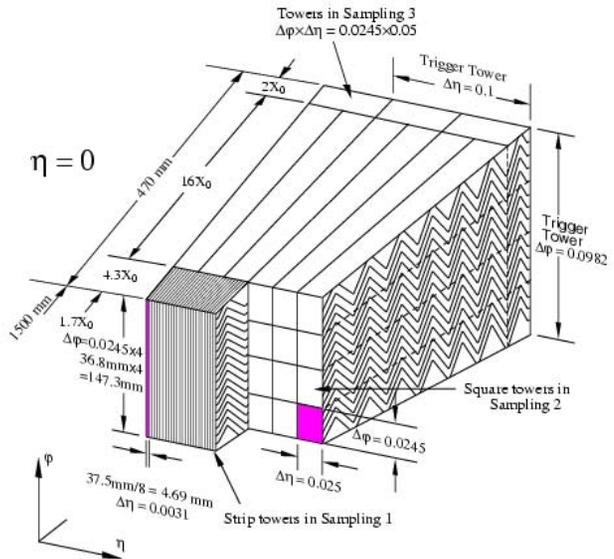
Pt(paire de photons): provient des diagrammes ordre supérieur

Bruit de fond réductible

- Section efficaces jet-jet et γ -jet $\gg \gamma\text{-}\gamma$
- bruit de fond réductible si mauvaise identification d'un photon en jet
- peut apparaître si jet fluctue $\Rightarrow \pi^0$ de grande énergie (les 2 photons sont très proches et donnent a priori un seul amas dans le calorimètre électromagnétique)
- \Rightarrow on a besoin d'une rejection ~ 5000 des jets ($P_t \sim 50$ GeV) pour réduire le bruit de fond réductible en ordre de grandeur en dessous de bruit de fond irréductible

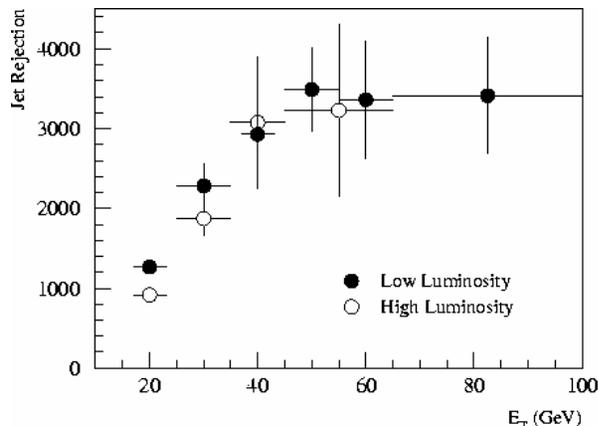
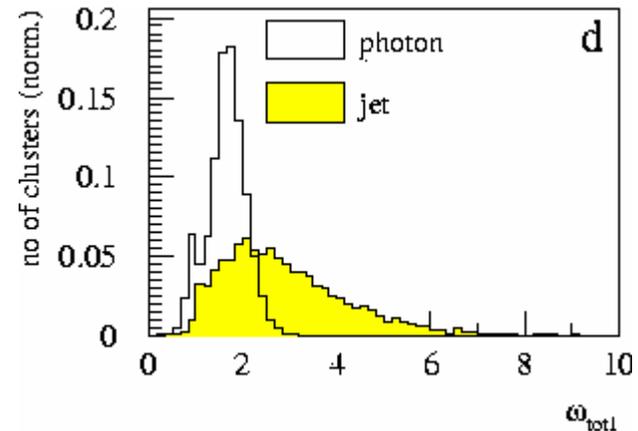


Identification des photons au LHC



Basé principalement sur calorimètre
 Utilise segmentation transverse fine: les gerbes électromagnétiques induites par les photons sont plus étroites que les dépôts d'énergie des jets + pas d'activité hadronique accompagnant les photons

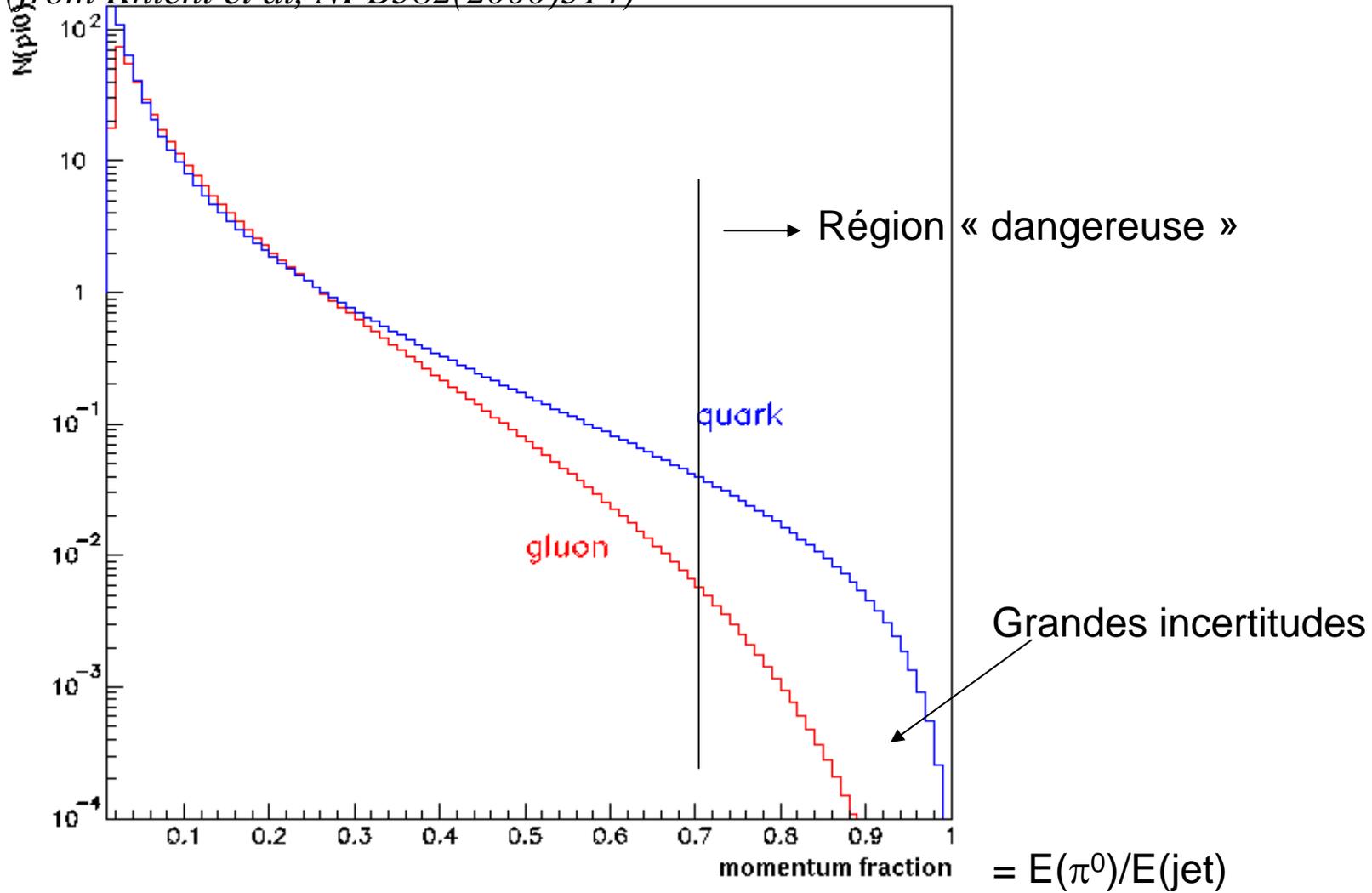
Atlas: segmentation très fine dans le premier compartiment pour distinguer gerbes d'un photon, de 2 photons proches d'un π^0 (séparation $\sim 5\text{mm}$)



← TDR physique Atlas:
 Rejection ~ 3000 par jet

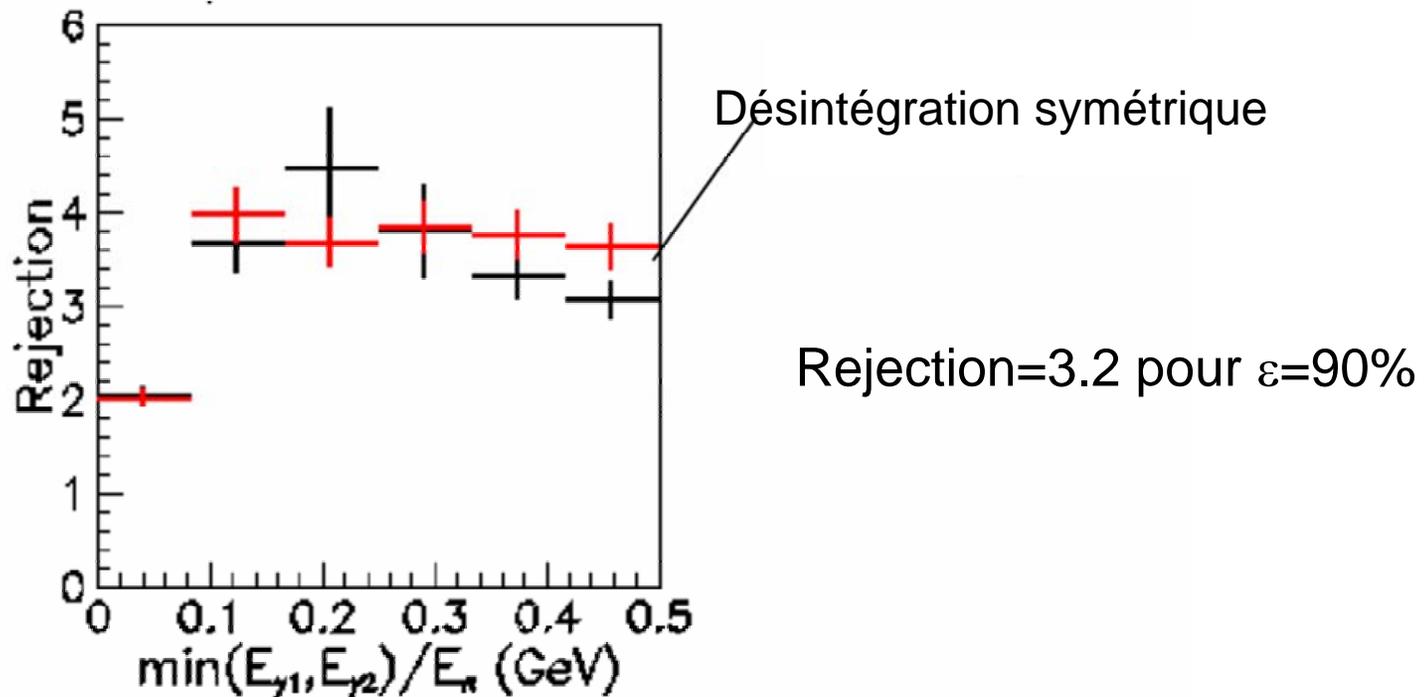
Fonction de fragmentation de quark et gluon en π^0

(from Kniehl et al, NPB582(2000)514)



Calorimètre EM Atlas permet de rejeter les π^0 isolés grâce à la segmentation fine dans le premier compartiment.

Résultats de faisceau test (superpose 2 gerbes de photons pour imiter la cinématique d'un π^0 de 50 GeV)



Résultats pour canal $\gamma\gamma$ ($m_h=120$ GeV)

- différentes estimations:
 - Atlas TDR (1999): section efficace signal LO, (Born+BOX LO)*1.5
 - Résolution Atlas+calculs NLO signal et bruit de fond
 - CMS: signal NLO

	(30 fb ⁻¹)	
	Atlas tdr	Atlas nlo
Résolution (GeV)	1.2	1.2
Signal	384	760
Bruit de fond ($\gamma\text{-}\gamma$)	7500	12300
Bruit de fond (jets)	2600	2600
Signification	3.9	6.2

CMS:
~7 sigmas
pour 30 fb⁻¹
(NLO)

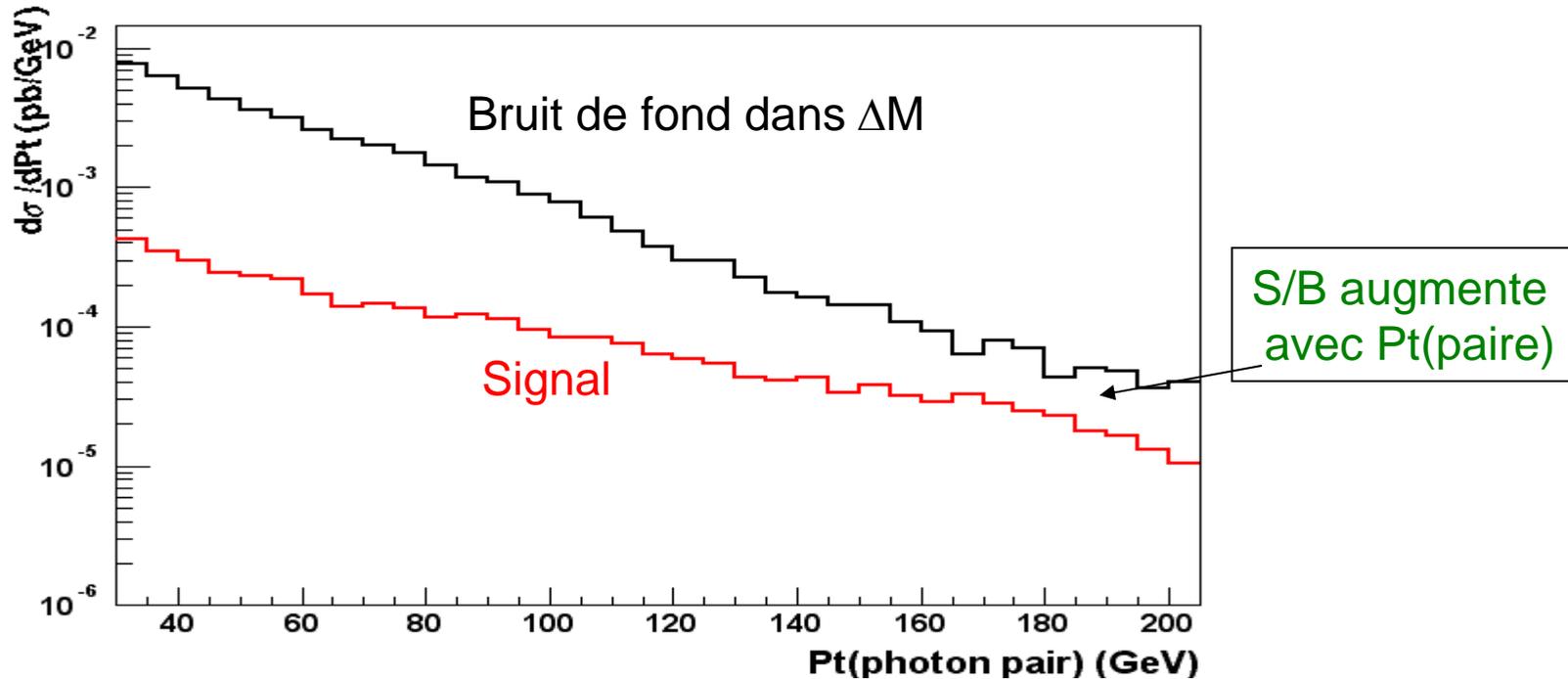
Assez grande
incertitude

Efficacité de sélection + effet des queues non-gaussiennes inclus
Efficacité et résolution dépendent de la luminosité

Variations sur le canal $\gamma\gamma$

- Plus d'information que juste la masse invariante $\gamma\gamma$
- Higgs produit souvent à grand pt (avec un jet) => recherche événements $\gamma\gamma$ +jet ou $\gamma\gamma$ avec grand pt de la paire (avantage: le jet produit en association avec H permet de déterminer la position du vertex primaire => légère amélioration de la résolution à haute luminosité)
- Production par mode VBF => événements $\gamma\gamma$ +2 jets avec topologie particulière (voir plus tard)
- Production associée WH,ZH,t-tbar H => événements avec lepton+ $\gamma\gamma$

Exemple 1 : $pt(\gamma-\gamma)$

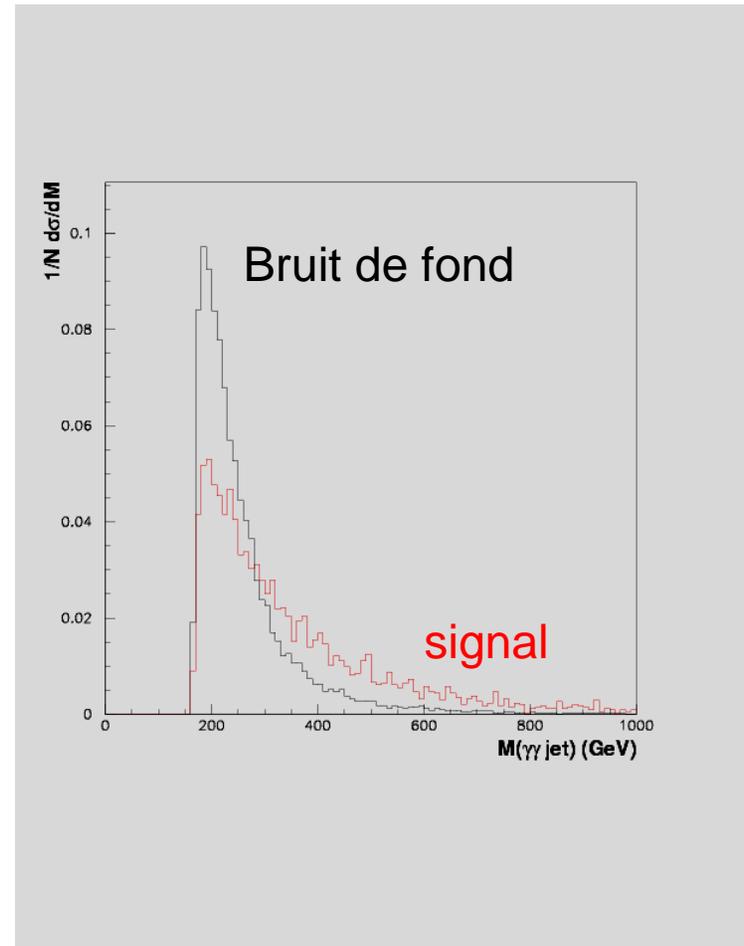


Signal: à grand pt ~la moitié vient des corrections d'ordre supérieur à $gg \rightarrow H$ et la moitié de la production par VBF (intrinsèquement $pt(H) > 0$)

Bruit de fond: dominé par la contribution bremsstrahlung

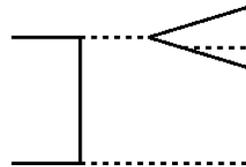
Exemple 2 : canal $\gamma\text{-}\gamma\text{-jet}$

- Similaire à demander paire $\gamma\text{-}\gamma$ avec grande impulsion transverse
- Peut appliquer une coupure sur la masse invariante totale pour améliorer le rapport S/B
- Typiquement:
 - $S = 75$, $B \sim 300$ pour 30fb^{-1}
 - note: élément de matrice $\gamma\text{-}\gamma\text{-jet}$ est le calcul LO de l'état final $\gamma\text{-}\gamma\text{-jet}$ (faisait partie des corrections NLO à $\gamma\text{-}\gamma$). Corrections NLO à $\gamma\text{-}\gamma\text{-jet}$ existent:
 - signal $K \sim 1.6 - 1.8$
 - Bruit de fond $K \sim 1.5 - 2$



Exemple 3 : canal lepton- $\gamma\gamma$

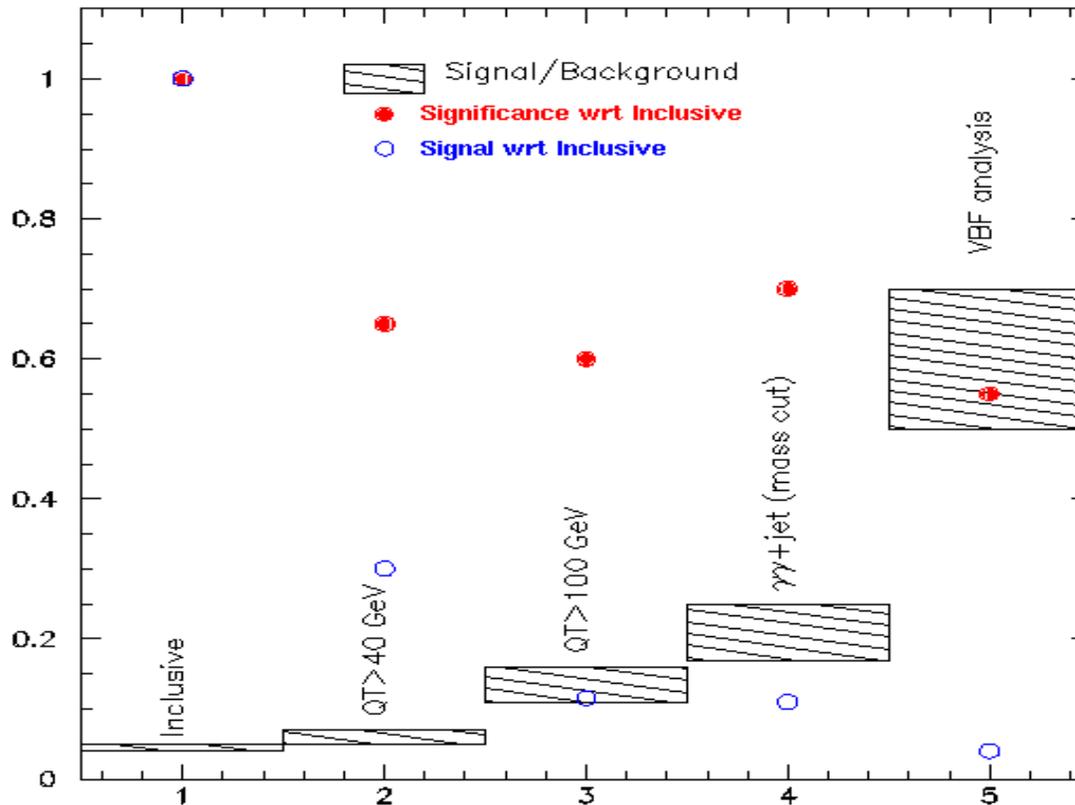
- **Signal:** production associée WH,ZH (aussi ttbarH) avec W,Z- \rightarrow lepton (e ou μ)
- **Bruit de fond:** production associée W,Z avec photon(s) et/ou désintégrations radiatives (par exemple, Z- \rightarrow e e γ)
- **Bruit de fond γ Z (Z- \rightarrow l+l- γ) important avant coupures spécifiques (masse invariante l- γ)**



$$M(l\gamma) > 25 \text{ GeV}$$
$$M(l\gamma) \neq M_Z \pm 8 \text{ GeV}$$

- **Avantages:**
 - bon rapport signal/bruit possible
 - mesure du vertex primaire par le lepton
- **Inconvénient:**
 - Taux d'événements faible => seulement possible à haute luminosité
- Pour $m=120 \text{ GeV}$, et 100 fb^{-1} de luminosité, attend 13 événements de signal pour un bruit de fond de 5.7 événements (signification statistique = 4.3 sigmas)

$\gamma\text{-}\gamma$ inclusifs vs $\gamma\text{-}\gamma$ à grand pt vs $\gamma\text{-}\gamma\text{+jet}$



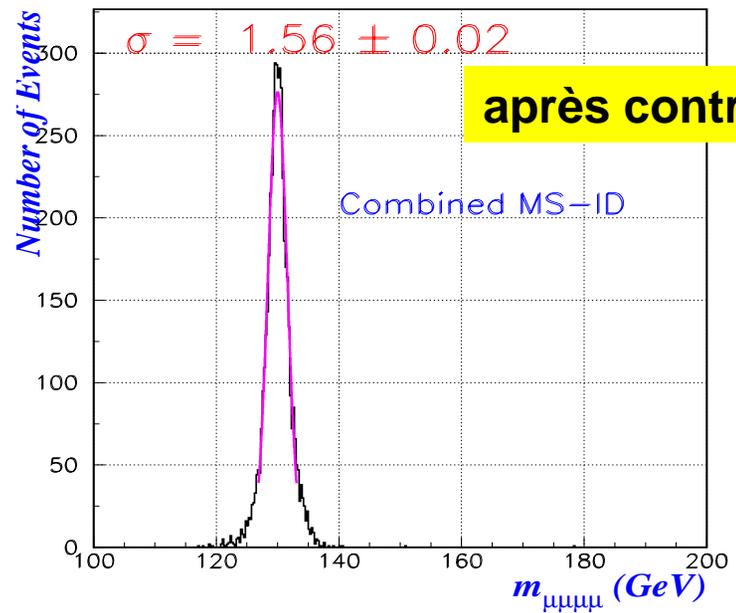
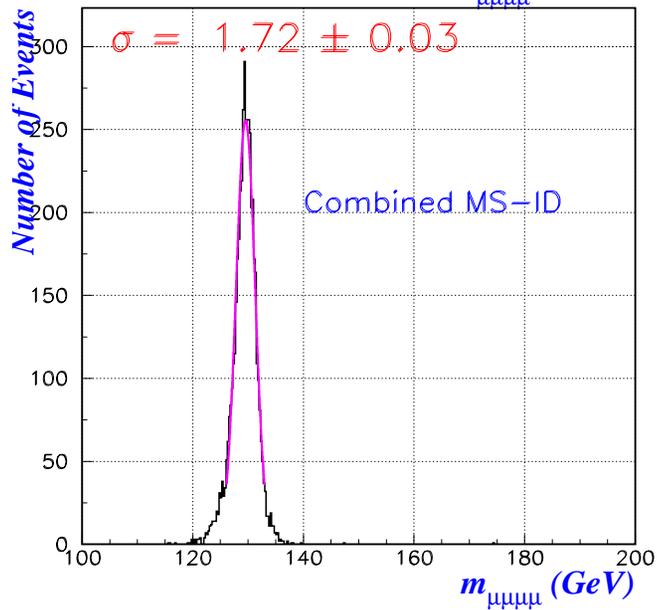
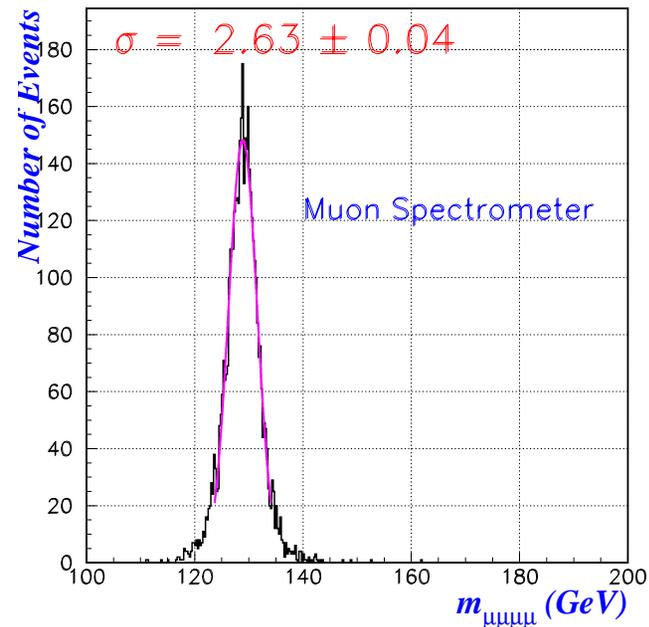
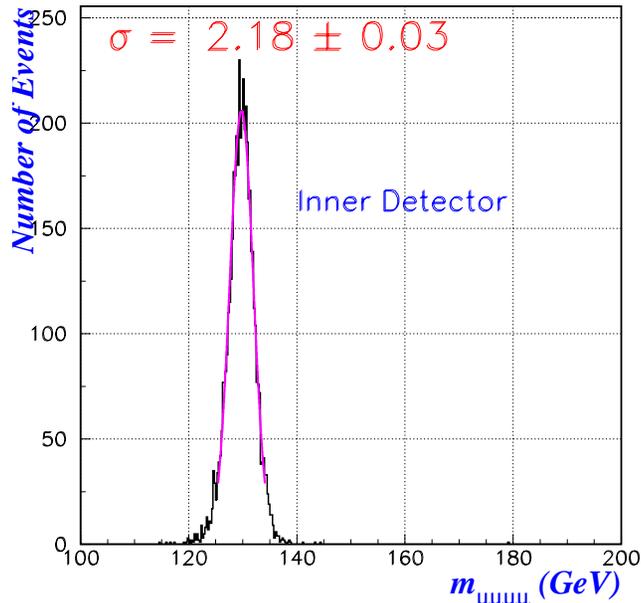
⇒ Gain en combinant les différentes méthodes (ou en utilisant les variables discriminantes dans l'analyse)

Prédictions absolues du bruit de fond: Difficile par Monte-Carlo. Beaucoup plus facile avec les données (régions de contrôles sur les ailes de la distribution en masse)

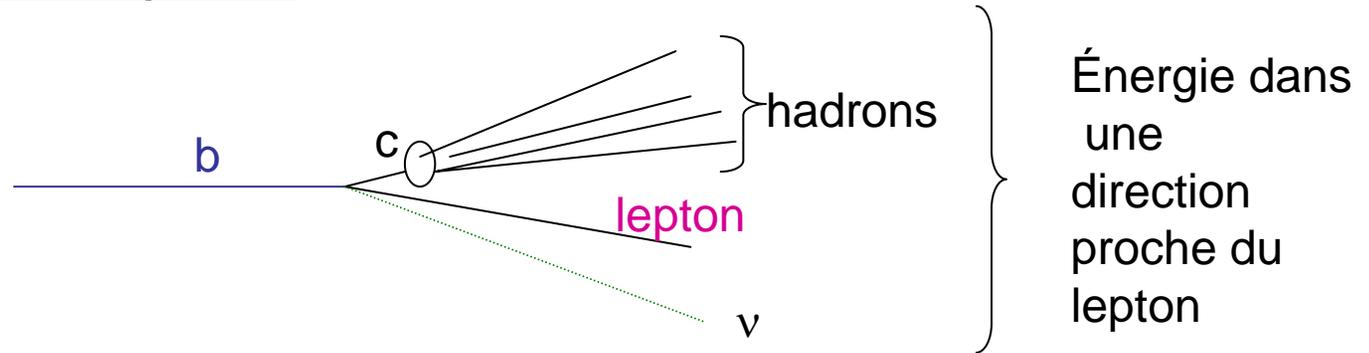
H \rightarrow Z Z* \rightarrow 4 leptons

- rapport de branchement faible \Rightarrow peu d'événements
 - doit détecter les leptons du Z* \Rightarrow $pt(\text{lepton}_{1,2}) > 20$ GeV, $pt(\text{lepton}_{3,4}) > 7$ GeV
 - 1 Z réel \Rightarrow coupure autour de m_Z + contrainte de la masse du Z pour améliorer la résolution sur m_h (pas limitée par la largeur du Higgs)
 - masse invariante autre paire $>$ valeur minimale
 - Acceptance coupures cinématiques $\sim 25-50\%$ \Rightarrow 0.3 à 2 fb
 - **Bruits de fond:**
 - **continuum ZZ* \rightarrow 4 leptons**, irréductible
 - **ZZ \rightarrow lepton lepton $\tau\tau$** (avec $\tau \rightarrow$ lepton)
 - **Z b bbar (\rightarrow 2 lepton de Z, 2 leptons de b)**
réduit par coupure isolation sur les leptons
 - **ttbar** (avec 2 leptons des 2 W et 2 leptons de b)
non résonant en M_Z , réduit aussi par coupure isolation
 - **Bruit de fond avec faux leptons négligeable**
- } Similaire au signal avant isolation

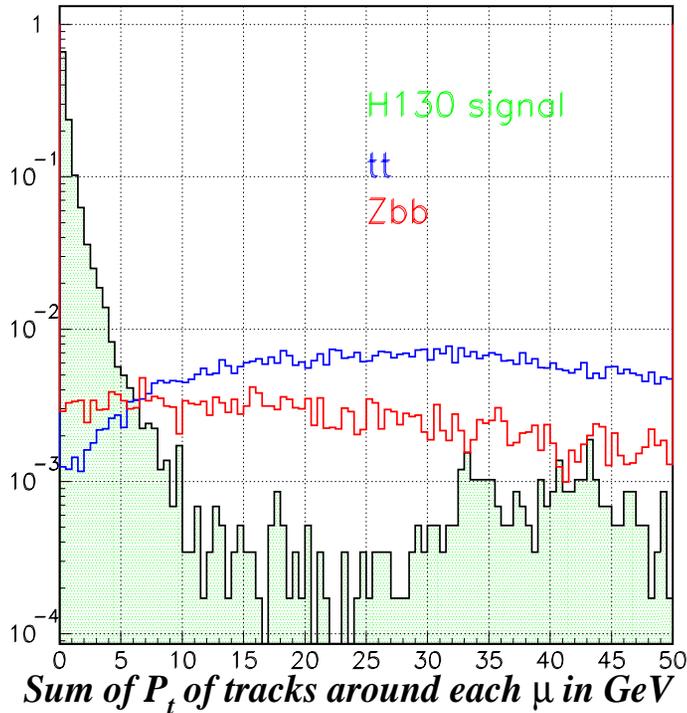
Résolution masse 4μ Atlas



Isolation des leptons



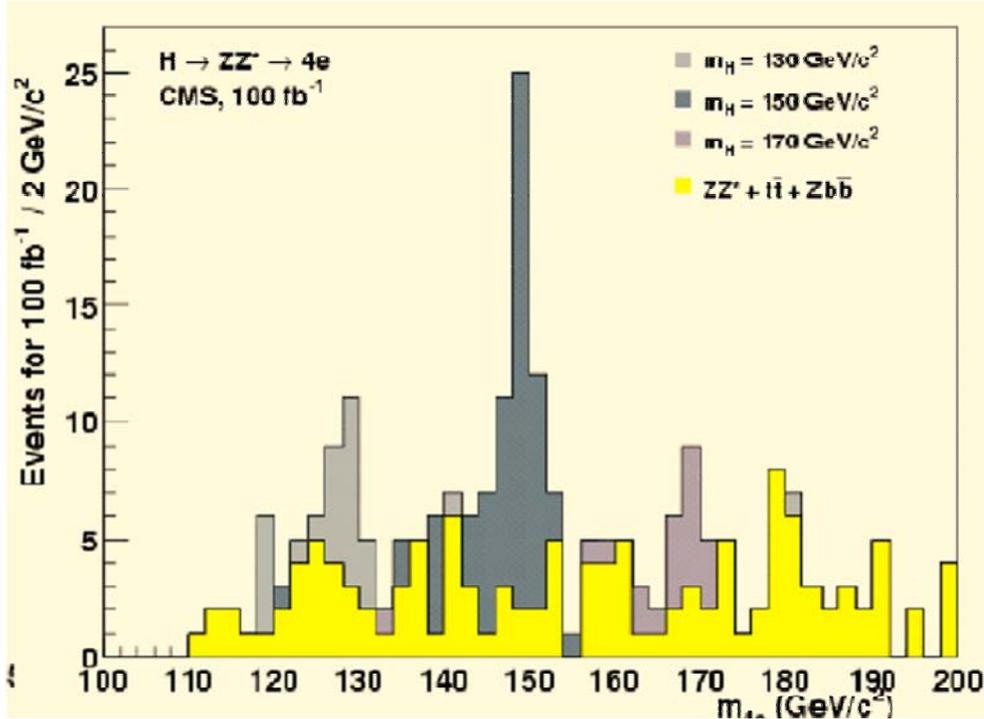
Σ pt(traces) dans $\Delta R=0.2$ du lepton



Isolation	eff % $m_H=130$	rejection $t\bar{t}$	rejection Zbb
Calorimeters	89 ± 0.4	163 ± 8	24 ± 2
Tracker	90 ± 0.4	98 ± 5	22 ± 2

Meilleur rejection pour t-tbar car l'énergie du b est plus grande => plus d'énergie emporté par les hadrons, plus collimes avec le lepton

Utilise paramètre d'impact pour améliorer la rejection des leptons de b



$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ électrons (CMS)}$

Résultats pour 30 fb^{-1}
TDR Physique Atlas
(sections efficaces LO)

	Nb événements			
Higgs mass (GeV)	120	130	150	170
Signal	4.1	11.4	26.8	7.6
$t\bar{t}$	0.01	0.02	0.03	0.02
$Zb\bar{b}$	0.08	0.12	0.19	0.17
ZZ^*	1.23	2.27	2.51	2.83
$ZZ \rightarrow \tau\tau ll$	0.13	0.20	0.25	0.08
Significance (S/\sqrt{B})	3.4	7.0	15.5	4.3
Significance (Poisson)	2.4	4.8	15.5	3.2

$> 5 \sigma$ pour 100 fb^{-1}

Détail des efficacités (en particulier isolation) dépend de la luminosité

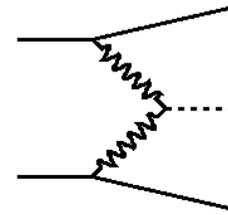
Canaux VBF

Cherche les événements compatibles avec la topologie de production par fusion de bosons vecteurs

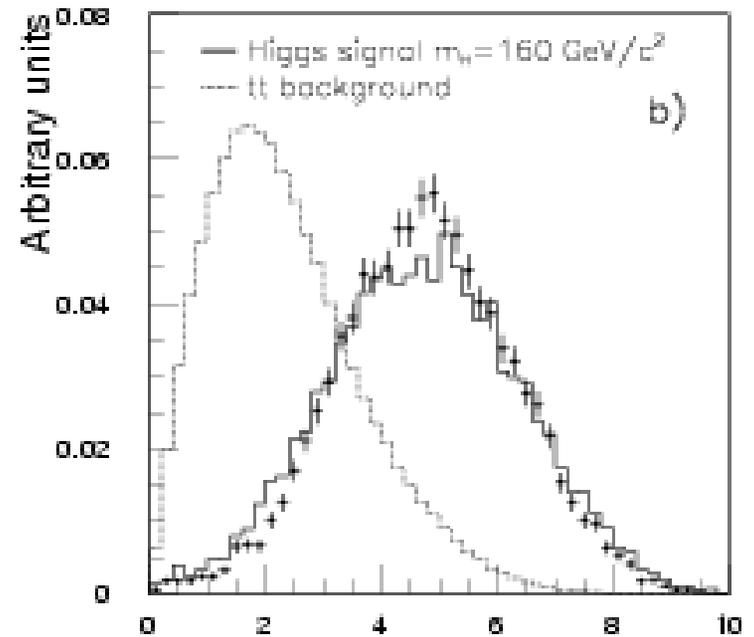
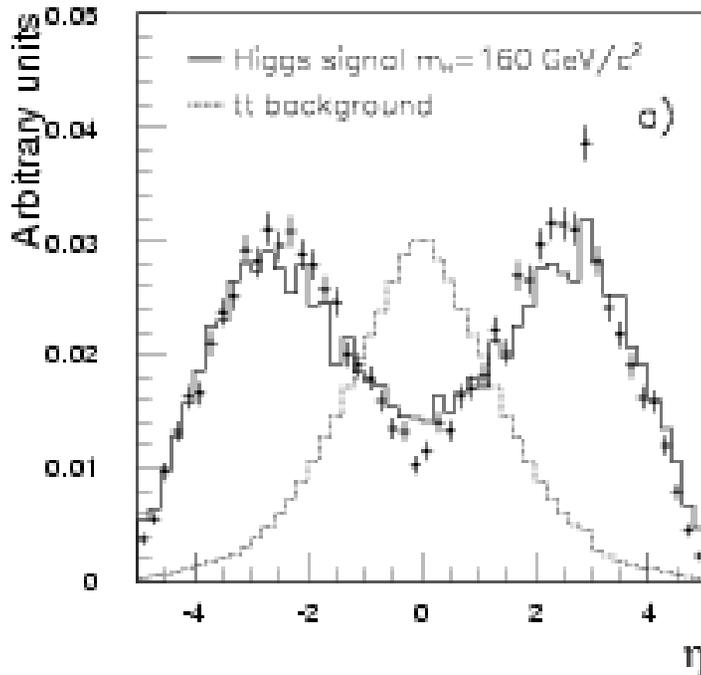
- Caractéristiques générales
- $H \rightarrow \tau \tau$
- $H \rightarrow W W^* \rightarrow$ dilepton
 \rightarrow lepton+jets

Caractéristiques événements VBF

1) Jets diffusés vers l'avant. $P_t \sim M_w/2$

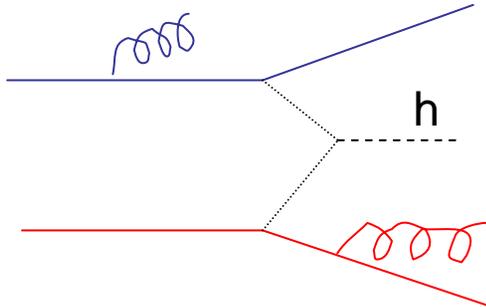


η des jets: vers l'avant, mais encore dans l'acceptance

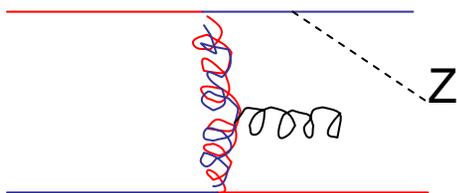


Variable utile: $\Delta \eta$ entre les deux jets $\Delta \eta$

2) Absence de radiation dans la région centrale



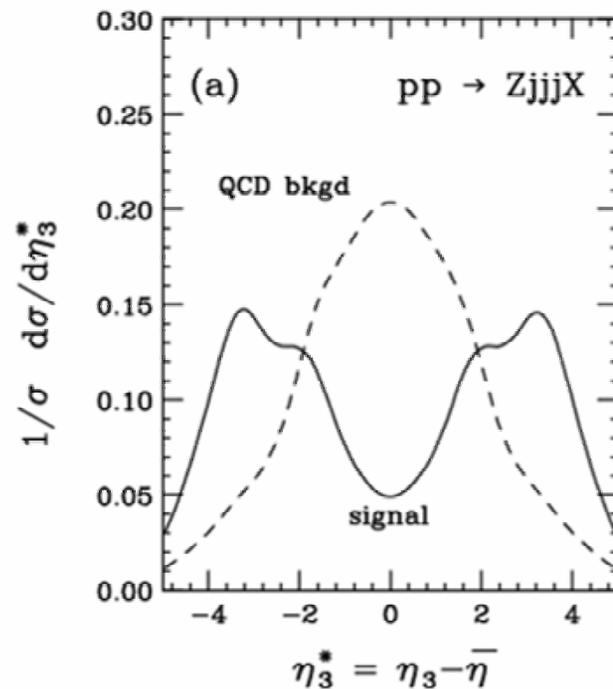
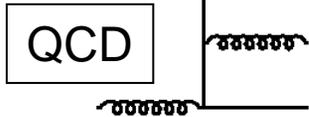
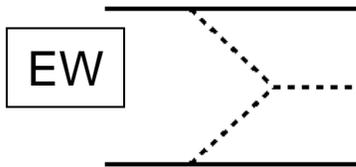
Signal: pas d'échange de couleur dans la voie t
seulement radiation dans la direction des quarks initiaux et finaux



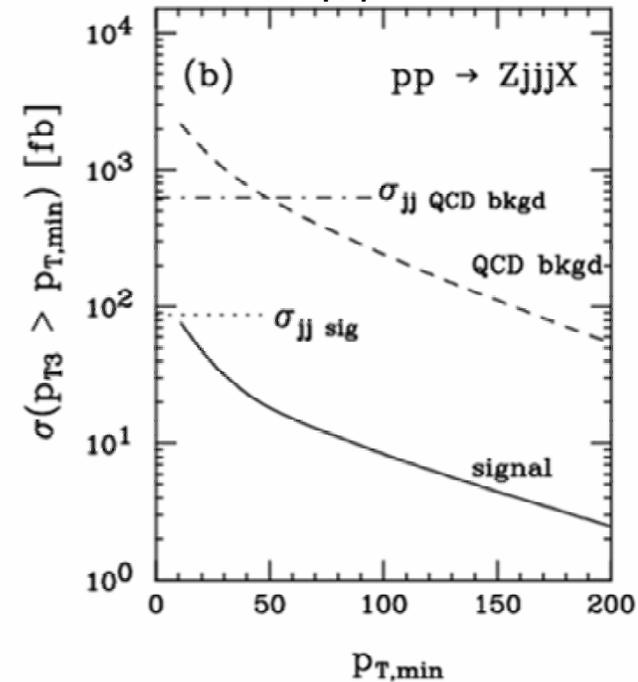
Bruit de fond: échange de couleur dans la voie t. Grande masse invariante entre jets vers l'avant et l'arrière (après application des coupures VBF)
=> Accélération de charge colorée => rayonnement de gluon dans la région centrale

Exemple: Production de Z+2 jets

- Deux processus QCD et EW
- Applique coupures « VBF » aux deux jets (grand $\Delta\eta$, coupure en P_T)
- Éléments de matrice Z+3j existent => calcul taux d'événements avec 2 jets VBF et 1 jet additionnel dans la région centrale



Rainwater et al, hep-ph/9605444

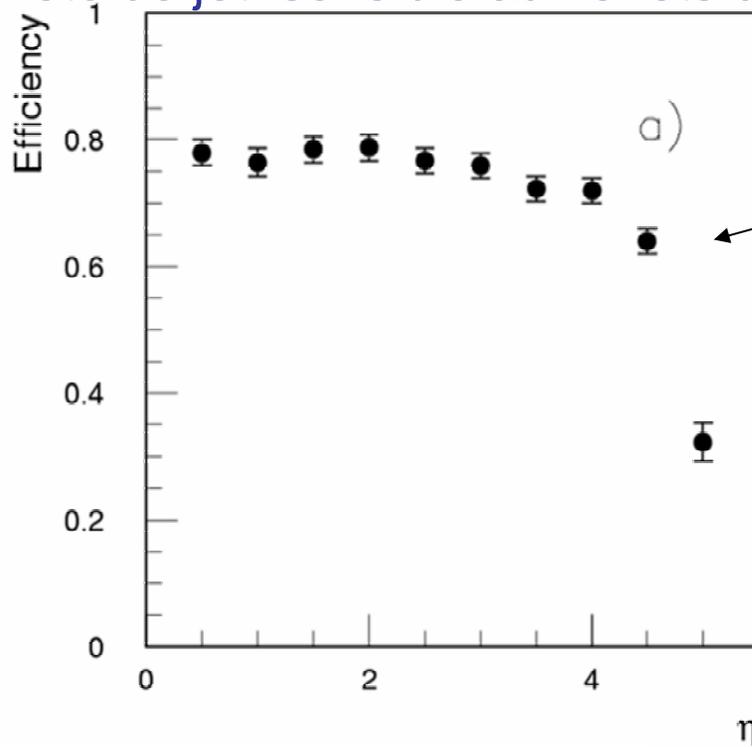


On peut s'attendre à éliminer ~70% du processus QCD

Complication: ces effets sont mal simulés dans les programmes de « gerbes partoniques » tels que Pythia, Herwig où la radiation de quark/gluon est approximative

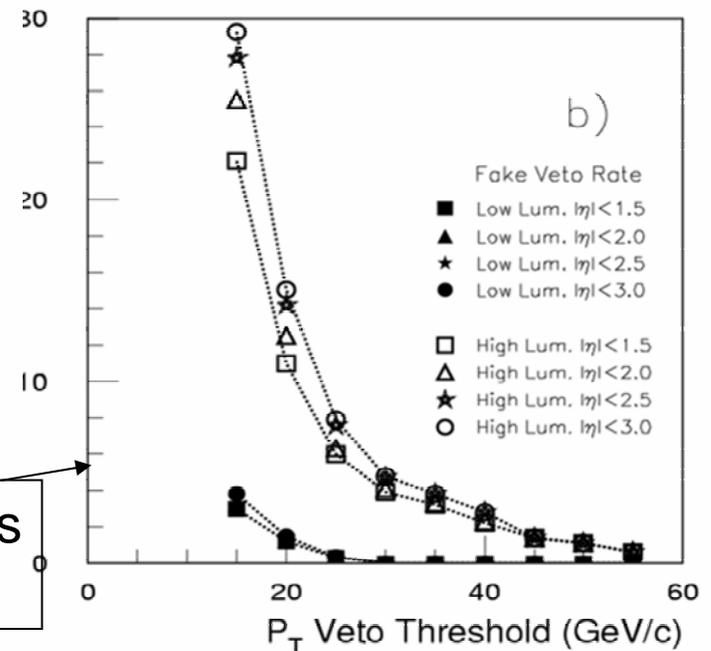
Difficultés expérimentales:

- Détection des jets étiqueteurs: vers l'avant, transition entre différentes techniques de calorimétrie
- Veto de jet: sensible aux effets de bruits et d'empilement



Efficacité de reconstruction des jets VBF (simulation détaillée Atlas)

Faux veto à cause des effets d'empilement



Considère canaux VBF seulement à basse luminosité ($10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Sélection typique de la topologie VBF (avec des petites variantes suivant les canaux):

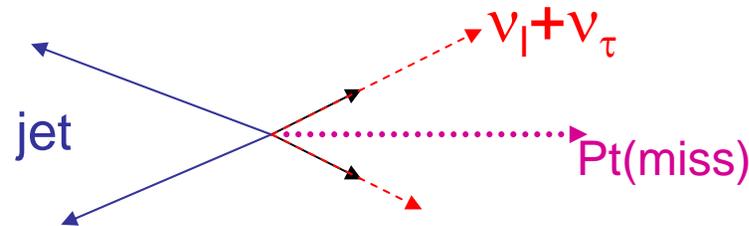
- 2 jets avec $Pt(\max) > 50$ GeV, $Pt(\min) > 30$ GeV, $\Delta\eta > 4.4$
- Masse invariante des deux jets « étiqueteurs » > 700 GeV
- Pas de jet additionnel dans la région centrale ($Pt > 20$ GeV, $|\eta| < 3.2$)
- Éventuellement $\Delta\phi(\text{jet}) < 2.2$ (certains bruit de fond ont tendance à avoir 2 jets dos à dos)
- Produits de désintégration du Higgs dans la région centrale (entre les deux jets étiqueteurs)

VBF $H \rightarrow \tau \tau$ (m_h entre 120 et 140 GeV)

- τ se désintègre avant le détecteur
- 2 possibilités observables
 - chaque $\tau \rightarrow$ lepton (BR($\tau \rightarrow e$ ou μ) $\sim 17\%$)
 - tau \rightarrow lepton, tau \rightarrow hadrons (4x plus d'événements avant sélection)
- Point clé commun à ces deux canaux:
reconstruction de la masse du Higgs malgré les neutrinos dans l'état final
- Difficulté supplémentaire pour canal tau \rightarrow hadron (\rightarrow « jet »): Identification des jets de tau, rejection des jets QCD (initiés par des quarks et des gluons)

Reconstruction masse τ - τ

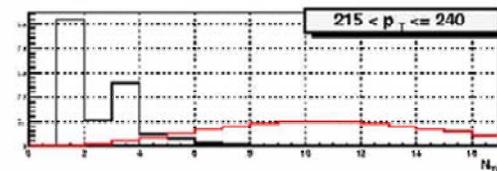
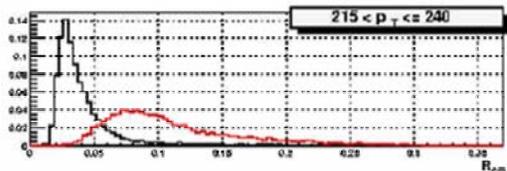
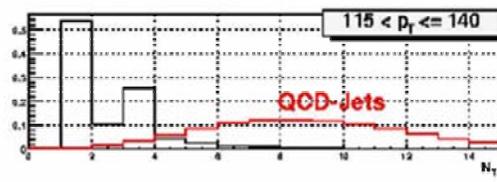
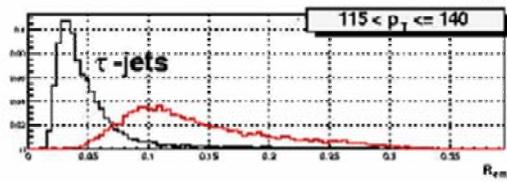
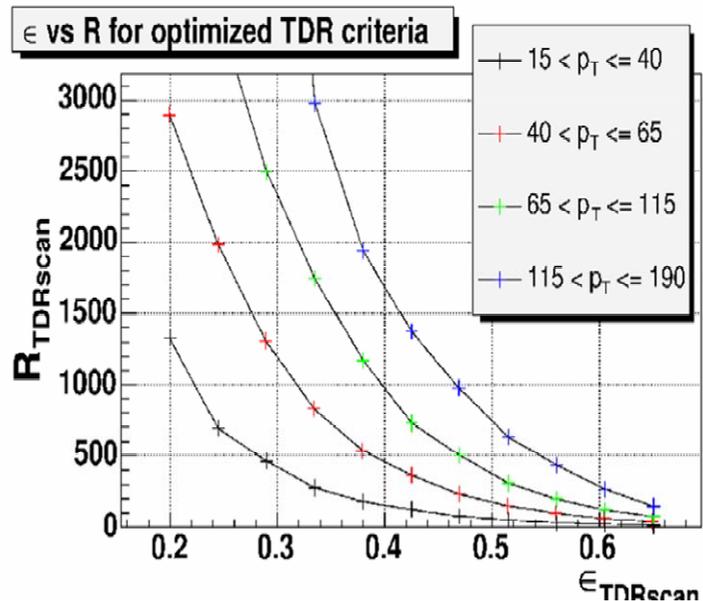
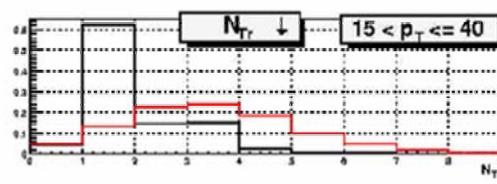
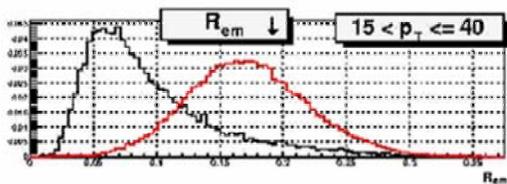
- $\tau \rightarrow l \nu_l \nu_\tau$
- $E(t) \gg m(\tau) \Rightarrow$ approximation colinéaire



- Direction de $\nu_l + \nu_\tau =$ direction de l
- 2 inconnues (énergie de $\nu_l + \nu_\tau$ pour chaque τ) pour 2 contraintes (p_x, p_y manquantes) \Rightarrow 1 solution, sauf si $Pt(h)=0 \Rightarrow$ résolution sur la masse meilleure pour grande impulsion du h (le cas pour le processus VBF)
- **Résolution en masse \sim Résolution en impulsion manquante**
- Si hypothèse correcte, le sens de l'impulsion des neutrinos est le même que le sens des leptons. Peut ne pas être le cas pour les processus de bruit de fond

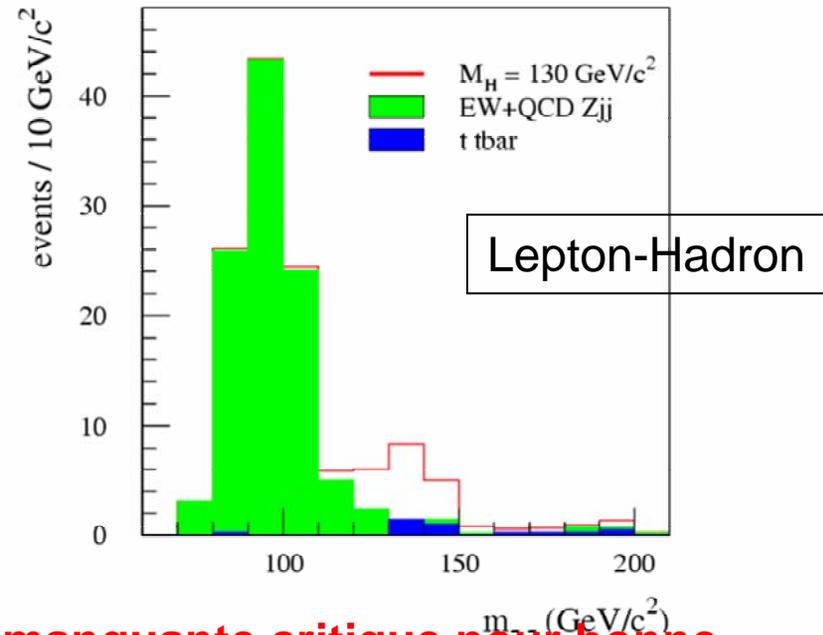
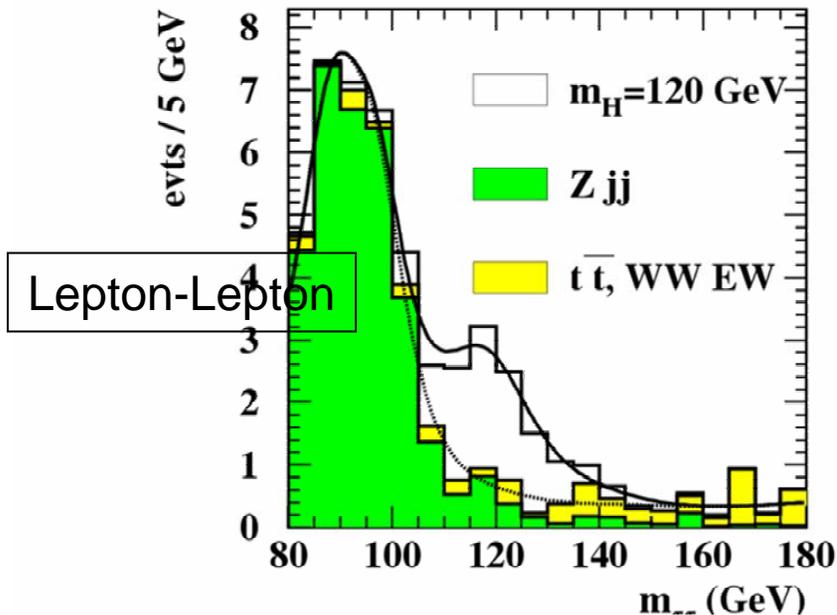
Identification de $\tau \rightarrow$ hadrons

- $\tau \rightarrow \pi^- \nu_\tau, \pi^- \pi^0 \nu_\tau, \pi^- (n \pi^0) \nu_\tau$ BR $\sim 50\%$
- $\tau \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- (n \pi^0) \nu_\tau$ BR $\sim 15\%$
- $m_\tau \ll E(\tau)$
- jets étroits, de faible multiplicité:
 - coupure sur la répartition transverse de l'énergie dans le calorimètre
 - Nombre de traces détectées
 - éventuellement paramètre d'impact ($c\tau \sim 90\mu\text{m}$)



résultats pour $H \rightarrow \tau \tau$

- Principal bruit de fond: production de $Z+2$ jets avec $Z \rightarrow \tau \tau$
- Bruit de fond t - \bar{t} potentiellement large, fortement réduit par le veto sur les jets additionnels
- lepton-hadron: signal=12, bruit de fond=3.6 (après coupure en masse $\tau\text{-}\tau$) pour 30 fb^{-1} , $m_H=130 \text{ GeV}$

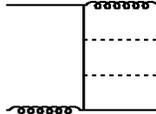
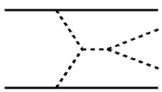


=> Résolution sur énergie transverse manquante critique pour bonne résolution en masse

VBF H->WW*

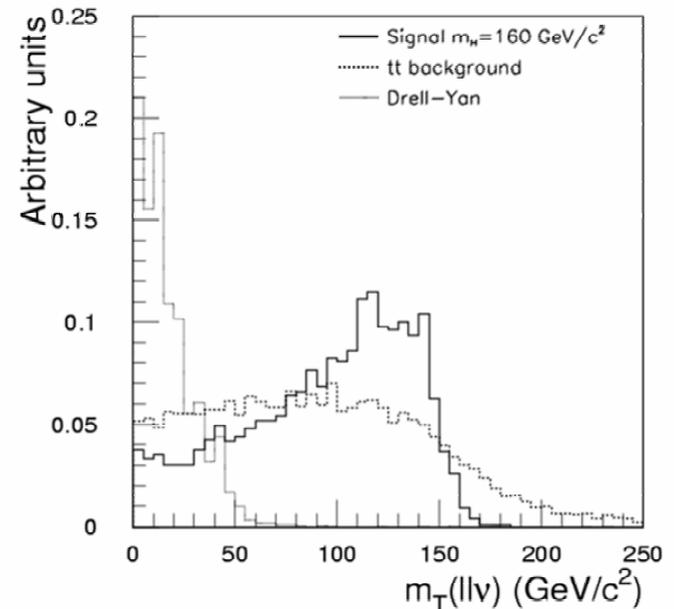
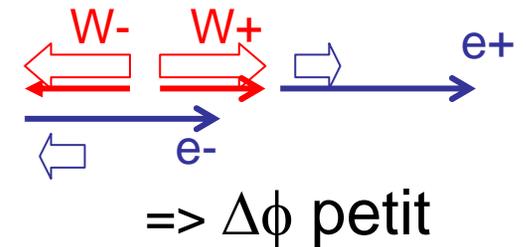
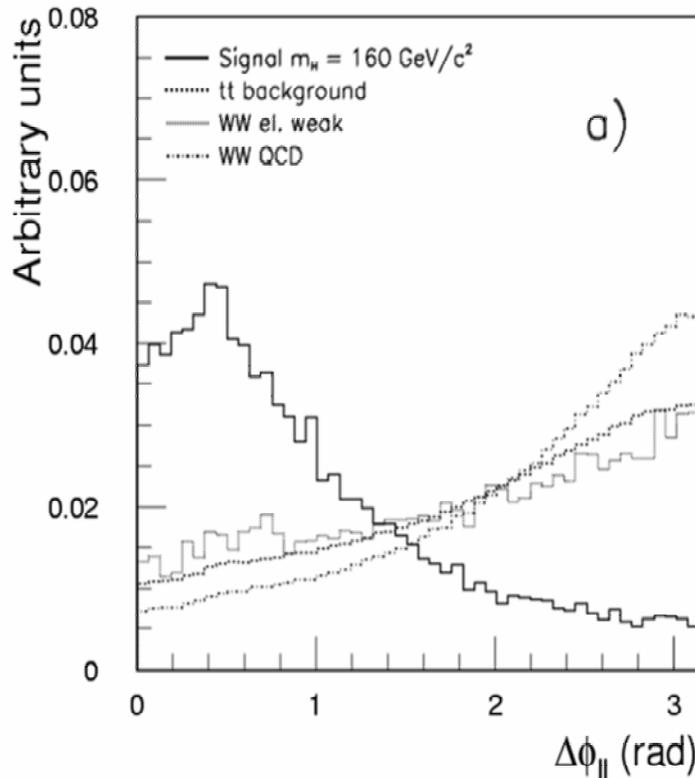
(m_h entre 130 et 200 GeV)

a) Chaque W->lν

- **topologie**: 2 leptons isolés (charges opposées) + 2 jets « étiqueteurs » du processus VBF, énergie transverse manquante (2 neutrinos), rien d'autre
- **bruits de fond**: production de 2 vrais leptons isolés
 - **t-tbar ->bWbW** (chaque W->lν)
 - **Production tW**
 - **WW+2jets**. 2 modes de production:
 - QCD 
 - EW => mêmes caractéristiques que pour le signal => bruit de fond irréductible 
 - **Z/γ*+2jets** (avec Z->ll ou Z->ττ suivi de désintégrations leptoniques des τ)

Variables discriminantes:

- $\Delta\phi$ entre leptons (spin 0 du Higgs)
- Masse transverse total (l-l-ptmiss) (on ne peut pas reconstruire la masse invariante l-l-2 neutrinos)



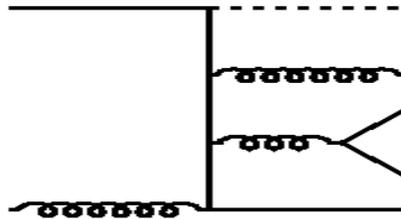
Liste des coupures (note scientifique Atlas 2003-024)

cut	high mass	low mass
	$135 \text{ GeV}/c^2 < m_H < 190 \text{ GeV}/c^2$	$110 \text{ GeV}/c^2 < m_H < 135 \text{ GeV}/c^2$
Two leptons with	$P_T^1 > 20 \text{ GeV}/c$ $P_T^2 > 15 \text{ GeV}/c$ $ \eta < 2.5$	$P_T^1(e) > 15 \text{ GeV}/c$ $P_T^1(\mu) > 10 \text{ GeV}/c$ $P_T^2(e) > 15 \text{ GeV}/c$ $P_T^2(\mu) > 10 \text{ GeV}/c$ $ \eta < 2.5$
Tag jets	$P_T^1 > 40 \text{ GeV}/c, P_T^2 > 20 \text{ GeV}/c$ $\Delta\eta_{tags} = \eta_{tag}^1 - \eta_{tag}^2 > 3.8$ $\eta_{tag}^{min} < \eta_{l_{1,2}} < \eta_{tag}^{max}$	
Leptons between tag jets		
Lepton Cuts	$\Delta\phi_{\ell\ell} \leq 1.05$ $\Delta R_{\ell\ell} \leq 1.8$ $\cos\theta_{\ell\ell} \geq 0.2$ $M_{\ell\ell} < 85 \text{ GeV}/c^2$ $P_T(\ell_{1,2}) < 120 \text{ GeV}/c$	$\Delta\phi_{\ell\ell} \leq 1.5$ $\Delta R_{\ell\ell} \leq 1.6$ $M_{\ell\ell} < 65 \text{ GeV}/c^2$
Tau veto	reject events if $x_{\tau_1}, x_{\tau_2} > 0$ $ M_{\tau\tau} - M_Z < 25 \text{ GeV}/c^2$	
Invariant mass of the two tag jets	$M_{jj} > 550 \text{ GeV}/c^2$	$600 \text{ GeV}/c^2 < M_{jj} < 2500 \text{ GeV}/c^2$
Transverse momentum balance	$ \mathbf{P}_T^{tot} < 30 \text{ GeV}/c$	
Jet veto	no jets with $P_T > 20 \text{ GeV}/c$ in $ \eta < 3.2$	
$\gamma^*/Z, Z \rightarrow \tau\tau$ rejection:	$m_T(\ell\ell\nu) > 30 \text{ GeV}/c^2$	$m_T(\ell\ell\nu) > 20 \text{ GeV}/c^2$

Bruit de fond t-tbar dominé par la production de t-tbar+1 jet (=> jets sélectionnés pour étiquetage VBF sont un jet de b + le jet produit avec la paire t-tbar) : évalué par calcul exact de l'élément de matrice

b) $W \rightarrow l\nu, W \rightarrow q\text{-}q\text{bar}$

- **Avantage:** rapport de branchement plus grand (x4.3)
- **Inconvénient:** bruit de fond sévère de $W+4$ jets, $W \rightarrow$ lepton



- Coupure sur les jets (inclut masse invariante M_{jj} autours de M_W , seulement possible pour $M_H > 160$ GeV)

=> Sensibilité moins bonne que le canal dilepton

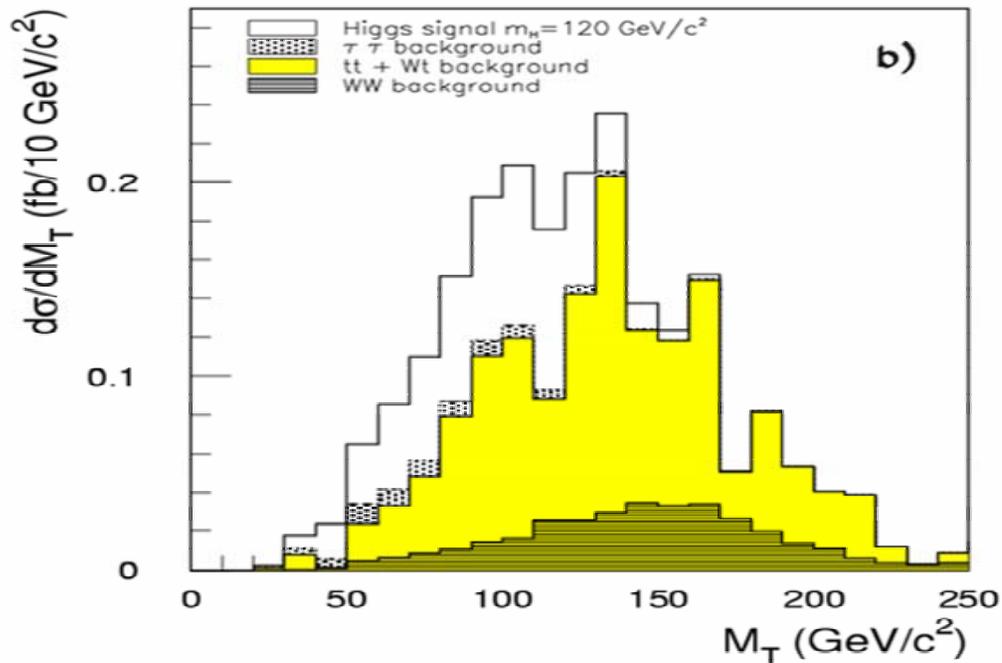
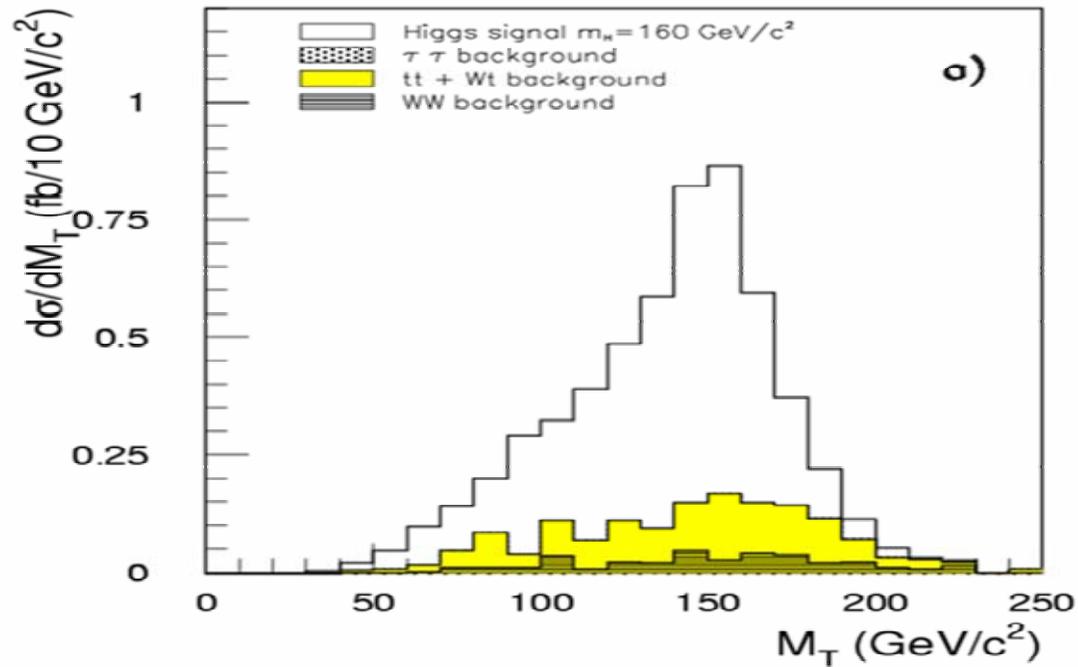
Résultats pour canal VBF $H \rightarrow WW^*$

m_H	(GeV/c ²)	110	120	130	140	150	160	170	180	190
Upper M_T bound for mass window		120	130	140	150	160	175	190	220	240
<i>$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\mu + X$</i>										
Signal	(10 fb ⁻¹)	1.4	4.9	12.3	16.3	26.2	42.5	42.7	35.6	27.8
Background	(10 fb ⁻¹)	5.8	7.1	9.2	8.1	9.8	12.4	13.8	16.3	17.1
Stat. significance	(10 fb ⁻¹)	0.5	1.5	3.2	4.2	6.0	8.1	7.8	6.3	5.0
<i>$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow ee/\mu\mu + X$</i>										
Signal	(10 fb ⁻¹)	1.3	4.6	11.7	16.4	27.8	40.2	44.8	36.0	25.9
Background	(10 fb ⁻¹)	6.7	8.7	10.1	10.0	12.2	14.3	15.9	18.4	19.2
Stat. significance	(10 fb ⁻¹)	0.4	1.3	2.9	3.9	5.8	7.4	7.7	6.1	4.5
<i>$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu jj$</i>										
Signal	(30 fb ⁻¹)	-	-	4.5	7.5	10.5	24.0	24.0	18.0	15.0
Background	(30 fb ⁻¹)	-	-	6.0	6.0	6.0	18.0	18.0	18.0	18.0
Stat. significance	(30 fb ⁻¹)	-	-	1.5	2.4	3.3	4.6	4.6	3.5	3.0
Combined										
Stat. significance	(10 fb ⁻¹)	0.8	2.1	4.4	5.9	8.4	11.0	11.0	8.8	6.8

Exemple de résultats dans canal WW->e μ

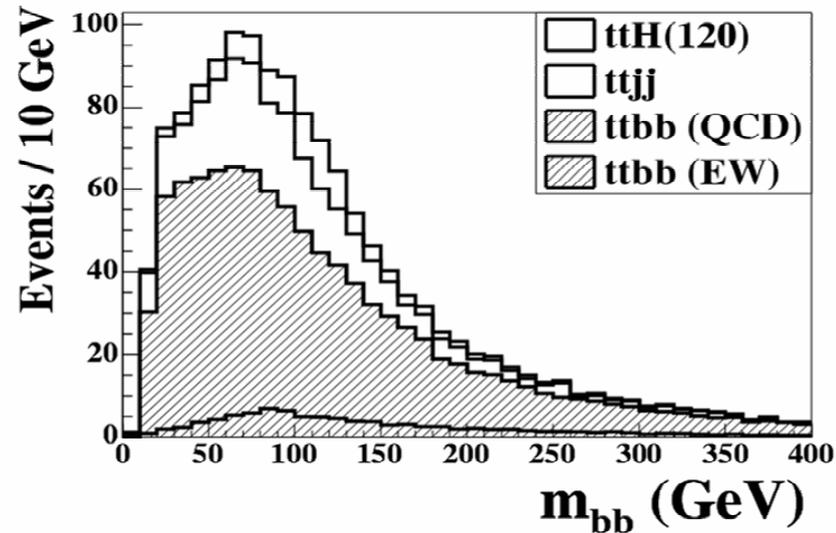
$m_H = 160 \text{ GeV}$

$m_H = 120 \text{ GeV}$

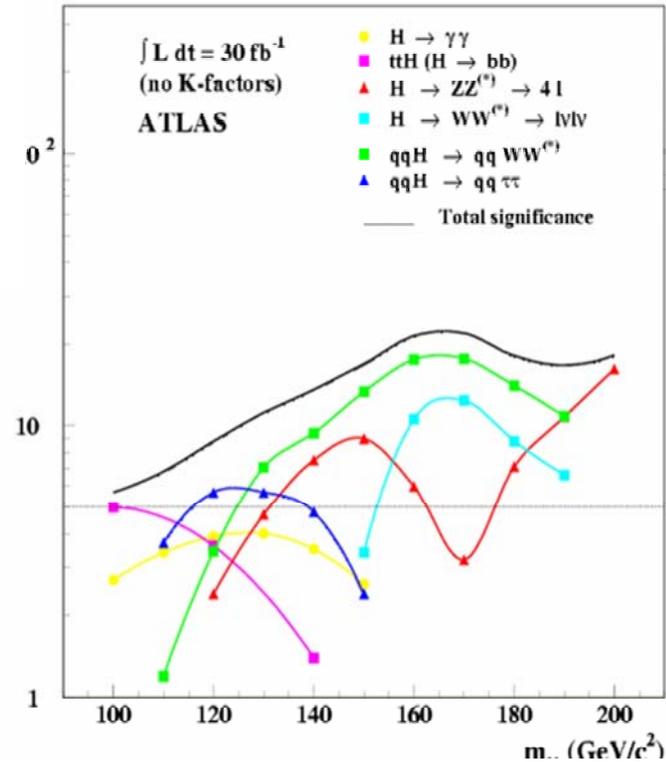
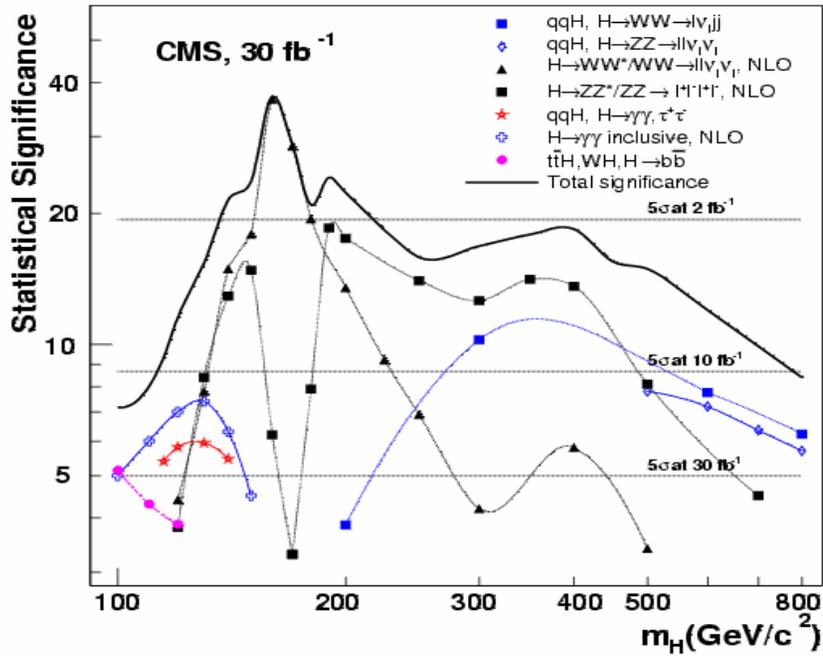


Autres canaux

- **t-tbar-H, suivi de H-> b-bbar, t-tbar -> lepton+jets:**
 - **topologie:** lepton+4jets de b + 2 jets
 - **bruit de fond:** t-tbar-b-bbar (irréductible), t-tbar + 2 jets (quarks légers ou gluons) (réductible)
 - **difficulté:** reconstruction complète de l'événement, combinatoire, nécessite d'identifier 4 jets de b
- **gg -> H -> WW*:**
 - **topologie:** 2 leptons+P_{miss}
 - **bruit de fond:** WW, t-tbar (reduit par veto sur jets)
 - reconstruit masse transverse, peu de discrimination dans la forme
- **H->ZZ->ll_{vv}, H->WW->lvjj pour des grandes masses de Higgs**



Résumé des canaux de découvertes du Higgs



Note: différentes sections efficaces de signal utilisées par Atlas et CMS

Commentaires:

- Sur le papier, découverte du Higgs possible avec 10fb^{-1} = 1 année « basse luminosité » (et même moins entre $\sim 170\text{-}200$ GeV). Plusieurs canaux accessibles pour $\geq 30\text{fb}^{-1}$
- Mais cela suppose:
 - que les performances des détecteurs sont maîtrisées. Peut prendre un certain temps (topologie compliquée de VBF, résolution ultime sur l'énergie des calorimètres électromagnétiques)
 - que les incertitudes systématiques sur le bruit de fond sont comprises => Échantillons de contrôle qui peuvent aussi demander une luminosité non négligeable
- Dans certains canaux ($H \rightarrow \gamma\gamma$ par exemple) l'estimation actuelle de la sensibilité a une incertitude assez grande (calculs de production $\gamma\gamma$) qui sera réduite une fois que l'on pourra mesurer le bruit de fond directement avec les données.
- Canaux VBF: On se limite à 30fb^{-1}
- Pour les autres canaux, on peut utiliser la luminosité maximale 300fb^{-1} par expérience

SLHC n'est pas nécessaire pour observer le Higgs standard

Mais avec $\sim 3000 \text{ fb}^{-1}$, on pourrait observer des modes plus rares:

$H \rightarrow Z \gamma \rightarrow l^+ l^- \gamma$ signature relativement propre, mais souffre du faible BR de $Z \rightarrow l^+ l^-$
signal très marginal au LHC
Visible au SLHC (masse entre 100 et 160 GeV)

$H \rightarrow \mu\mu$ désintégration rare ($\sim 10^{-4}$)
Bruit de fond irréductible très grand de $Z/\gamma^* \rightarrow \mu\mu$
Utilise productions gg et VBF
Bruit de fond peut être soustrait par mode e e
Observation peut être possible entre 120 et 140 GeV
-> mesure du couplage de Higgs-muon à $\sim 10\%$

Contrôle des systématiques de fond (exemple Atlas)

Channel	Main background	S/B	Bkg. sys for 5σ	Proposed technique/comments
H-$\rightarrow\gamma\gamma$	Irreduc. $\gamma\gamma$ Reducible γj	2-3%	0.4%	Side-bands stat Err ~0.5% for 30-100 fb ⁻¹
ttH H-$\rightarrow bb$	ttjj	30%	6%	Mass side-bands Anti b-tagged ttjj ev.
H-$\rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{lep}$	ZZ- $\rightarrow 4l$ and $\tau\tau ll$ Reducible tt, Zbb	300-600%	60%	Mass side-bands Stat Err <30% 30fb ⁻¹
H-$\rightarrow WW^* \rightarrow ll\nu\nu$	WW*, tW	30-50%	6%	No mass peak Bkg enriched region ?
VBF channels In general	Rejection QCD/EW	Study forward jet tag and central jet veto		Use EW ZZ and WW leptonic Study to be performed
VFB H-$\rightarrow WW$	tt, WW, Wt	50-200%	10%	Study Z,W,WW and tt plus jets
VBF H-$\rightarrow \tau\tau$	Zjj, tt	50-400%	10%	Missing Et calibration Study to be performed

Déclenchements:

$\gamma\gamma$: déclenchement di-photon ($2\gamma_{20}$)

4leptons : pas de problème avec les déclenchements $2e$, $e\mu$ ou 2μ

$\tau\tau$, WW^* : déclenchement électron (e_{25i}) ou muon (μ_{20}) inclusifs
(attention de ne pas augmenter les seuils)
ou dilepton

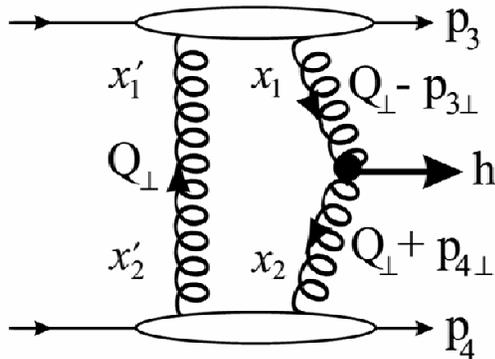
ttH , $H \rightarrow bb$: déclenchement grâce au lepton provenant du top

Exemple d'un canal qui est problématique:

VBF, $H \rightarrow b\bar{b}$ (\rightarrow 4 jets) Seuils de déclenchement sur les jets sont trop élevés (autrement taux $>$ bande passante autorisée)
(pas clair qu'il est faisable offline de toute manière...)

(Production diffractive de Higgs)

Kaidalov et al, hep-ph/0307064



Processus exclusif:
 $p p \rightarrow p p H$

Suivi de désintégration $H \rightarrow b \bar{b}$

- **Topologie:** 2 protons diffusés à très petits angles (\Rightarrow pots romains) + 2 jets de b dans la région centrale + absolument rien d'autre
- Section efficace $\sim 2-3$ fb pour $m_H = 120$ GeV (~ 0.01 fb à 170 GeV), **grandes incertitudes** (\sim facteur 3)
- M_H peut être reconstruit précisément en utilisant la mesure des protons diffusés (p_3, p_4): $m_H^2 = (p_1 + p_2 - p_3 - p_4)^2 \Rightarrow$ résolution ~ 1 à 2 GeV
- Pour 30 fb^{-1} , on peut avoir $S \sim 10$ événements pour $B \sim 5-10$ (production diffractive de $b\text{-}\bar{b}$) (note: S augmente pour Higgs du MSSM à grand $\tan\beta$)

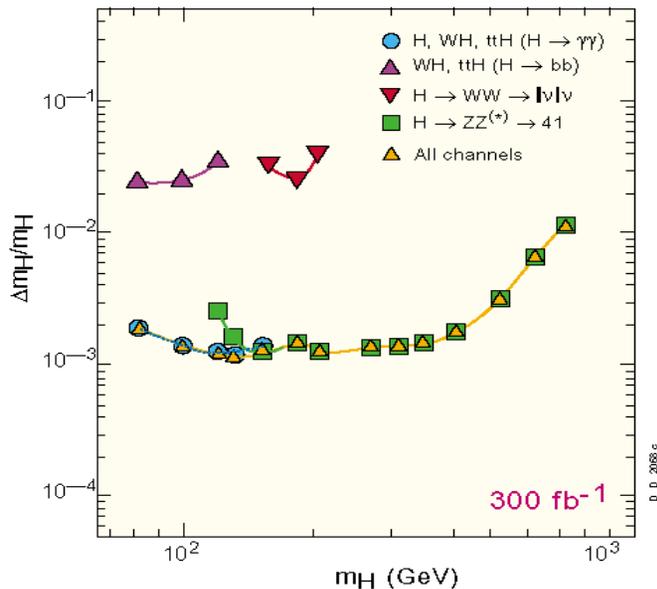
Détermination des propriétés du Higgs

- Masse
 - $J^{CP} = 0^{++}$
 - Couplages (proportionnels à la masse) et largeur
 - Autocouplage
- => Observe-t'on bien le boson de Higgs du Modèle Standard ?

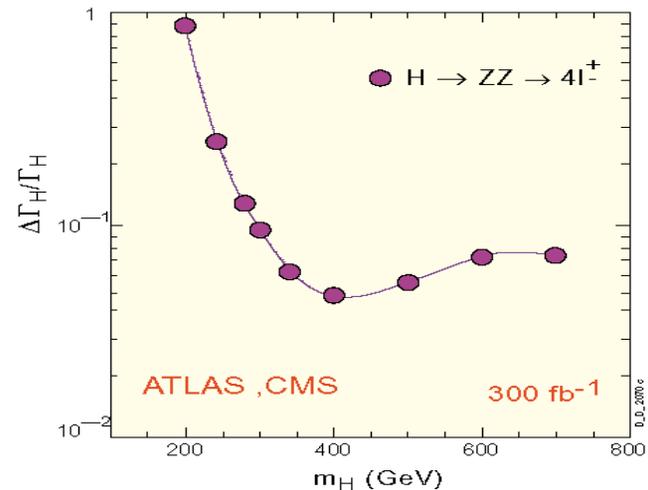
Mesure de la masse du H

- Mesure relativement « facile » dès qu'on observe $H \rightarrow \gamma\gamma$ et/ou $H \rightarrow 4$ leptons. Le canal VBF $H \rightarrow \tau\tau$ peut aussi contribuer à faible luminosité

Precision on SM Higgs mass



Precision on SM Higgs width



$\Gamma(H)$ Modèle Standard seulement mesurable pour $M_H > \sim 200$ GeV

Mesure de spin/parité

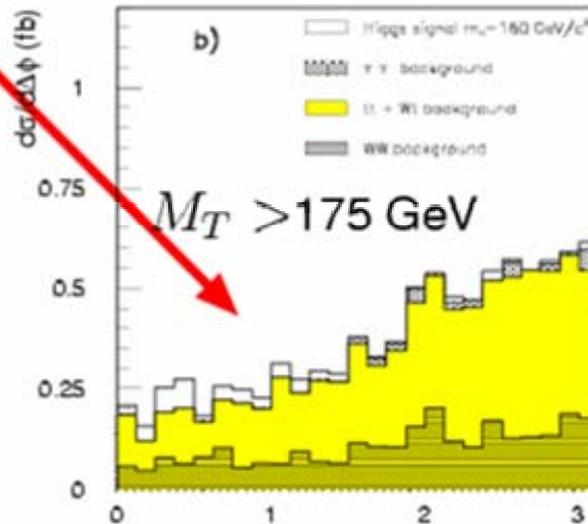
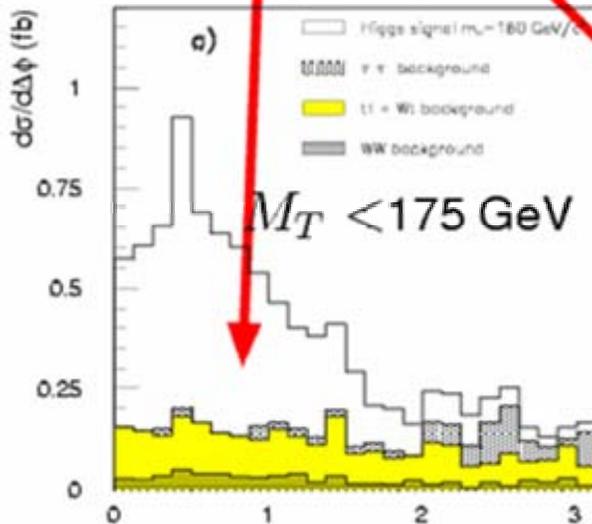
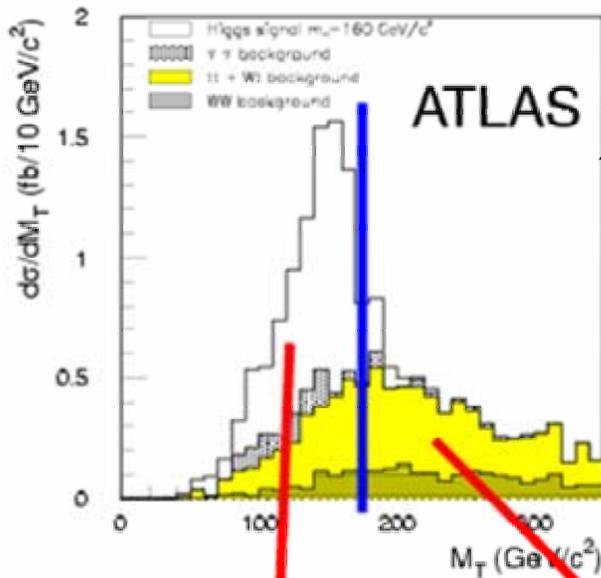
- Observation $h \rightarrow \gamma\gamma$ (ou production $gg \rightarrow h$): exclut spin 1 (possible jusqu'à ~ 140 GeV)
- Canal VBH $H \rightarrow WW(*) \rightarrow 2$ leptons: spin $0 \Rightarrow 2$ leptons dans même direction. Échange ordre des coupures pour être sensible a distribution $\Delta\phi$ (possible entre ~ 140 et 180 GeV ?)
- $M_H > 2M_Z$: Utilise canal $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptons (\sim « vieille physique » $\pi^0 \rightarrow \gamma^*\gamma^* \rightarrow 4e$)

VBF $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2$ leptons

Relâche coupure sur $\Delta\phi$ (leptons)

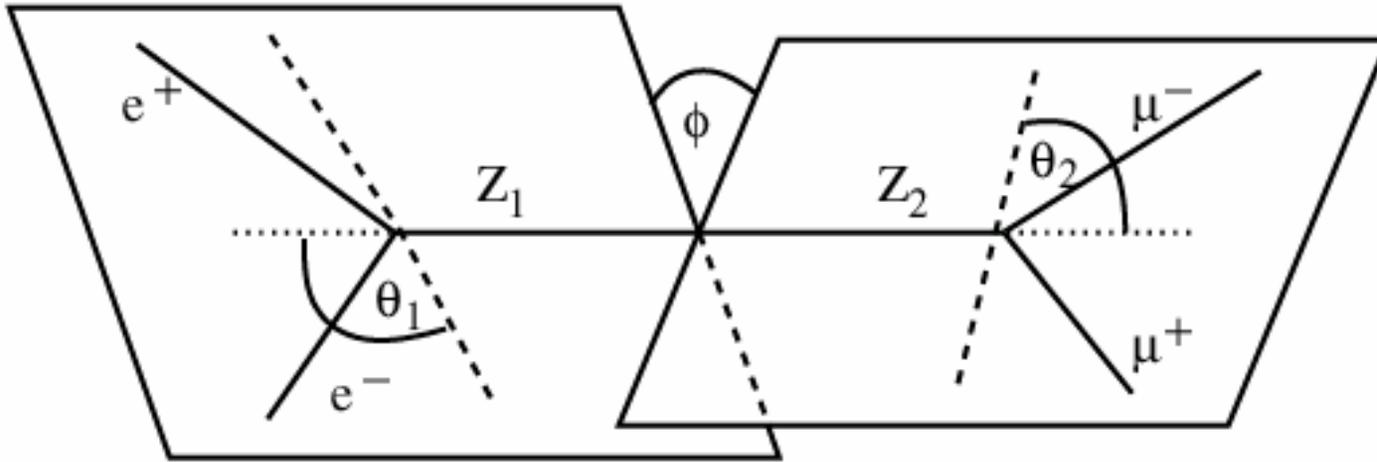
Utilise M_T pour définir région de contrôle et région de signal

Estimation quantitative de la précision en cours



$\Delta\phi$

H->ZZ->4 leptons



- ϕ = angle entre plans de désintégration dans centre de masse du H
- θ_1, θ_2 = angle lepton (-) dans centre de masse du Z et impulsion du Z dans centre de masse du Higgs

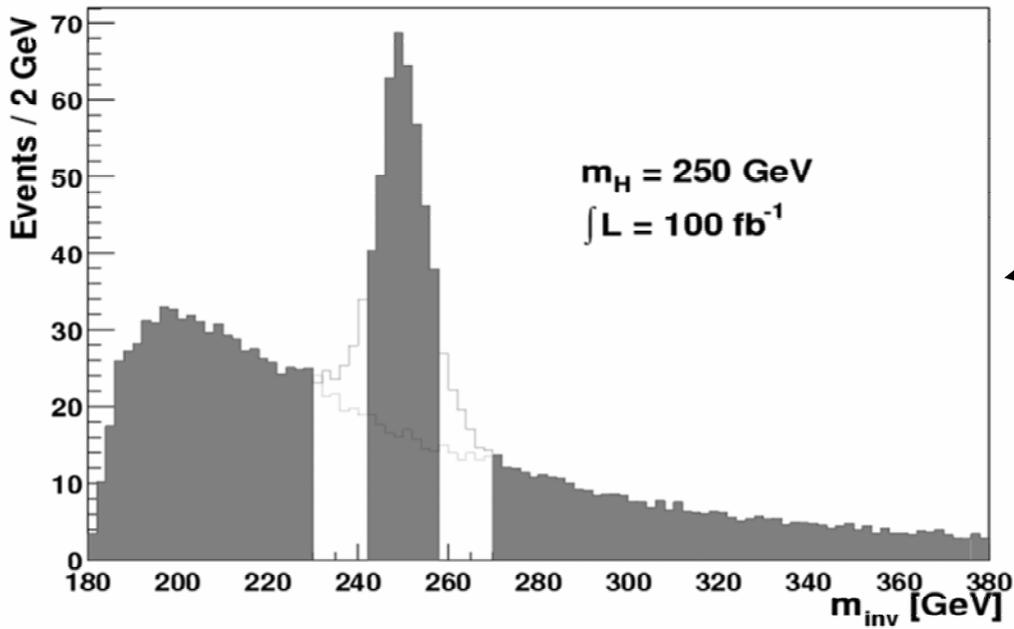
$$\frac{dn}{d\theta} = L \sin^2(\theta) + T (1 + \cos^2(\theta))$$

$$R = \frac{L - T}{L + T}$$

Fraction de Z
longitudinaux/transverses

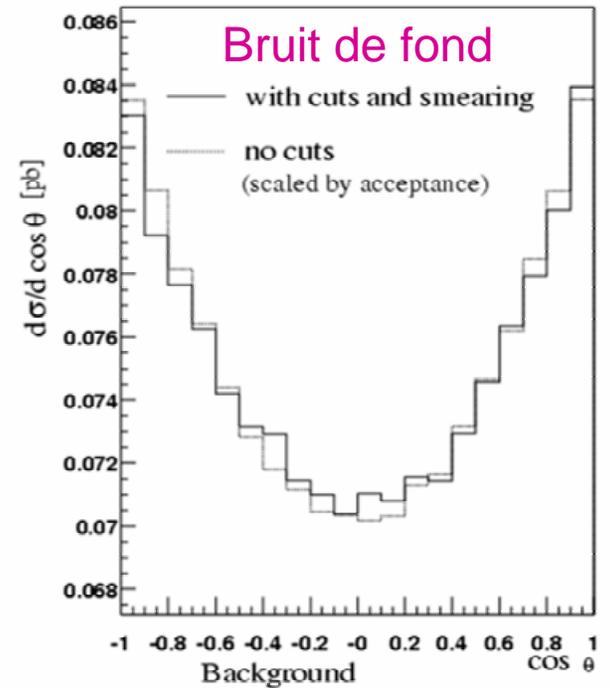
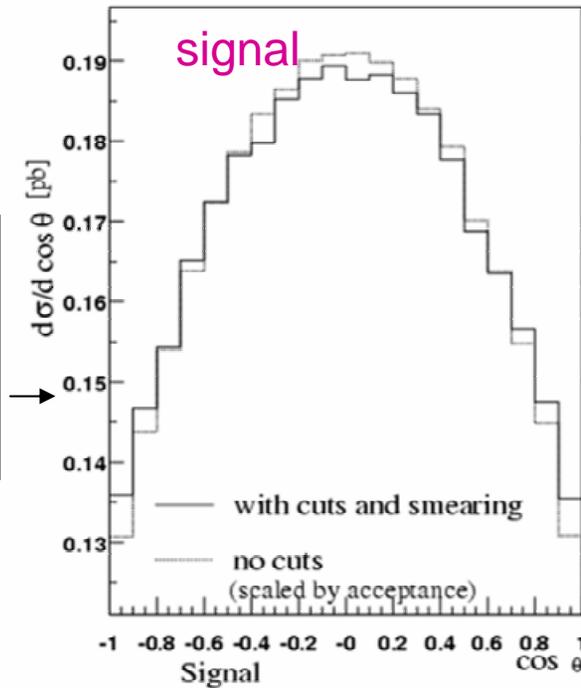
$$\frac{dn}{d\phi} = 1 + \alpha \cos(\phi) + \beta \cos(2\phi)$$

$\alpha, \beta \rightarrow 0$ à grandes masses

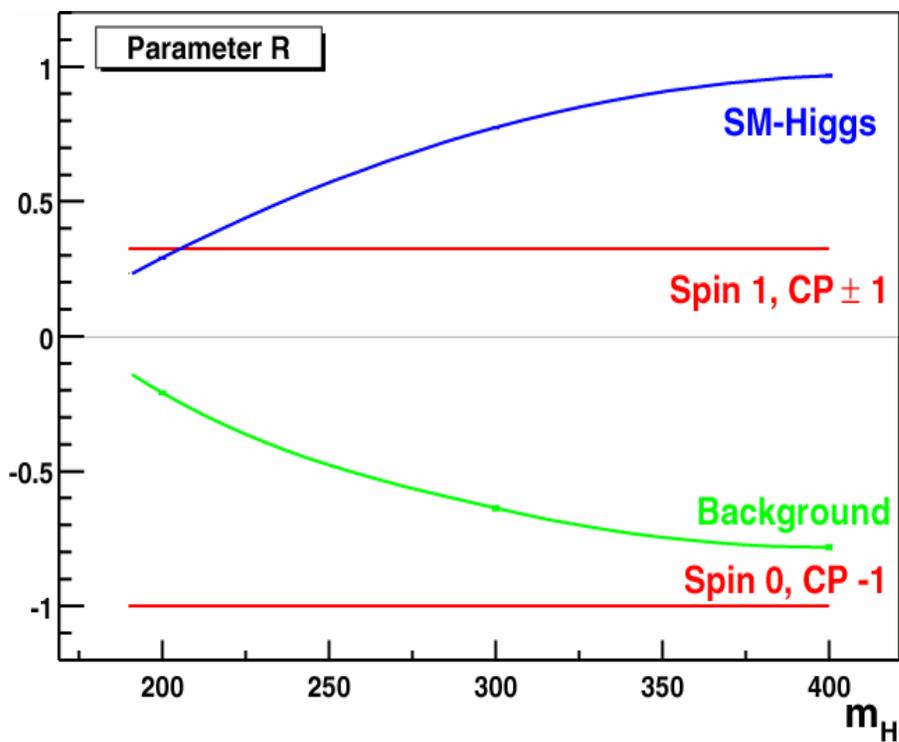


Distribution de $\cos(\Theta)$

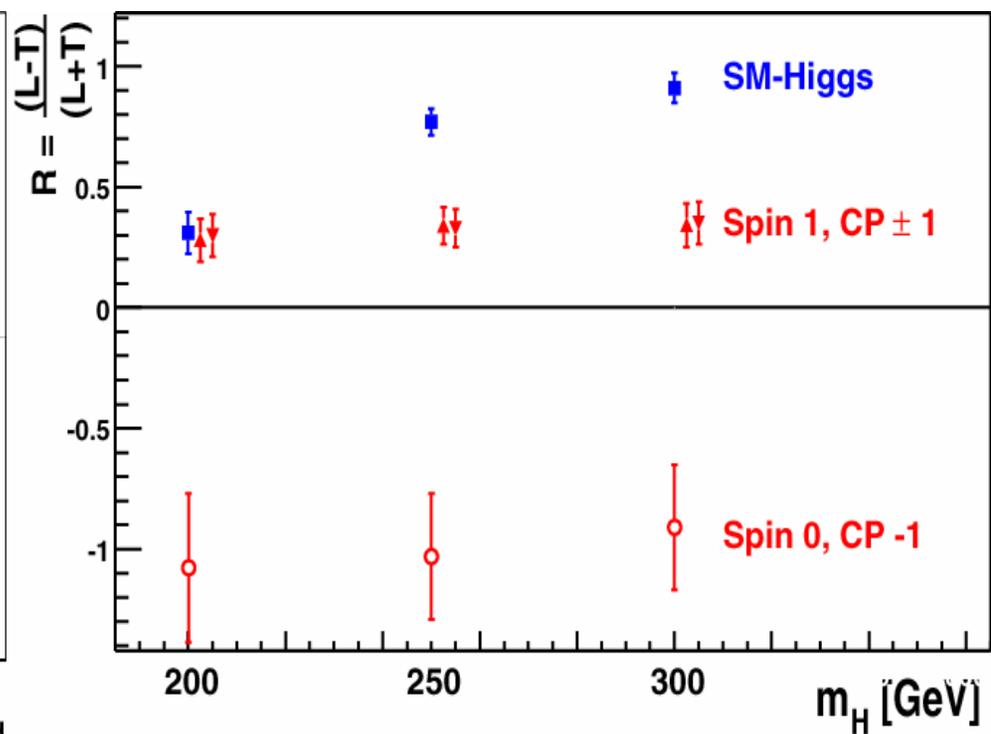
(note: suppression de 0 de l'échelle verticale!)

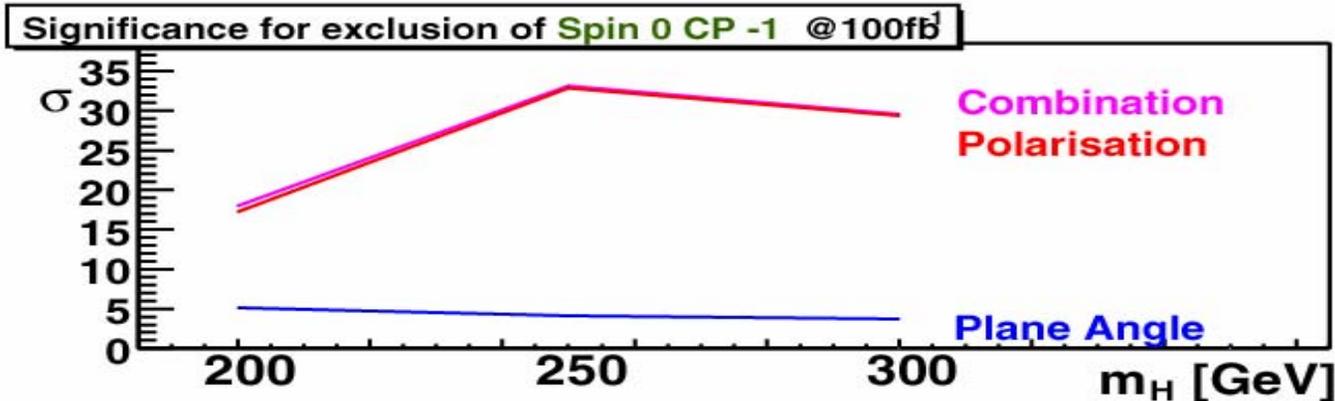
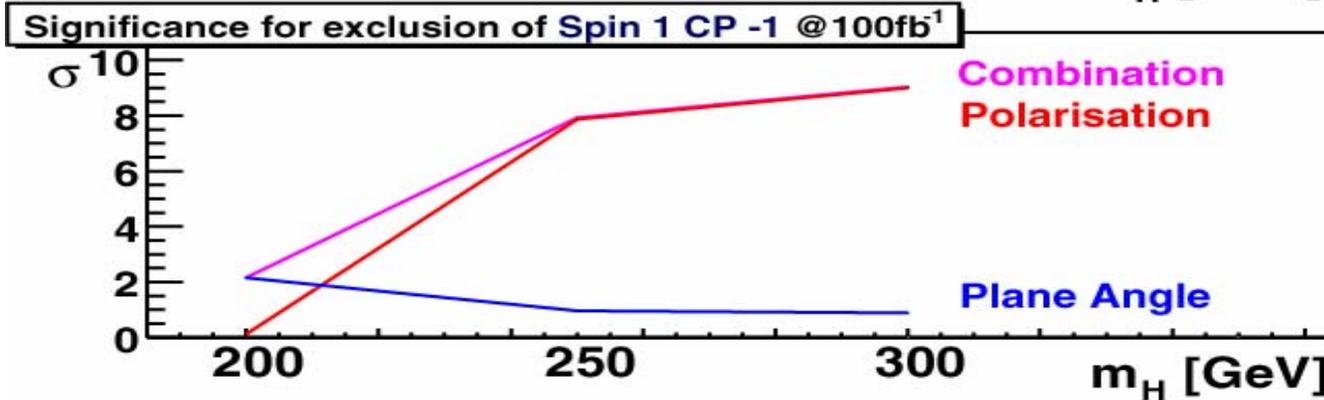
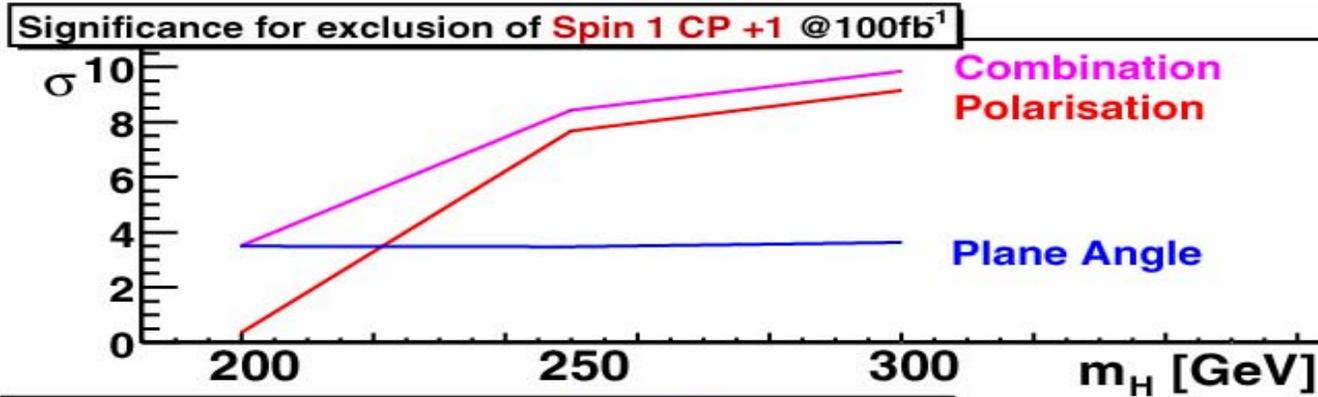


Prédictions pour R



Précision pour 100 fb^{-1}





=> pas de problème pour $m_H \geq \sim 225$ GeV

Propriétés CP du couplage HWW:

Modèle Standard : $g m_W g^{\mu\nu}$

Terme possibles en plus $\sim q_1^\mu q_2^\nu$ et $\sim \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} q_{1\rho} q_{2\sigma}$

Dans Processus VBF:

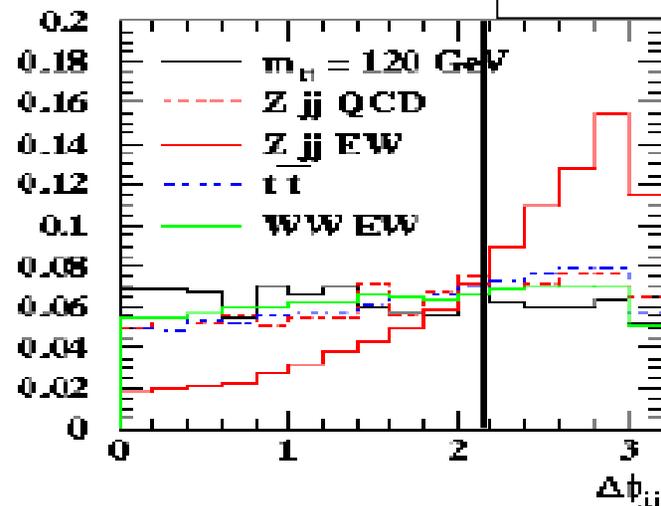
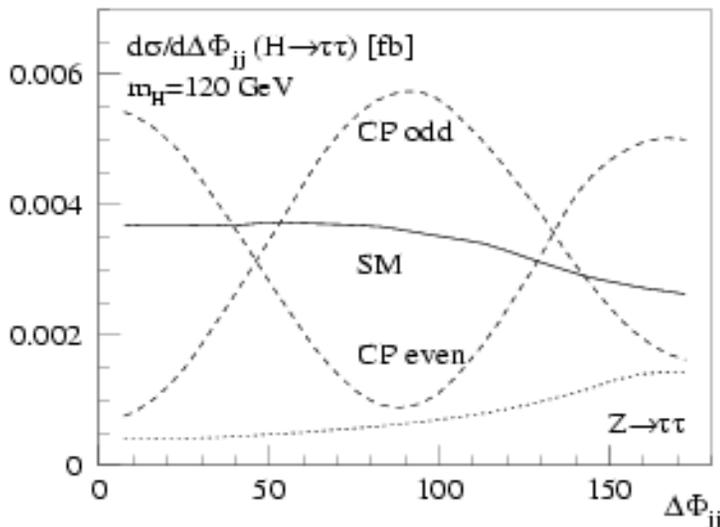


terme impair sous CP =>

$$|\mathcal{M}|^2 \sim |\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} p(q_1)_\mu p(q'_1)_\nu p(q_2)_\rho p(q'_2)_\sigma|$$

-> 0 pour des événements plans (q'_2 =combinaison linéaire de q_1, q_2, q'_1)

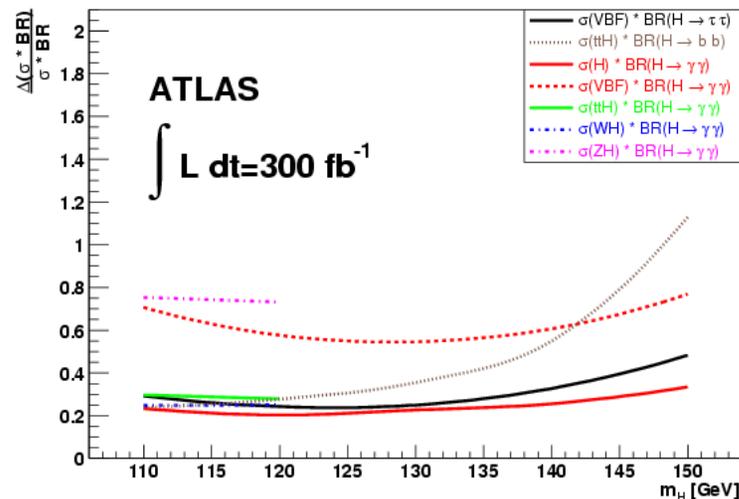
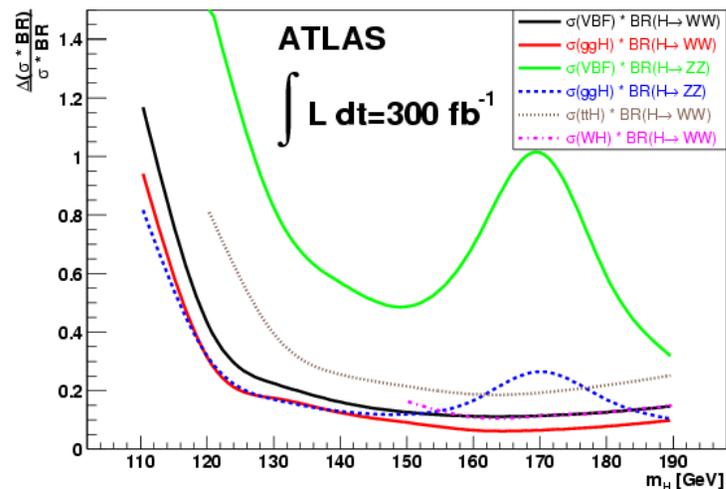
=> observable dans distribution de $\Delta\phi$ (jets étiquetés)



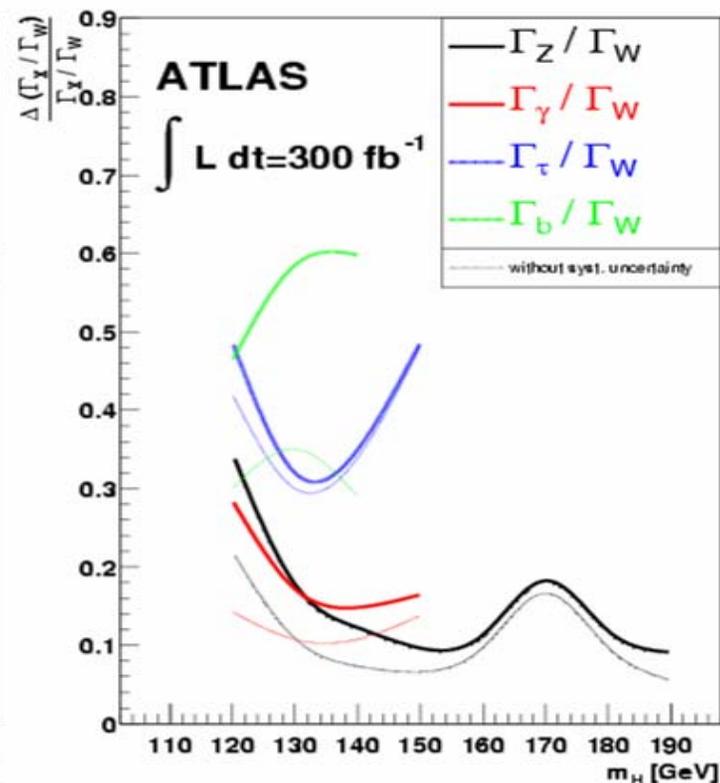
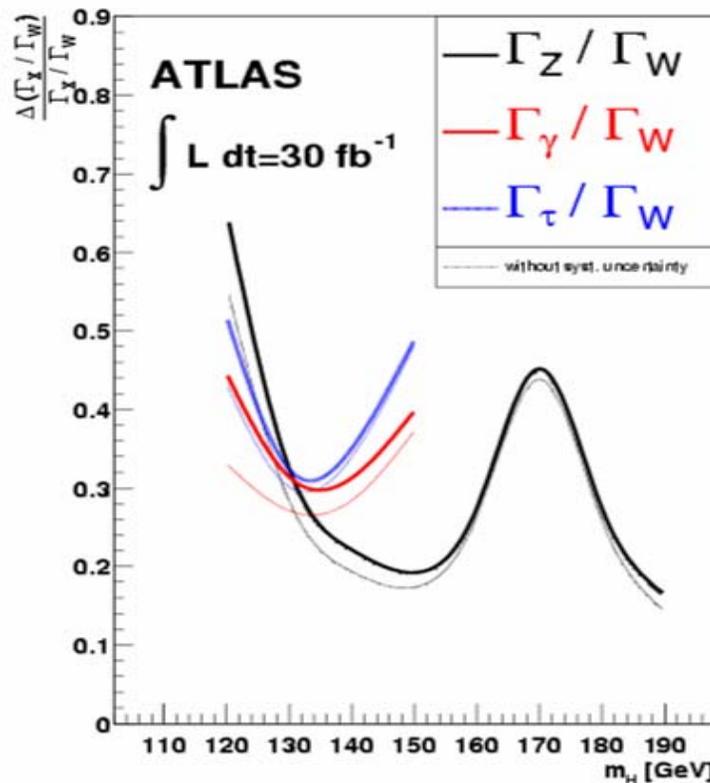
H→ττ 120 GeV

Mesure des couplages

- Première étape: boson de spin 0 => à partir des nombres d'événements dans chaque canal, on peut mesurer $\sigma_{\text{prod}} * \text{BR}(H \rightarrow f)$ (où σ_{prod} peut être soit $gg \rightarrow H$, VBF, WH, ZH, ttarH)
 - incertitudes: efficacité de sélection, détermination du bruit de fond (extrapolation entre région de contrôle et de signal), luminosité pour les sections efficaces absolues

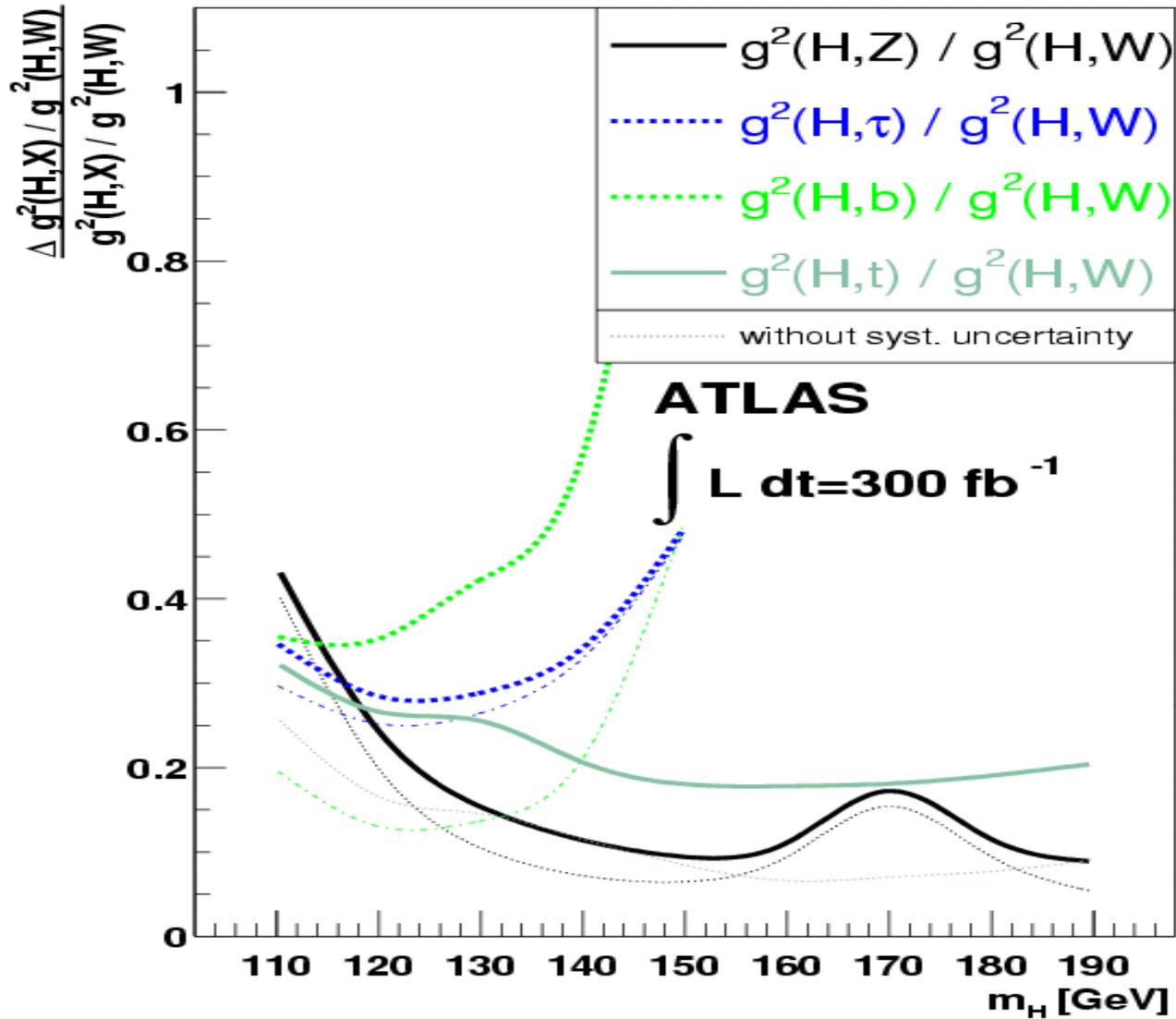


- 2eme étape: 1 seul boson de Higgs => mesure des rapports de rapport de branchement. Paramètres libres:
 - $\sigma_j \cdot \text{BR}(H \rightarrow WW^*)$ (σ_j = différents modes de production)
 - $\text{BR}(H \rightarrow f) / \text{BR}(H \rightarrow WW^*)$

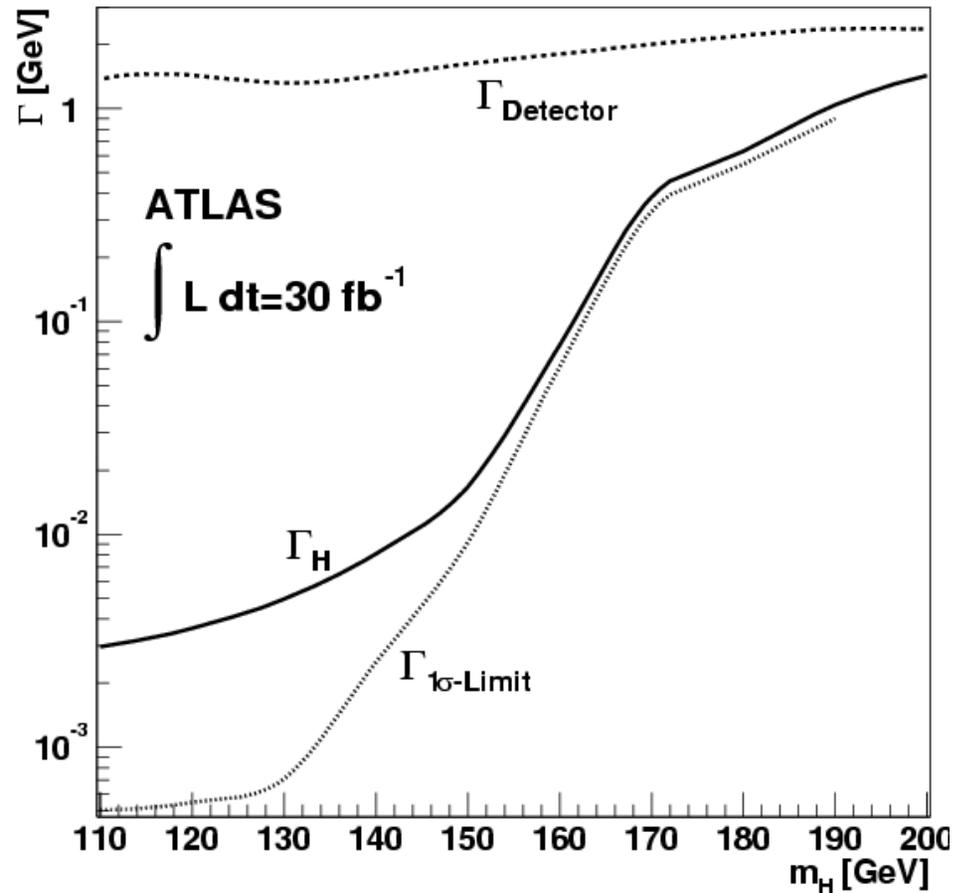


- 3eme étape: pas d'autres particules dans les boucles, pas de couplage fort aux fermions légers => mesure des rapport des constantes de couplages $g_W, g_Z, g_{top}, g_\tau, g_b$:
- Sections efficaces de production:
 - $gg \rightarrow H = \alpha_{ggH} \cdot g_{top}^2$ (α =section efficace standard, connue $\pm 20\%$)
 - $VBF = \alpha_{WF} \cdot g_W^2 + \alpha_{ZF} \cdot g_Z^2$ ($\alpha \pm 4\%$)
 - etc...
- Rapports de branchements:
 - $BR(H \rightarrow WW) = \beta_W g_W^2 / \Gamma_H$ (β typiquement ± 1 à 2%)
 - $BR(H \rightarrow b\bar{b}) = \beta_b g_b^2 / \Gamma_H$
 - $BR(H \rightarrow \gamma\gamma) = (\beta_1 \cdot g_W^2 - \beta_2 \cdot g_{top}^2) / \Gamma_H$ (interférence destructive)
- Échelle globale couplage pas directement mesurable
- Mesure rapports $g_W / \sqrt{\Gamma_H}, g_Z / g_W, g_{top} / g_W$, et

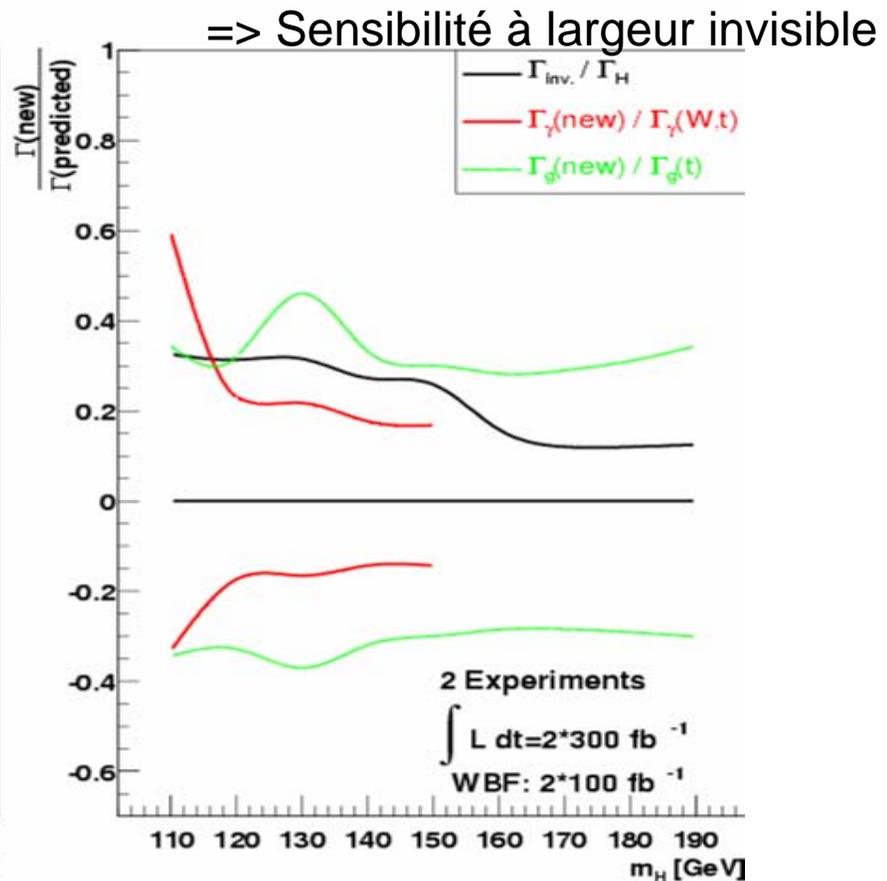
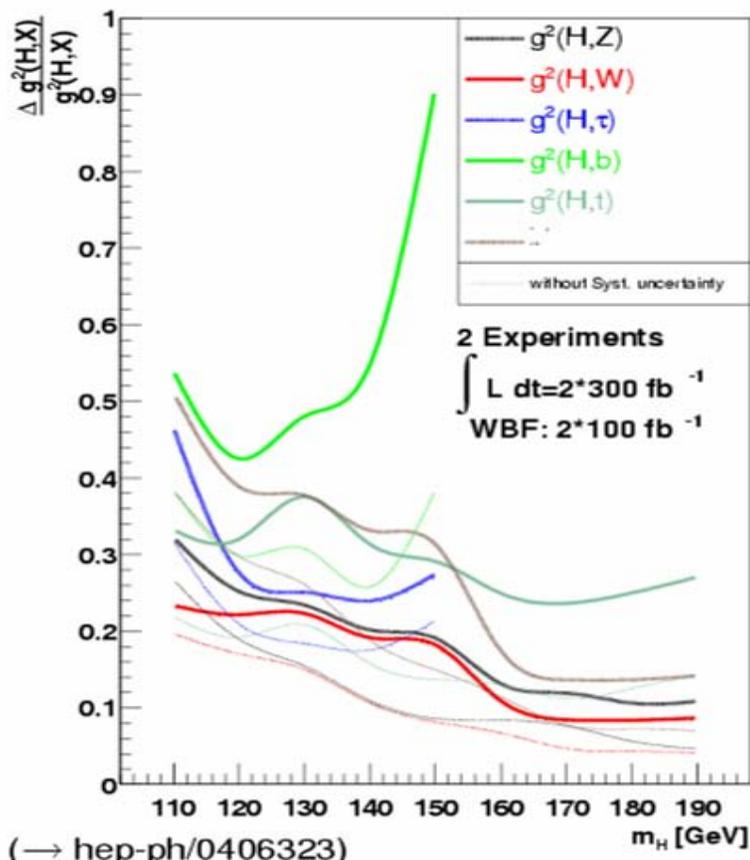
Précision sur mesure des rapports de couplage



Limite inférieure indirecte sur la largeur totale du Higgs
(\leq somme des modes détectés)



- 4eme étape: estimation des couplages absolues. Hypothèse(s) nécessaire(s). Plusieurs possibilités:
 - $\Sigma(\text{BR visible}) \sim 1$ (comme Modèle Standard)
 - **Couplages $g_W, g_Z \sim < \text{Modèle Standard}$**
 - Couplages $g_W, g_Z \sim \text{Modèle Standard}$ (partie espace de phase Susy voir plus loin)



Autocouplage du Higgs

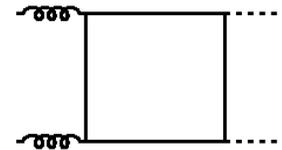
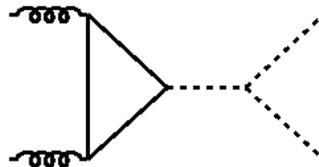
- $V(\phi) = \lambda (\phi^+\phi - v^2/2)^2$
- $m_H^2 = 2 \lambda v^2$
- Couplage trilineaire:

=> Test du mécanisme de Higgs

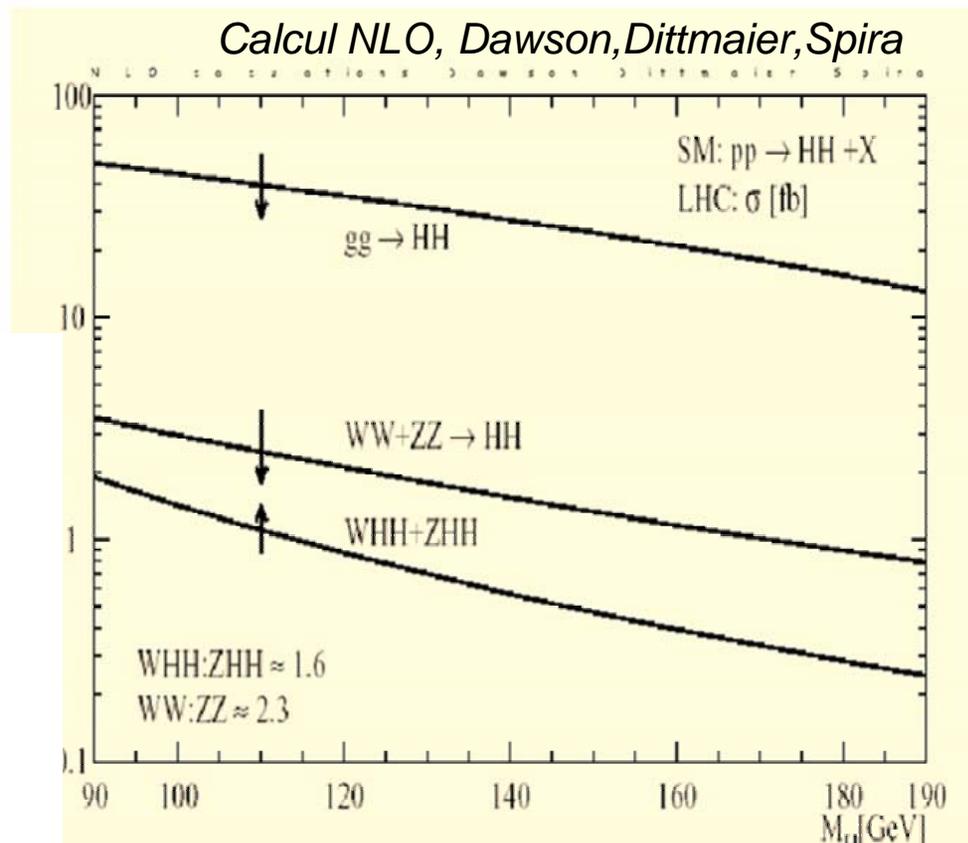
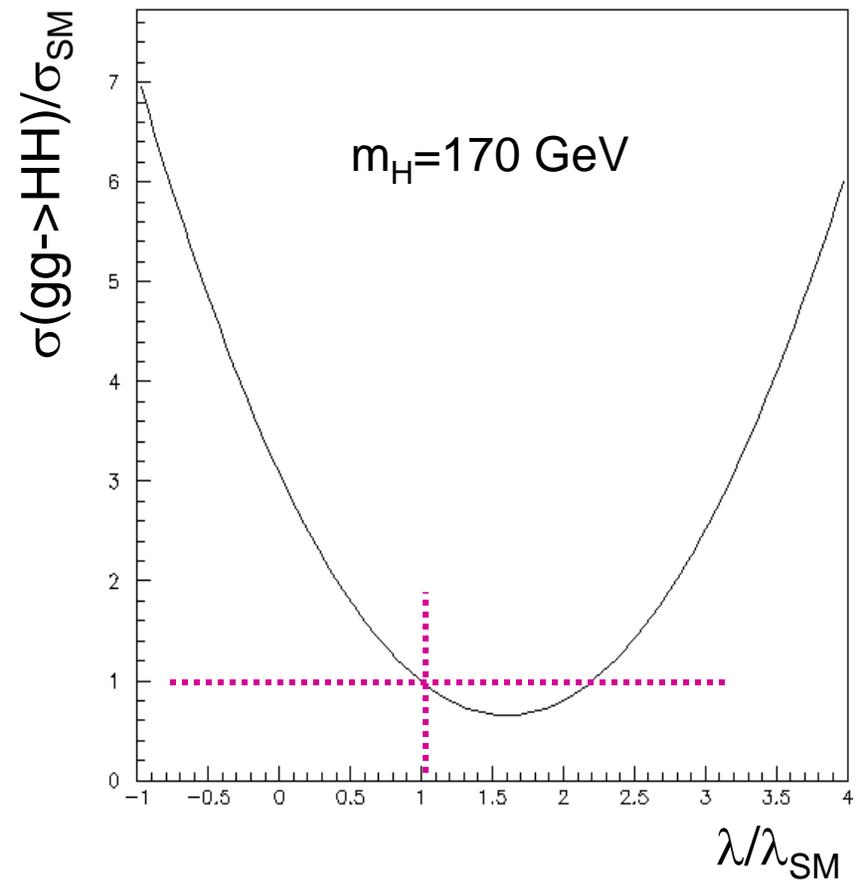


$$\frac{-3 i g m_H^2}{2m_w}$$

- Production de paires de Higgs



- Section efficace très petite: 20-30 fb au LHC pour masse ~ 140 GeV



Canal le plus prometteur ($m_h \geq 140$ GeV)

$H H \rightarrow W W^{(*)} W^{(*)} \rightarrow l^+ \nu jj l^+ \nu jj$ (ou l^-)

(autres modes de désintégration noyés sous le bruit de fond)

Signature:

- 2 leptons de même signe
- 4 jets (\rightarrow 2 paires avec $m_{jj} = m_W$)
- Impulsion transverse manquante

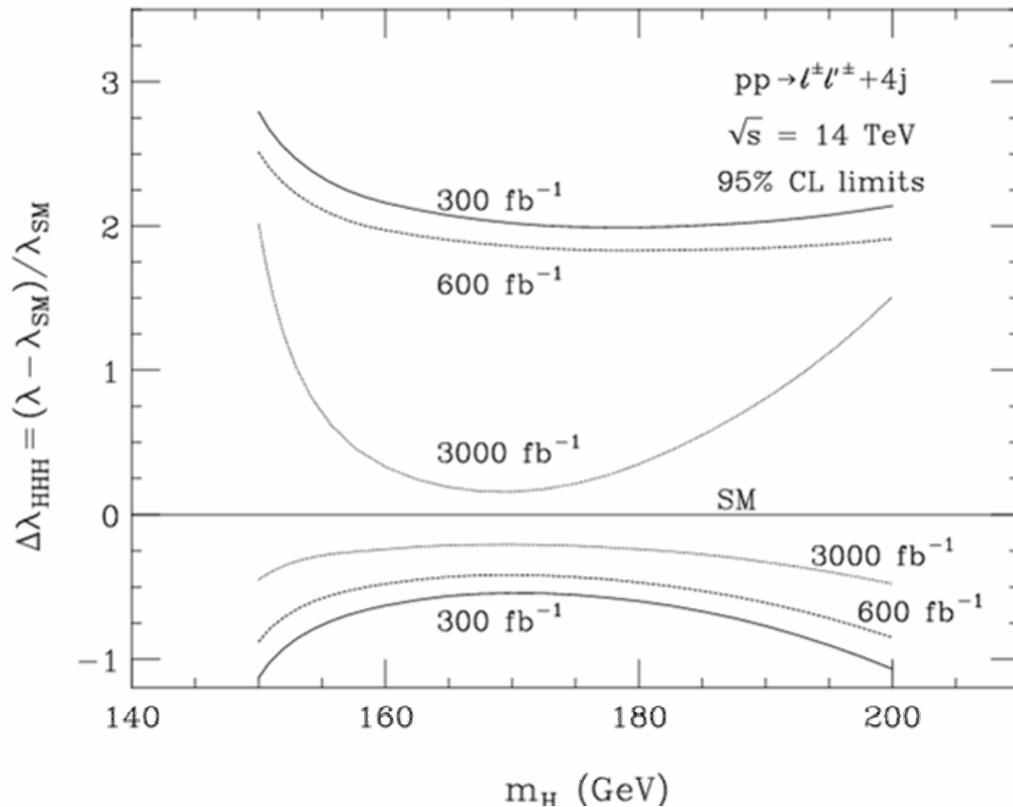
Bruits de fond:

- $WWjj$
 - $t \bar{t} W$ (1 lepton de $t \rightarrow bW$, 1 de W)
 - $t \bar{t} t \bar{t}$
 - $t \bar{t}$ (+jet) ($t \rightarrow bW \rightarrow bl^+ \nu$; $\bar{t} \rightarrow \bar{b} W$ avec $\bar{b} \rightarrow l^+$)
- Veto b-jet

Estimation de Baur,Plehn,Rainwater hep-ph/0211224

Signal*Acceptance 0.19 fb (mH=120 GeV)

Bruit de fond ~ 1fb (dominé par 3W et ttW)



~3 sigmas pour 300 fb-1
(erreur stat seulement)

Limite sur couplage 3H

(utilise m totale visible pour
discrimer signal et bruit de fond)

Caveat: Etudes faites par Atlas => bruit de fond t-tbar plus grand (?)

$m_H < 140 \text{ GeV}$:

$H H \rightarrow b \bar{b} b \bar{b}$ Impossible (bruit de fond QCD) (Mode VBF??)

$H H \rightarrow b \bar{b} \tau \tau$ Quasiment impossible

$H H \rightarrow b \bar{b} \gamma \gamma$?

■ Signature

- 2 jets de b masse $\sim m_H$ (1 ou 2 jets identifiés comme b)
- 2 γ masse = m_H (bien meilleure résolution)

■ Bruits de fond

- $\gamma \gamma j j$ (avec $j=b$ ou c ou quark léger)
- faux photons

■ Etude de Baur, Plehn, Rainwater (hep-ph/0211224)

■ Pour 300 fb⁻¹:

- Signal ~ 6 événements (1 b identifié)
- Bruit de fond $\sim 10-15$ événements
- Sensibilité à $\Delta\lambda/\lambda_{SM} \sim \pm 100\%$ $\Rightarrow \pm 50\%$ pour SLHC

A confirmer

Conclusions sur autocouplage

- Très difficile
- Limite \sim facteur 2 pour LHC 300fb^{-1} (si bruit de fond sont bien sous contrôle)
- Précision de 20 à 50% au SLHC sur le papier
 - même hypothèse que ci-dessus
 - performances des détecteurs à plus haute luminosité ?