



SEARCH FOR SUSY IN THE HIGGS SECTOR

SALVADOR F. LÓPEZ PÉREZ-CHAO

MAÎTRE DE STAGE: ULRICH GOERLACH

Search for SUSY in the Higgs sector

2

- Introduction à la Supersymétrie et au NMSSM
- Benchmark Point 1488(BP7_P1)
- Simulation et détecteur CMS
- Étude de bosons légers $H_{1,2}$, A_1
- Étude de bosons lourdes $H_{3,4}$, A_2
- Significance et bruit de fond du Modèle Standard
- Conclusions

Introduction à la Supersymétrie

3

Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM)

- Extension supersymétrique plus simple du Modèle Standard
- Symétrie de Poincaré \rightarrow Supersymétrie (superspace, superfield)
- Superpartenaires avec mêmes nombres quantiques sauf le spin (a priori même masses \rightarrow symétrie brisée)
- Deux doublets de Higgs pour donner masse à toutes les particules $H \downarrow u, H \downarrow d$ qui nous donnent 5 états de masse bosons de Higgs (3 neutres et 2 chargées)

Next to Minimal Supersymmetric Standard Model (NMSSM)

- On champ de Higgs singlet S est ajouté. La phénoménologie des bosons de Higgs change: 7 bosons de Higgs (5 neutres et 2 chargés).
- En 2014 S.F.King, M.Muhlleitner, R. Nevzorov et K. Walz et autres ont proposé plusieurs scénarios de réalisation du NMSSM.

Benchmark Point 1488 (BP7_P1)

4

Spectre des masses	$M(H\downarrow 1) = 95.6 \text{ GeV}$ $M(H\downarrow 2) = 124.4 \text{ GeV}$ (<i>MS-like</i>) $M(H\downarrow 3) = 299 \text{ GeV}$ $M(A\downarrow 1) = 108 \text{ GeV}$ $M(A\downarrow 2) = 298 \text{ GeV}$	
Signature/Rates	Cross section \times Rapport d'embranchement	
$H\downarrow 1$	$gg \rightarrow H\downarrow 1$	3.337 pb
	$gg \rightarrow H\downarrow 1 \rightarrow bb$	2.477 pb
	$gg \rightarrow H\downarrow 1 \rightarrow \tau\tau$	0.255 pb
	$gg \rightarrow H\downarrow 1 \rightarrow \gamma\gamma$	0.013 pb
$H\downarrow 3$	$gg \rightarrow H\downarrow 3$	4.633 pb
	$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow WW$	54.49 fb
	$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow ZZ$	24.16 fb
	$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow A\downarrow 1 Z \rightarrow bb Z$	614 fb
	$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow H\downarrow 1 H\downarrow 1 \rightarrow bb bb$	310 fb
	$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow H\downarrow 1 H\downarrow 2 \rightarrow bb bb$	187 fb
$A\downarrow 1$	$gg \rightarrow A\downarrow 1$	2.407 pb
	$gg \rightarrow A\downarrow 1 \rightarrow bb$	2.102 pb

Benchmark Point 1488 (BP7_P1)

5

Intérêt de ce scenario:

- Spectre de masse des bosons de Higgs suffisamment légers pour être observés dans le LHC à 13 TeV
- Plusieurs désintégrations de Higgs lourds vers Higgs légers qui donnent accès à mesurer le couplage entre les Higgs.

But du stage:

- Reconstruire quelques modes des désintégrations et les comparer avec le bruit de fond du

Signature/Rates		Cross section × Rapport d'embranchement	
$H\downarrow 3$ GeV	$M=299$	$gg \rightarrow H\downarrow 3$ $gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow A\downarrow 1 \quad Z \rightarrow bb \quad Z$	4.633 pb 614 fb
$A\downarrow 2$ GeV	$M=298$	$gg \rightarrow A\downarrow 3$ $gg \rightarrow A\downarrow 2 \rightarrow H\downarrow 1 \quad Z \rightarrow bb \quad Z$	11.182 pb 391.70 fb

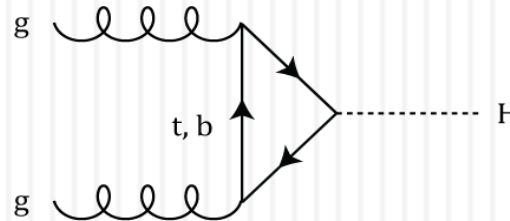
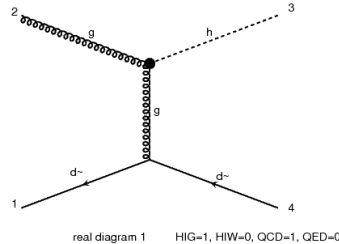
Avec une condition sur le Z dans ses désintégrations leptoniques:

Simulation: signal et bruit de fond générés

6

Production de Higgs

- MadGraph5_aMCSushi → gluon-gluon fusion (t,b et contributions de s-quarks) avec corrections Next-to



- Pythia8 → désintégrations de Higgs, fragmentation et hadronisation.
- Delphes3.2.0 → paramétrisation de la réponse du détecteur CMS.

Finalement on a fait l'analyse avec un fichier .root avec 50K d'événements pour chaque Higgs, avec les respectives modes de désintégrations.

Production du bruit de fond du SM

- MadGraph5 → simule la génération et désintégration des processus.
- Pythia8 → simule la fragmentation et l'hadronisation

CMS et Delphes3.2.0

7

CMS

- Le *Compact Muon Solenoid* (CMS) est un des grandes détecteur du LHC.
- Symétrie cylindrique, 21.6 m longueur et 15 m de diamètre, fermé par deux disques appelés endcaps. 14500 tonnes.
- Les faisceaux entrent par l'axe et se trouvent au centre du détecteur.

- Tracker (silicone détecteurs)

$$\sigma/p \downarrow T \approx 1,5 \cdot 10^{-2} \%$$

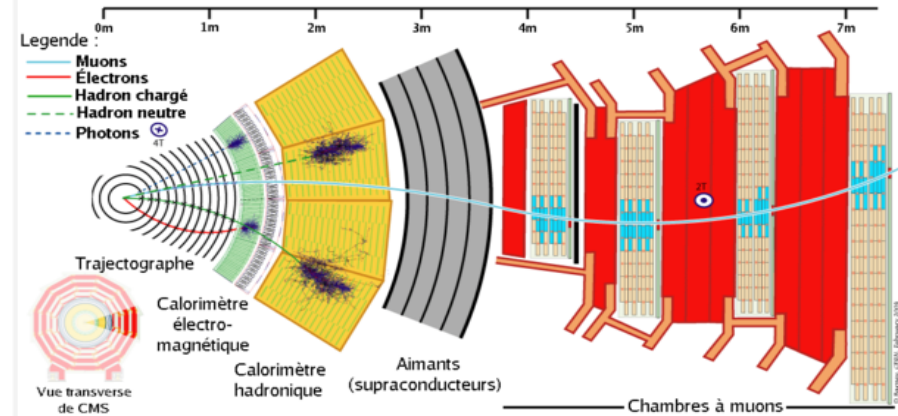
$$p \downarrow T \oplus 0.5\%$$

- Calorimètre Hadronique (Cu+scintillateur)

$$\sigma/E = 100\% / \sqrt{E} \oplus 5\%$$

- Calorimètre Electromagnétique (PbWO₄)

$$\sigma/E = 3\% / \sqrt{E} \oplus 0,5\%$$



CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel (100x150 μm) ~16m² ~66M channels
Microstrips (80x180 μm) ~200m² ~9.6M channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying ~18,000A

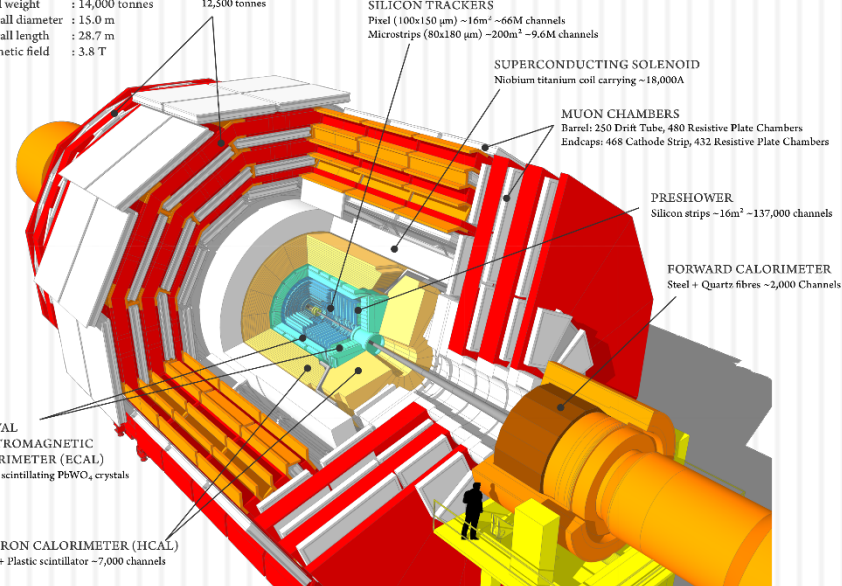
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips ~16m² ~137,000 channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
~76,000 scintillating PbWO₄ crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels

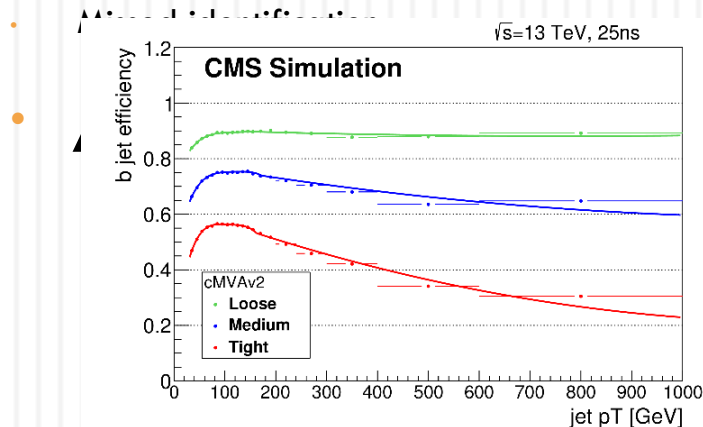


CMS et Delphes3.2.0

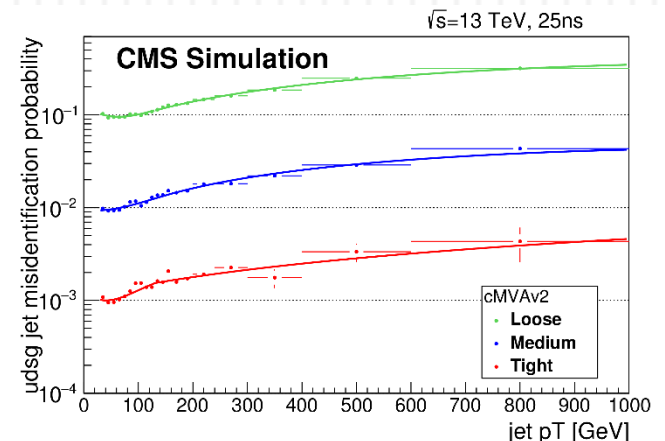
Delphes3.0.2

- Paramétrisation de la réponse des sous-détecteurs: Tracker, calorimètre hadronique, calorimètre électromagnétique, et chambre à muons .
- Les leptons et les photons dans l'acceptance du détecteur sont reconstruits en utilisant un critère d'isolation et avec l'information du tracker, du calorimètre électromagnétique et des chambres à muons.
- Reconstruction des jets: *Generated Jets*, *Calimeters Jets*, **Particle-flow Jets**.

- Identification de b-jets et τ (hadroniques)-jets:
$$\Delta R = \sqrt{(\eta_{\uparrow jet} - \eta_{\downarrow gen \uparrow b, \tau})^2 - (\phi_{\uparrow jet} - \phi_{\downarrow gen \uparrow b, \tau})^2} ; \Delta R < 0,5 \rightarrow$$
 potentiels b-jet ou τ -jet, probabilité dépend de la paramétrisation du b-tagging et τ -tagging.



<2,3 tous l



Étude de $H \rightarrow 1$ et $A \rightarrow 1$.

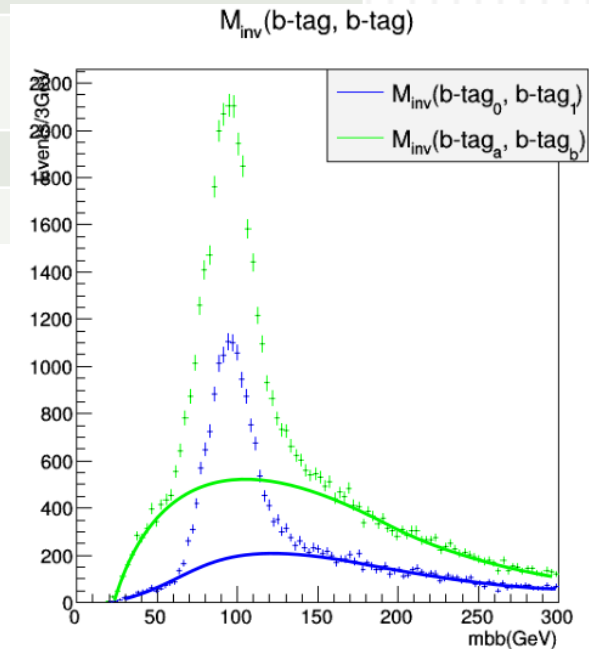
9

Signature/Rates			Cross section × Rapport d'embranchement
$H \rightarrow 1$ GeV	$M=95.6$	$gg \rightarrow H \rightarrow 1$	3.337 pb
		$gg \rightarrow H \rightarrow 1 \rightarrow bb$	2.477 pb
		$gg \rightarrow H \rightarrow 1 \rightarrow \tau\tau$	0.255 pb
$A \rightarrow 1$ GeV	$M=108$	$gg \rightarrow A \rightarrow 1$	
		$gg \rightarrow A \rightarrow 1 \rightarrow bb$	
		$gg \rightarrow A \rightarrow 1 \rightarrow \tau\tau$	

- Deux b-jets plus énergétiques (bleu 12200 entrées)
- Tous les b-jets (vert 15500 entrées)

On attend avoir

$$\{ \text{Evenem.} \times \text{Rap. Branch}(H \rightarrow bb \text{ } 74\%) \times (\text{Efficacité})^2 \times \text{Acceptan}(|\eta| < 2.3) \times \text{CUT}(p_T) \}$$



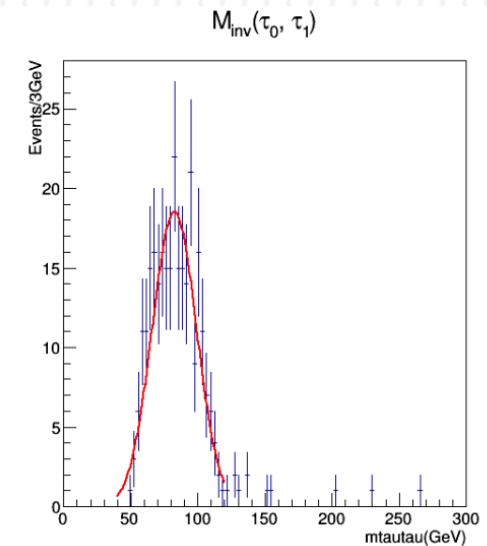
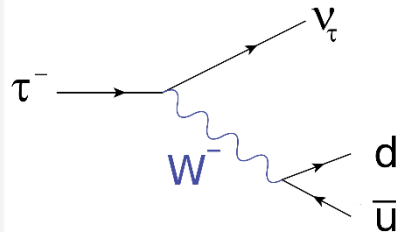
$M=94.78 \pm 0.14$ GeV

Étude de $H \downarrow 1$ et $A \downarrow 1$.

10

Signature/Rates	Cross section × Rapport d'embranchement	
$H \downarrow 1$ $M=95.6 \text{ GeV}$	$gg \rightarrow H \downarrow 1$ $gg \rightarrow H \downarrow 1 \rightarrow bb$ $gg \rightarrow H \downarrow 1 \rightarrow \tau\tau$	3.337 pb 2.477 pb 0.255 pb
$A \downarrow 1$ $M=108 \text{ GeV}$	$gg \rightarrow A \downarrow 1$ $gg \rightarrow A \downarrow 1 \rightarrow bb$ $gg \rightarrow A \downarrow 1 \rightarrow \tau\tau$	2.407 pb 2.102 pb 0.220 pb

Le décalage important dans le spectre de masse de τ -jets est le résultat des modes de désintégrations du lepton τ .



$M=82.6 \pm 1.2 \text{ GeV}$

Étude de $H \rightarrow 11$ et $A \rightarrow 11$.

11

A1

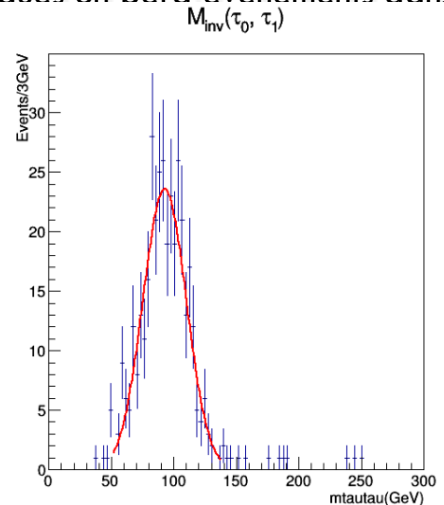
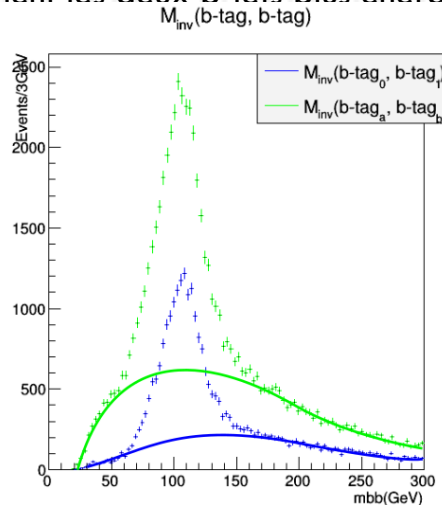
- Deux b-jets plus énergétiques (bleue 14000 entrées)
- Tous les b-jets (vert 20200 entrées)

On attend avoir $\{ \text{Evenem.} \times \text{Rap. Branc}(A \rightarrow bb$
 $87,5\%) \times (\text{Efficacité}) \times \text{Acceptan}(|\eta|$
 $< 2.3) \times \text{CUT}(p_T) \} = 18400$ b-jets reconstruits.

Si on reconstruit seulement les deux b-jets plus énergétiques on perd événements dans la reconstruction, si on reconstruit tous les cor

Le décalage important

hadroniques du lepton



→ désintégrations

Étude de $H\downarrow 3$

12

Signature/Rates		Cross section×Rapport de branchement	
$H\downarrow 3$ GeV	$M=299$	$gg \rightarrow H\downarrow 3$	4.633 pb
		$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow WW$	54.49 fb
		$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow ZZ$	24.16 fb
		$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow A\downarrow 1 Z \rightarrow bb Z$	614 fb
		$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow H\downarrow 1 H\downarrow 1 \rightarrow bb bb$	310 fb
		$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow H\downarrow 1 H\downarrow 2 \rightarrow bb bb$	187 fb

Résumé de ce qu'on fait: On utilise la détection du **Z** pour sélectionner le processus **$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow A\downarrow 1 Z \rightarrow bb Z$** et on essaie de reconstruire la masse de **$A\downarrow 1$** et **$H\downarrow 3$** .

Pour la possibilité d'identification du scenario BP7_P1 on a utilisé le mode désintégration **$gg \rightarrow H\downarrow 3 \rightarrow A\downarrow 1 Z \rightarrow bb Z \rightarrow ee, \mu\mu$** avec une condition sur le Z. L'étude a compris:

- ❖ Comprendre le spectre de masse de **bb** .
- ❖ Identifier les boson Z avec les électrons et muons,

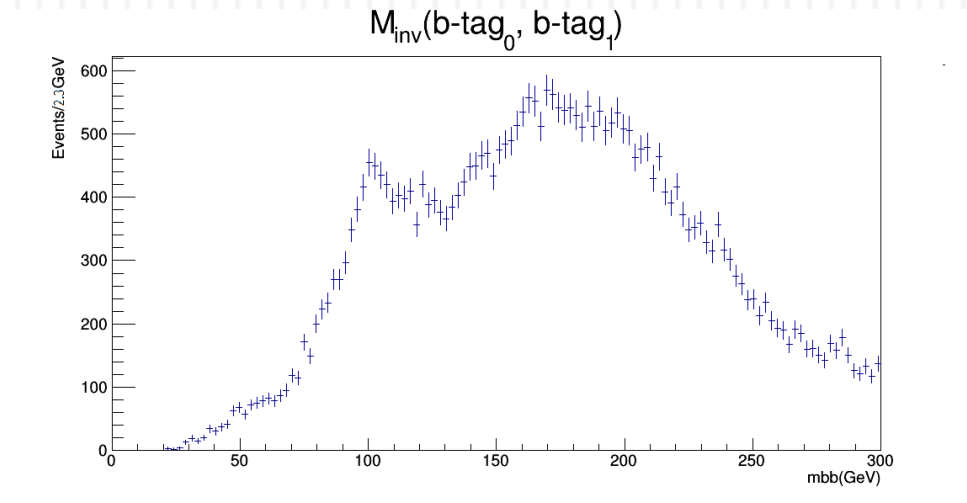
Étude de $H \rightarrow 3b$

$$g, g \rightarrow H \rightarrow 3b \rightarrow A \rightarrow 1 Z \rightarrow bb Z$$

$$g, g \rightarrow H \rightarrow 3b \rightarrow H \rightarrow 1 H \rightarrow 1 \rightarrow bb bb$$

$$g, g \rightarrow H \rightarrow 3b \rightarrow H \rightarrow 1 H \rightarrow 2 \rightarrow bb bb$$

13



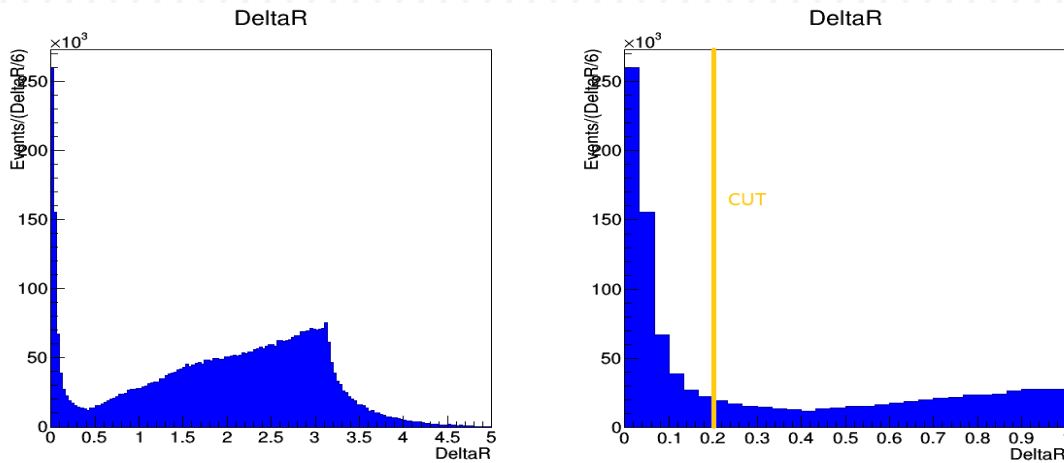
Pourquoi faire une coupure en Z pour reconstruire les bb ?

Si on reconstruit le spectre de masse des deux b-jets plus énergétiques, on obtient une courbe avec un pic qui est la superposition des plusieurs désintégrations, et un continuum dû aux mauvaises combinaisons. Pour le démontrer on établit deux conditions:

- \square Identifier les vrais b-jets $\Delta R_{jet-quark} = \sqrt{(\eta_{b-jet} - \eta_{gen b-quark})^2 + (\phi_{b-jet} - \phi_{gen b-quark})^2}$; $\Delta R_{jet-quark} < 0.2$

Étude de $H \rightarrow 3$

14



Après la condition $\Delta R_{jet-quark} < 0.2$ on reconstruit tous les vrai b-jets, on voit qu'on a perdu le continuum dû aux mauvaises combinaison entre vrai-faux et faux-faux b-jets.

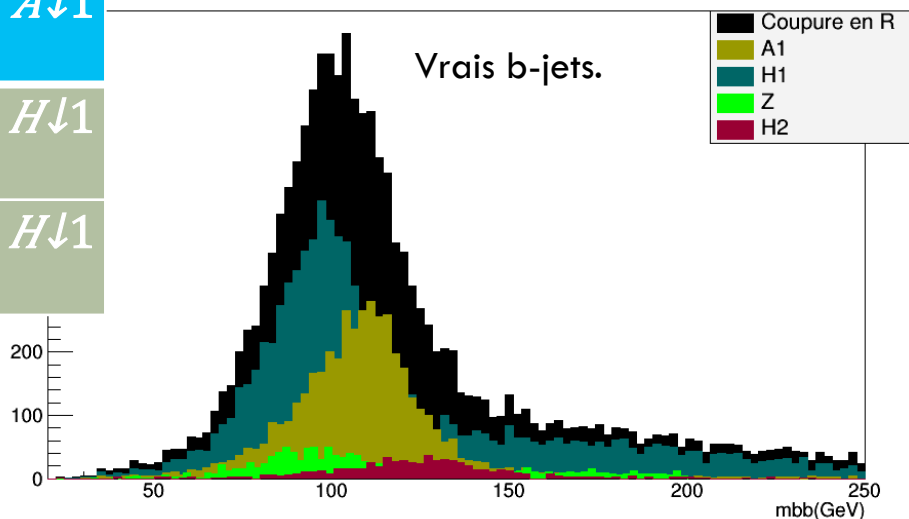
$gg \rightarrow H \rightarrow A \rightarrow 1$
 $Z \rightarrow bb Z$

$gg \rightarrow H \rightarrow H \rightarrow 1$
 $H \rightarrow bb bb$

$gg \rightarrow H \rightarrow H \rightarrow 1$
 $H \rightarrow bb bb$

$M_{inv}(b\text{-tag}, b\text{-tag})$

Vrais b-jets.



Avec un ajustement gaussien

$M(H \rightarrow 2) = 123.9 \pm 1.1 \text{ GeV}$,

$M(H \rightarrow 1) = 96.5 \pm 0.23 \text{ GeV}$,

$M(A \rightarrow 1) = 107.6 \pm 0.32 \text{ GeV}$,

$M(Z) = 92.9 \pm 2.9 \text{ GeV}$

Mais pour analyser des vrais données on ne peut pas faire ça...
 On fait une coupure en la masse de Z pour reconstruire les b-jets.

Étude de $H \rightarrow Z \gamma$

$$g, g \rightarrow H \rightarrow Z \gamma \rightarrow A \rightarrow \gamma \gamma \quad Z \rightarrow b \bar{b} \quad Z$$

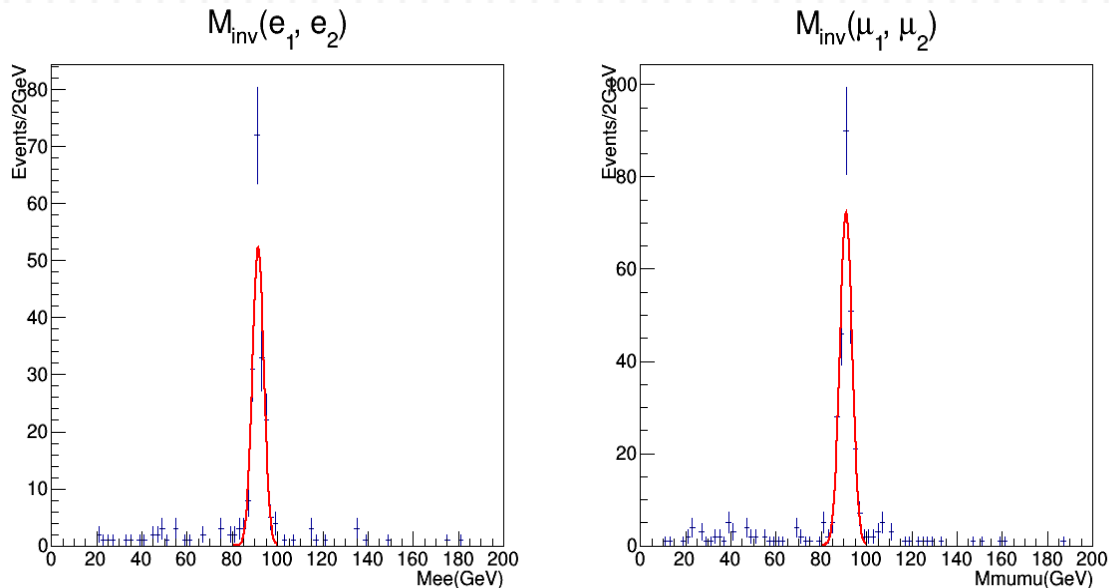
$$g, g \rightarrow H \rightarrow Z \gamma \rightarrow H \rightarrow \gamma \gamma \quad H \rightarrow b \bar{b} \quad b \bar{b}$$

$$g, g \rightarrow H \rightarrow Z \gamma \rightarrow H \rightarrow \gamma \gamma \quad H \rightarrow b \bar{b} \quad b \bar{b}$$

15

- On sélectionne les bosons Z qui proviennent de la désintégration $H \rightarrow Z \gamma$ par faire une coupure avec la condition ($80 \text{ GeV} < M_{ee, \mu\mu} < 100 \text{ GeV}$).

- La plupart



Vu que les électrons et muons proviennent du Z et que 92% de bosons Z proviennent de $H \rightarrow Z \gamma$, on peut reconstruire le spectre de masse de $b \bar{b}$ avec les deux b-jets plus énergétiques:

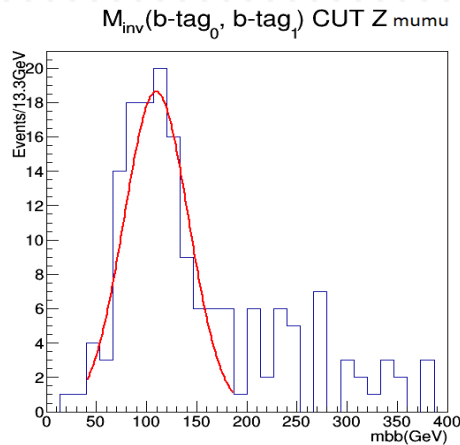
Étude de $H \rightarrow 3$

$$g, g \rightarrow H \rightarrow 3 \rightarrow A \rightarrow 1 \quad Z \rightarrow bb \quad Z$$

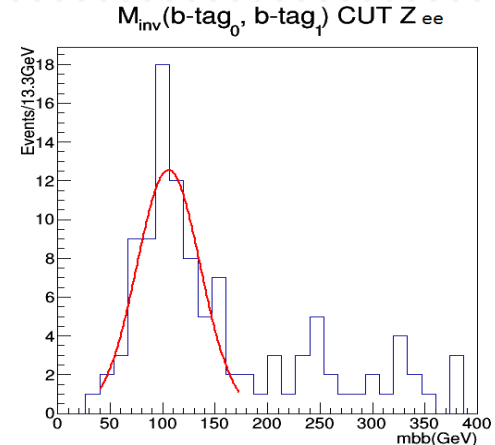
$$g, g \rightarrow H \rightarrow 3 \rightarrow H \rightarrow 1 \quad H \rightarrow 1 \rightarrow bb \quad bb$$

$$g, g \rightarrow H \rightarrow 3 \rightarrow H \rightarrow 1 \quad H \rightarrow 2 \rightarrow bb \quad bb$$

16

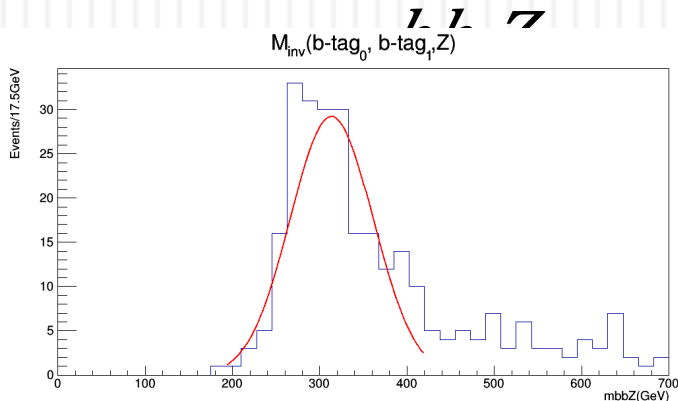


$$M(A \rightarrow 1) = 109.7 \pm 3.6 \text{ GeV}$$



$$M(A \rightarrow 1) = 105.6 \pm 4.1 \text{ GeV}$$

Avec la même condition $Z(80 \text{ GeV} < M \rightarrow ee, \mu\mu < 100 \text{ GeV})$ on reconstruit



$$M(H \rightarrow 3) = 308.1 \pm 5.6$$

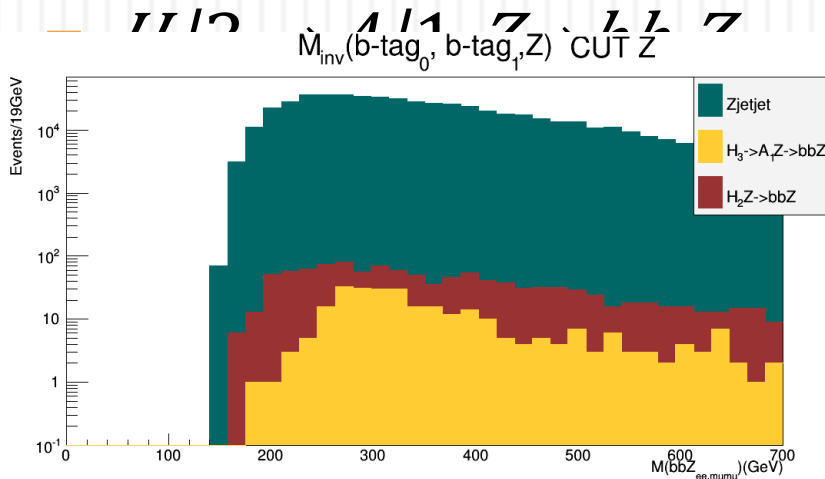
ix b-jets plus énergétiques.

Pour étudier la possibilité de découverte il faut comparer avec le bruit de fond de Modèle Standard...

$$H \rightarrow 3 \rightarrow A \rightarrow 1 \quad Z \rightarrow bb \quad Z$$

Étude de $H \downarrow 3$. Bruit du MS.

	<u>Événements</u>	<u>Luminosité intégrée</u>	<u>Événements</u> $M(bb)$
$Z \downarrow e e, \mu \mu)_{\text{CUT}} Z$			
□ $ZZ \rightarrow Z \text{jetjet} \rightarrow l \uparrow + l \uparrow - \text{jetjet}$	8383	100K	$525 \text{ pb} \uparrow$
□ $ZH \downarrow 2 \rightarrow Zbb$	1211	100K	$0,72 \text{ pb} \uparrow - 1$



$fb \uparrow -$
 $l \uparrow -$



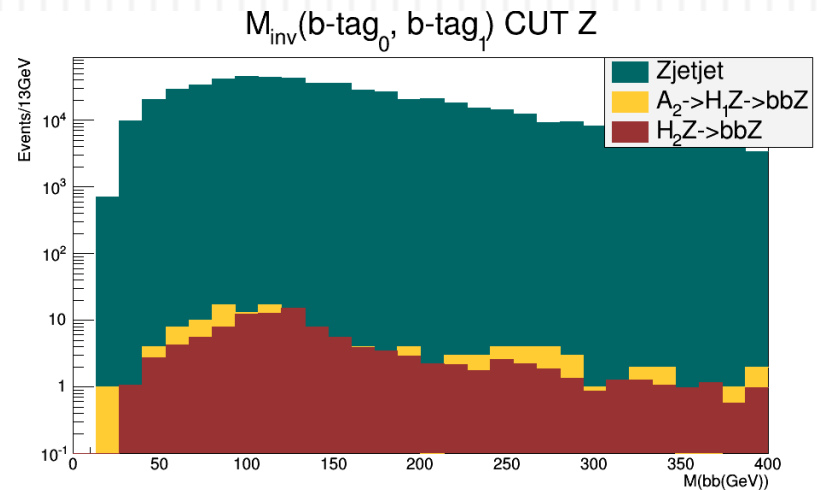
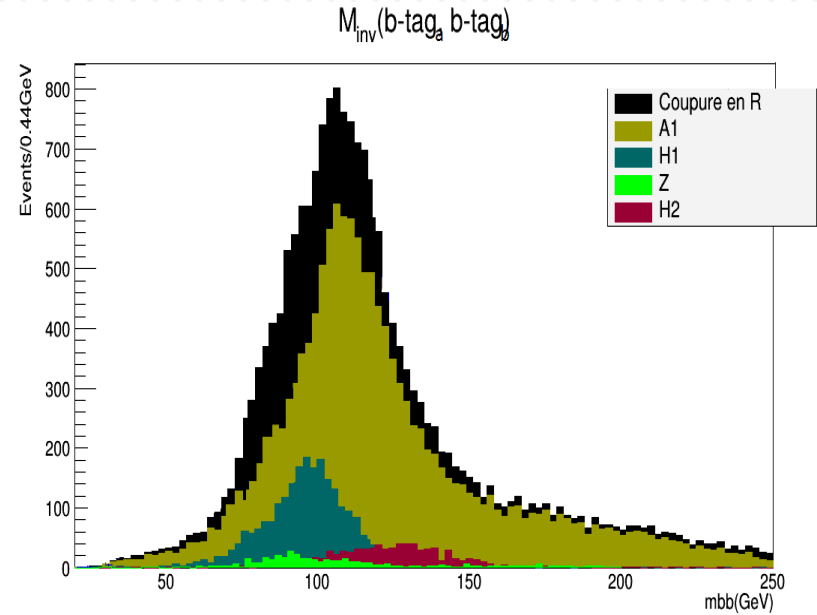
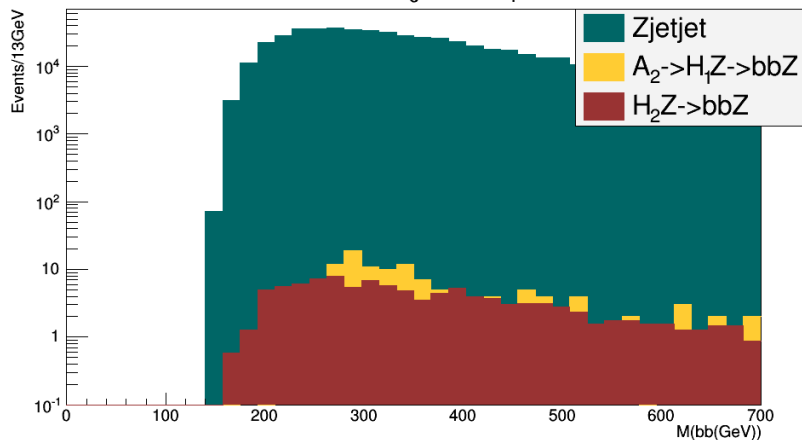
A11

H3

Étude de $A \downarrow 2$

18

Signature/ Rates	Cross section \times Rapport d' $\tilde{\nu}$ embranchement	
$A \downarrow 2$ $M = 298$ GeV	$gg \rightarrow A \downarrow 3$	11.182 pb
	$gg \rightarrow A \downarrow 2 \rightarrow bb$	57.50 fb
	$gg \rightarrow A \downarrow 2 \rightarrow \tau\tau$	7.43 fb
	$gg \rightarrow A \downarrow 2 \rightarrow A \downarrow 1$ $H \downarrow 1 \rightarrow bb$	878.30 fb
	$gg \rightarrow A \downarrow 2 \rightarrow A \downarrow 1$ $H \downarrow 2 \rightarrow bb$	702.66 fb
	$gg \rightarrow A \downarrow 2 \rightarrow H \downarrow 1$	391.70 fb
	$\tilde{\nu} \rightarrow hh$	



Conclusion

19

- Le Benchmark Point 1488(BP7_P1) reste ouvert à l'analyse.
- La reconstruction de $H \downarrow 3$ dans les modes des desintegrations $H \downarrow 3 \rightarrow A \downarrow 1 Z \rightarrow bb Z \downarrow ee, \mu\mu$ et $A \downarrow 2 \rightarrow HZ \rightarrow bb Z \downarrow ee, \mu\mu$ semble être difficile pour la découverte de cette scenario.
- Il faut trouver des stratégies pour rejeter les faux b-jets.
- Une autre stratégie pourraient envisager les études des $H \downarrow 3$ et $A \downarrow 2$ avec des états finaux en $bb bb$, $bb \gamma\gamma$ ou $bb \tau\tau$ avec des conditions plus fortes sur le b-tag et explorer des coupures sur les variables cinématiques ($p \downarrow T$, nombre de jets...)