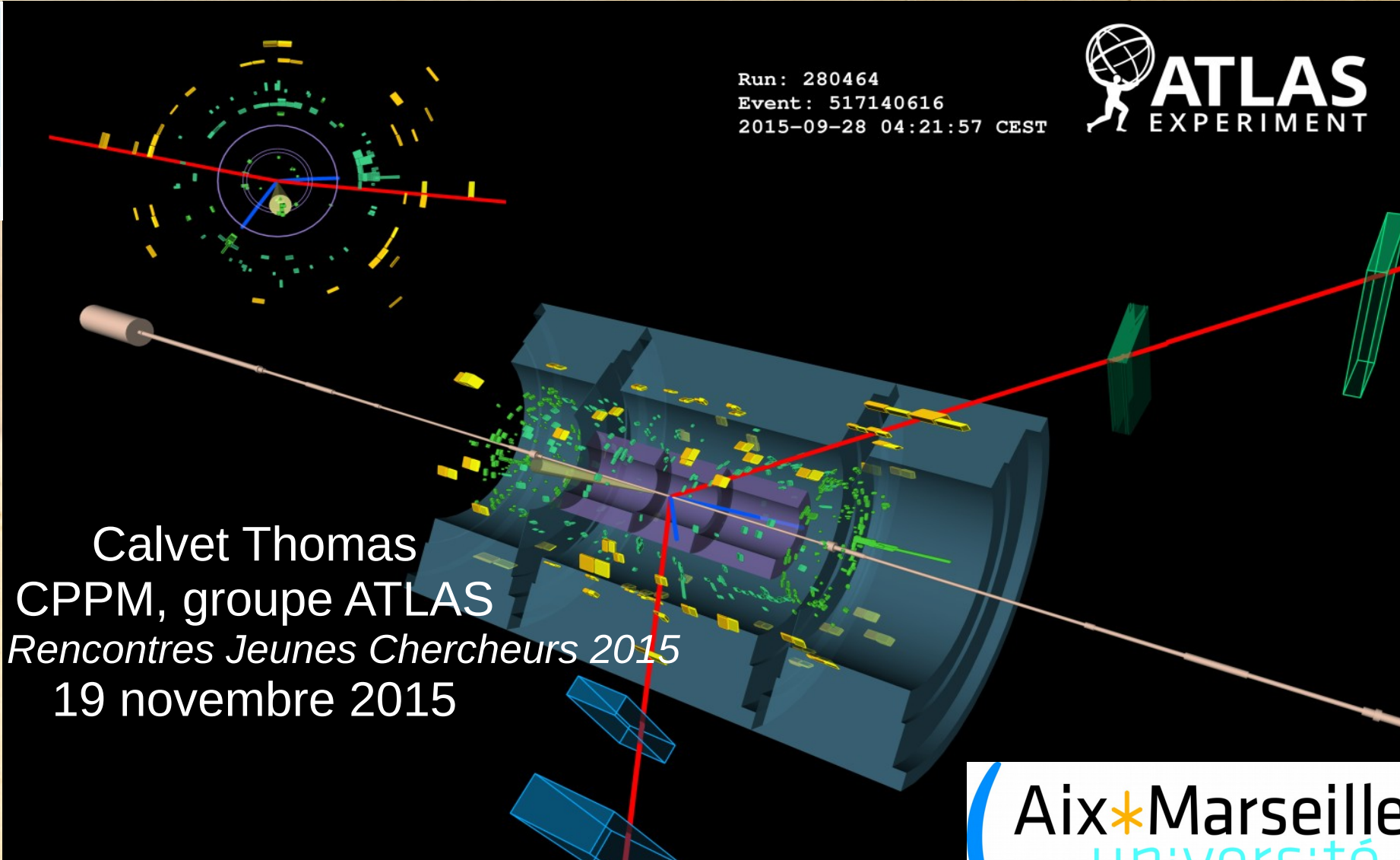


Étude du couplage du boson de Higgs au quark top et identification des b-jets pour l'expérience ATLAS au LHC



Calvet Thomas
CPPM, groupe ATLAS

Journées Rencontres Jeunes Chercheurs 2015
19 novembre 2015



Recherche de bosons Higgs au Run 2 du LHC

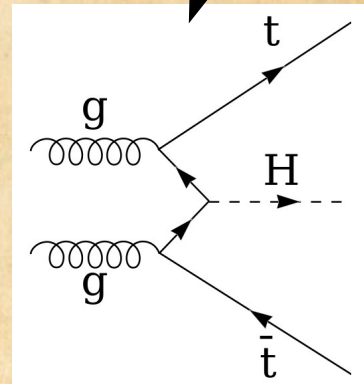
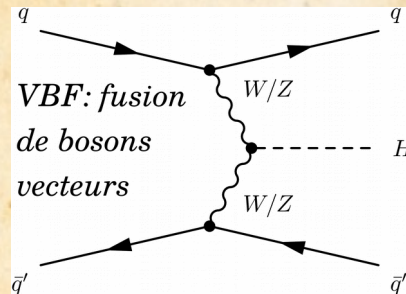
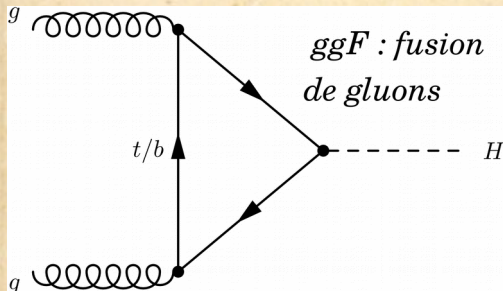
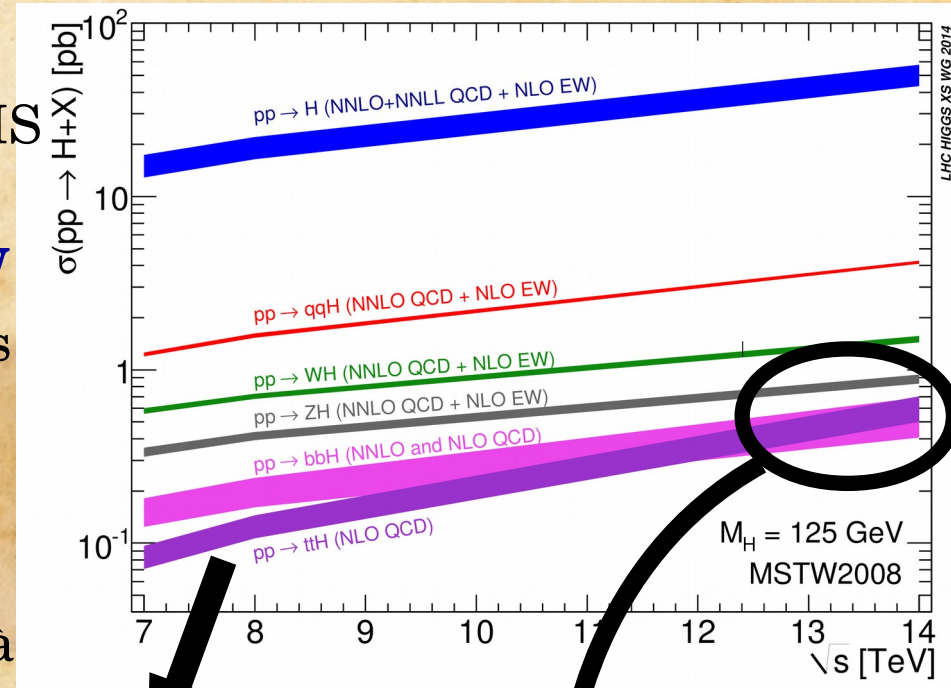
2

État des lieux après le Run 1

- Productions **ggF and VBF** (ATLAS+CMS only) observés à plus de 5σ .
- Désintégrations **H- $\gamma\gamma$, H- ZZ , H- WW** and **H- $\tau\tau$** (ATLAS+CMS only) observés à plus de 5σ .
- Mesure précise de la masse et du spin.

LHC Run 2 (2015)

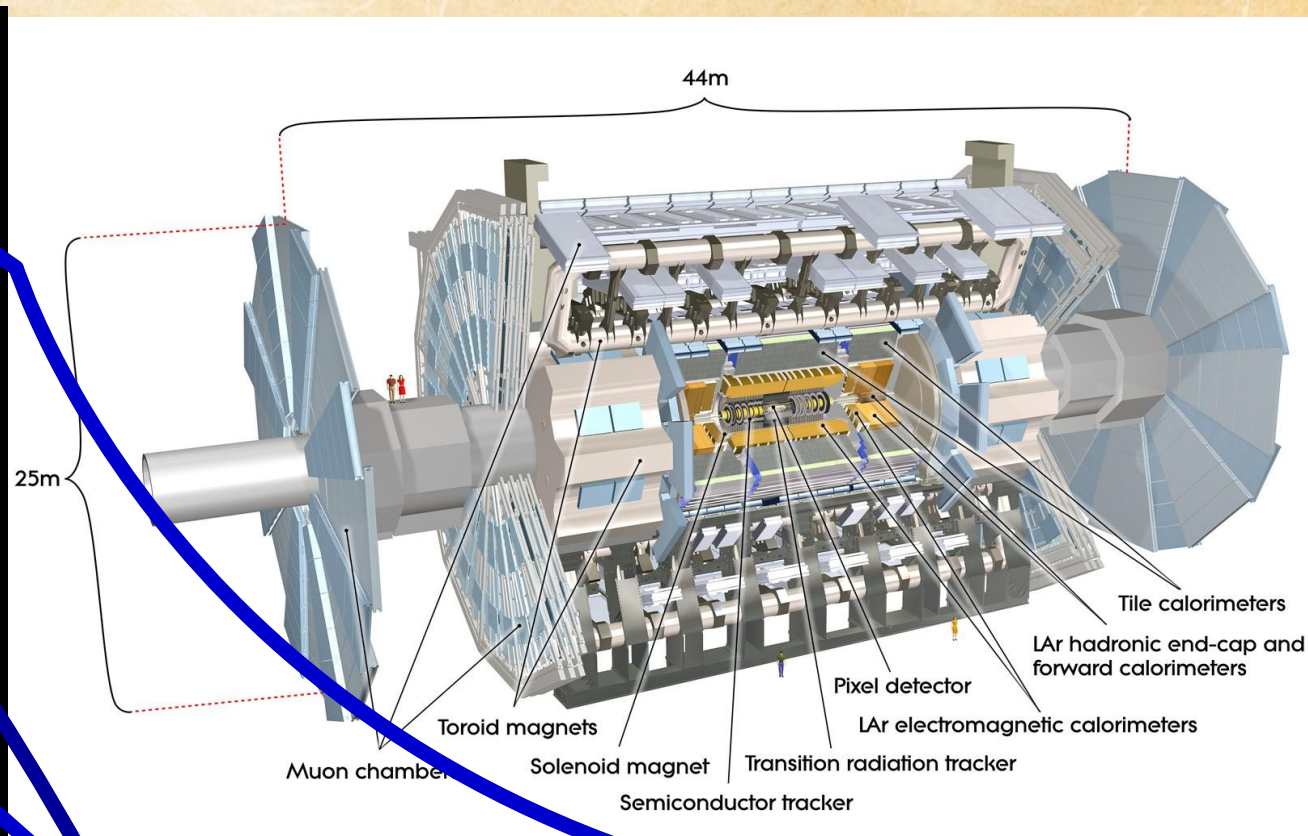
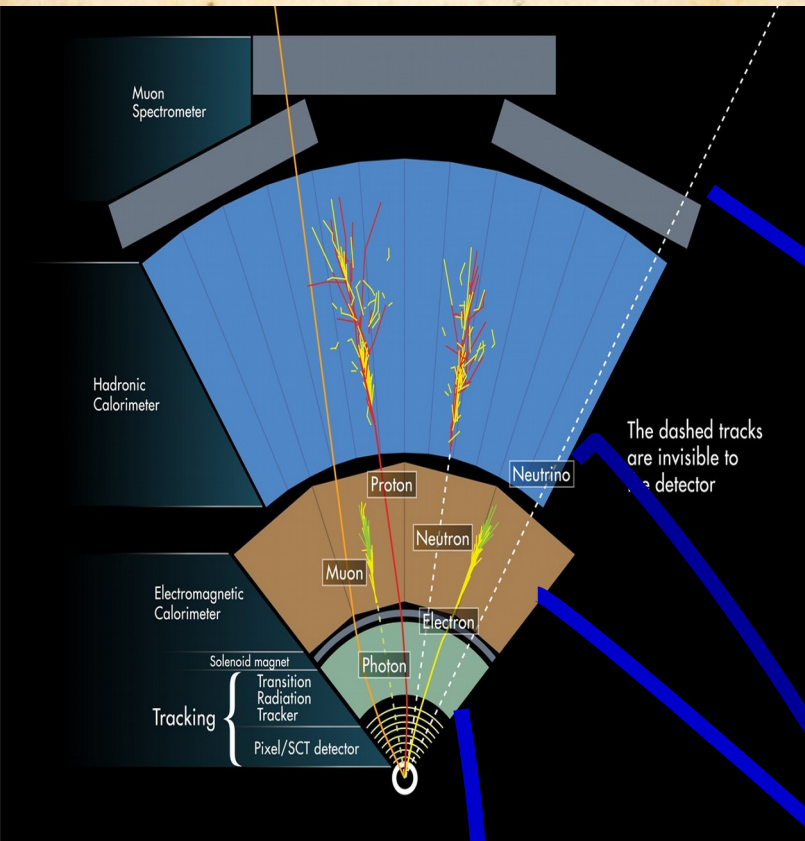
- **Énergie au centre de masse** augmentée à **13TeV** et **haute luminosité** $\sim 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.
- Amélioration du détecteur.



La production $t\bar{t}H$ sera accessible pour la première fois au Run 2.

Le détecteur ATLAS

3



➤ Trajectographe interne

Marque le passage de particules chargées.

➤ Calorimètres

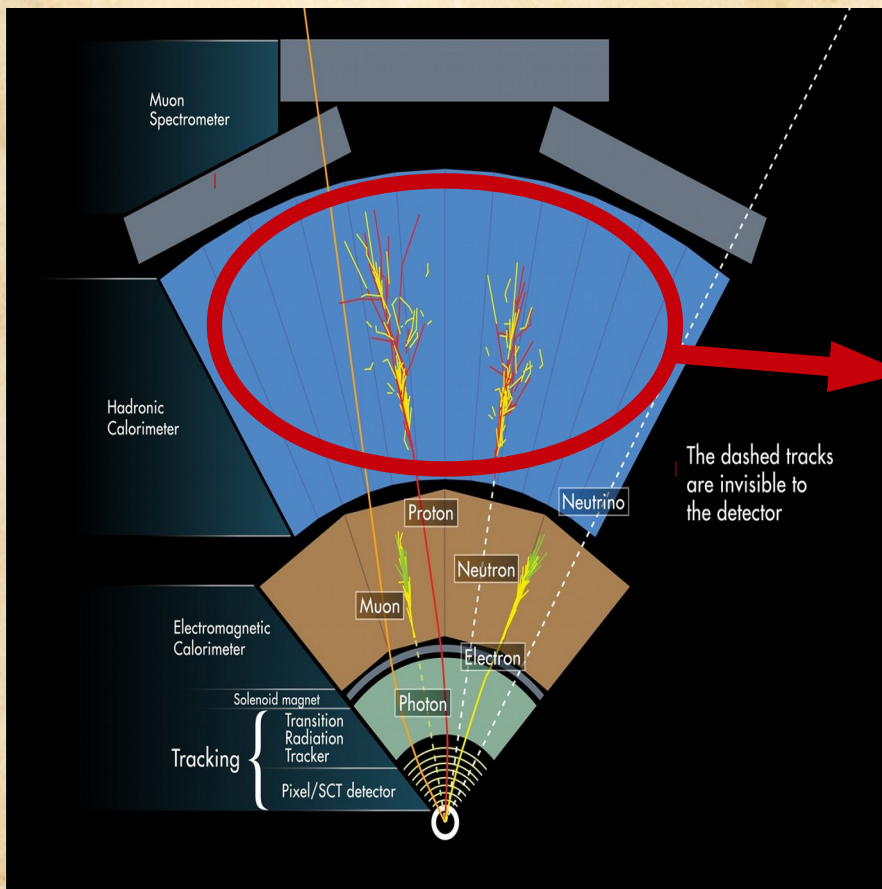
Reconstruisent les électrons, photons et jets à partir de dépôts d'énergie.
Bilan de l'énergie dans le plan transverse → Reconstruction de l'énergie manquante.

➤ Chambres à muon

Détecte le passage d'un muon.

Objet important : les jets

4



Jets:

- Ensemble de particules produit par l'hadronisation des quarks et gluons.
- Reconstitue à partir des dépôts d'énergie dans le calorimètre.
 - Utilise un algorithme de regroupement.
 - Anti-kt 4 : associe les particules dans un cône de rayon 0.4.
- b-jets: jets provenant de quarks b.

Le Insertable B-Layer (IBL)

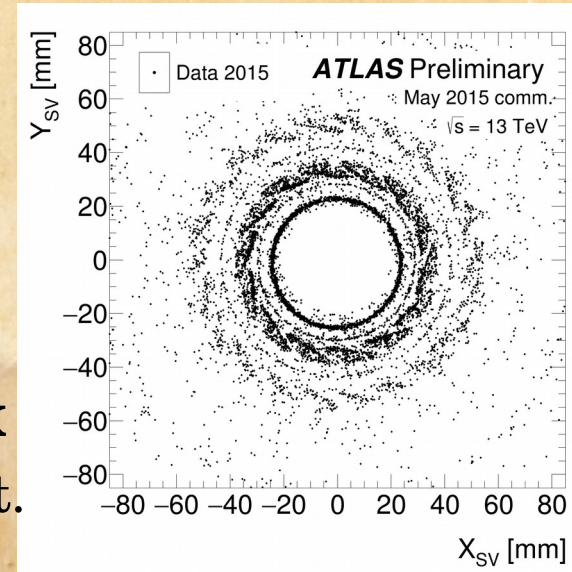
5

● Nouvelle couche de pixels

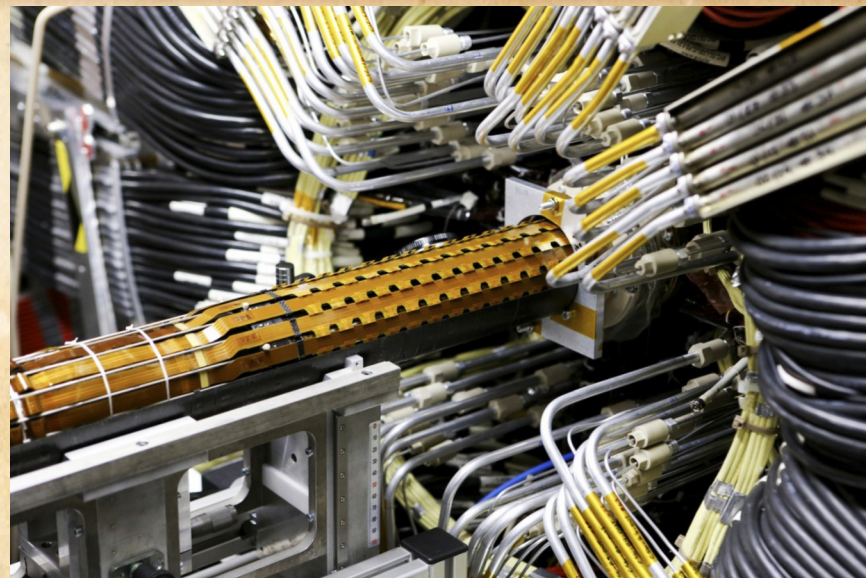
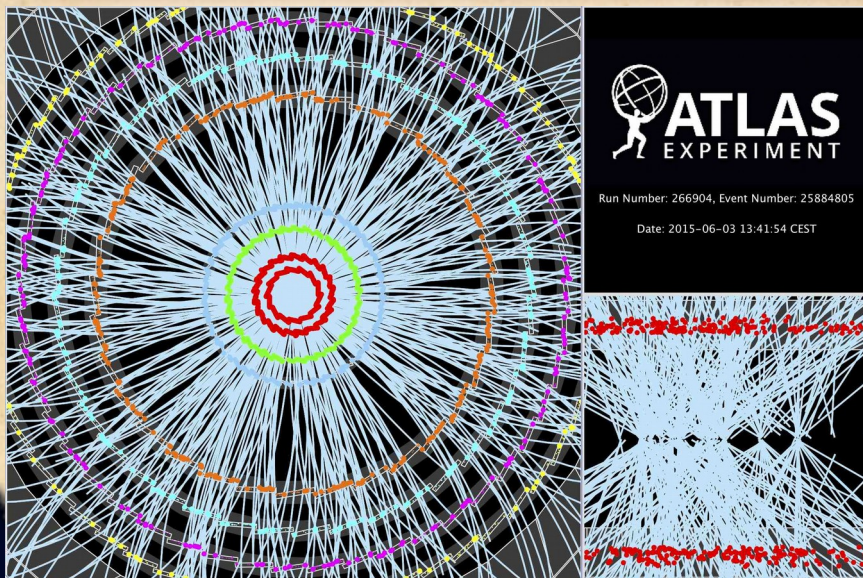
- Plus proche du flux de particules: 3.3cm contre 5cm au Run 1.
- Plus petits pixels: $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ contre $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ au Run 1.

● Meilleure résolution des traces et des vertex

- Essentiel pour différencier les nombreux points d'impact.
- Important pour l'identification des jets b.



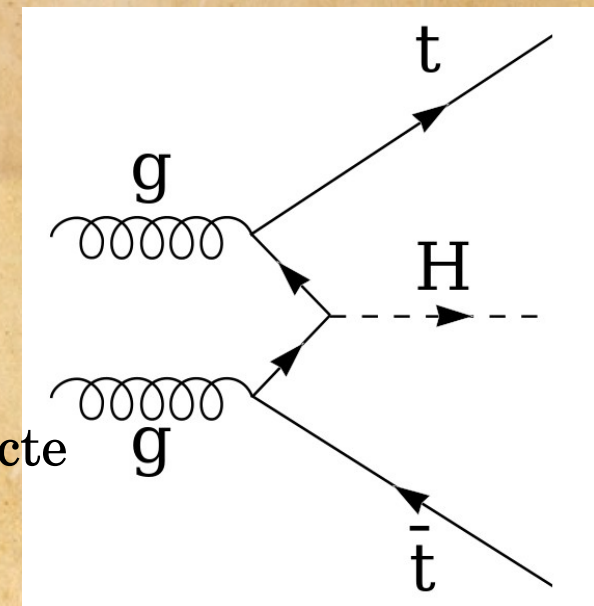
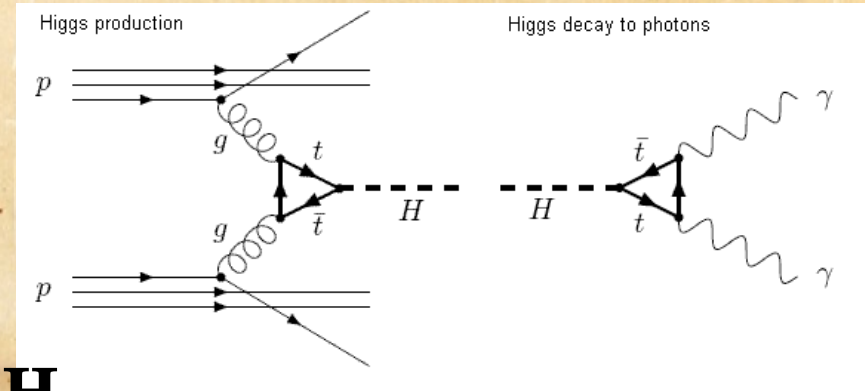
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/IDTR-2015-003/>



Étude de la production ttH : motivation

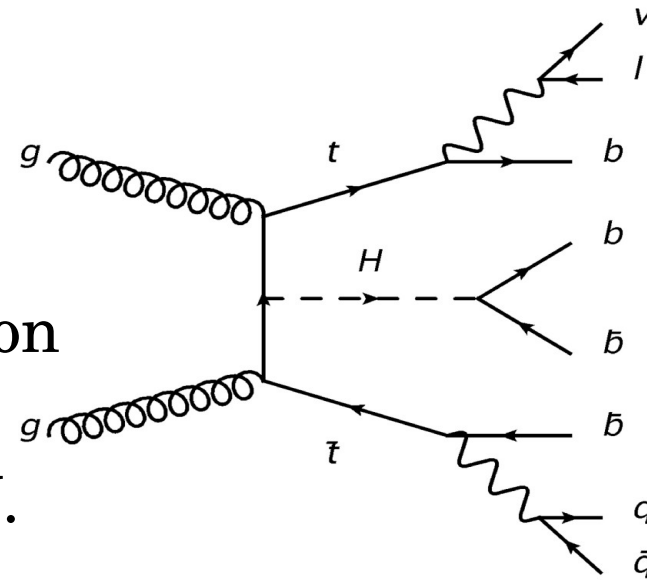
6

- Le **quark top** est la particule du modèle standard avec le **plus fort couplage au boson de Higgs**.
- **Mesure indirecte du couplage $t \leftrightarrow H$**
 - Mesure actuelle fait appel à des boucles de quark top.
 - Assume qu'aucune nouvelle physique n'entre en jeu dans ces boucles.
- **ttH : seul canal permettant une mesure directe du couplage $t \leftrightarrow H$**
 - Le taux de production du ttH donne une mesure directe du couplage $t \leftrightarrow H$.
 - Une déviation par rapport au modèle standard indiquerait la présence de nouvelle physique !

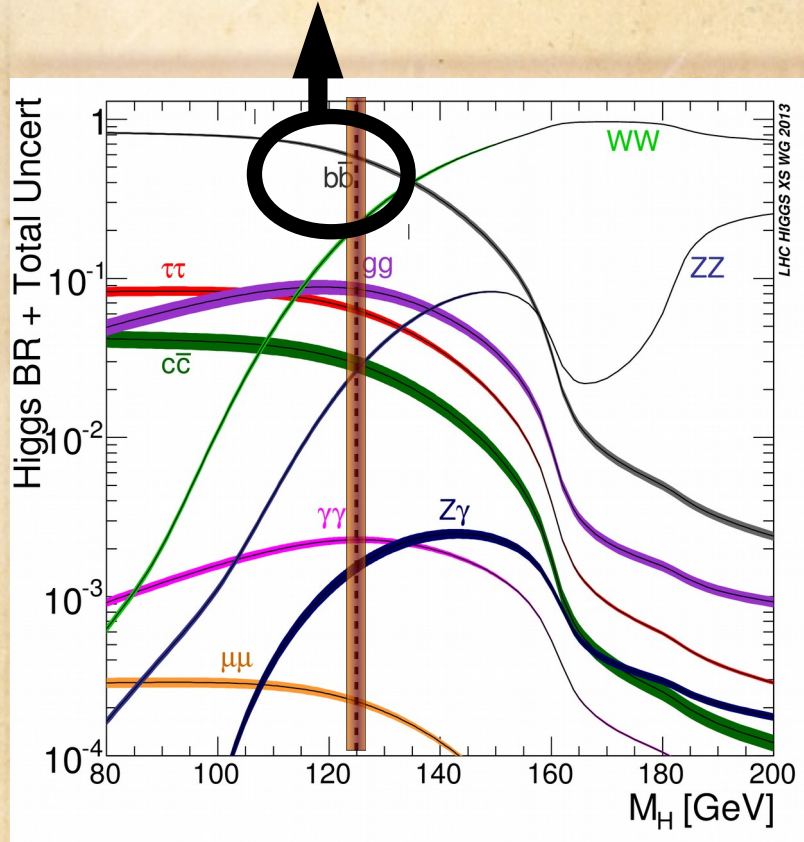


ttH(H->bb)

H->bb est le mode de désintégration le plus probable (~58%) pour un boson de Higgs avec $m_H = 125$ GeV.



7



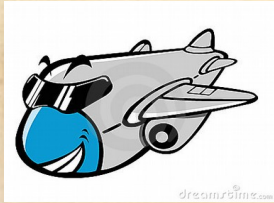
- Principal bruit de fond tt+jets:
 - **tt+bb**: irréductible car même état final.
 - tt+cc et tt+light jets: réductibles.
- L'identification des b-jets : **b-tagging**
 - Fondamental pour le signal et le bruit de fond.
 - Jusqu'à 4 b-jets sont attendus dans l'état final.

b-tagging

- Ingrédient fondamental pour toute analyse avec des b-quarks dans l'état final: physique du Higgs, modèle standard, nouvelle physique.
- Vise à différentier les b-jets des c-jets et light-jets (udsg).

b-tagging

- Ingrédient fondamental pour toute analyse avec des b-quarks dans l'état final: physique du Higgs, modèle standard, nouvelle physique.
- Vise à différentier les b-jets des c-jets et light-jets (udsg).



b-hadron



c-hadron

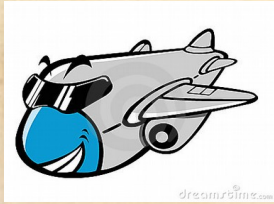


light-hadron

b-tagging

10

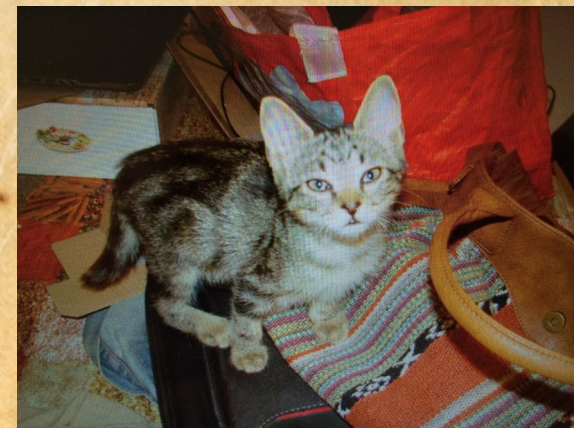
- Ingrédient fondamental pour toute analyse avec des b-quarks dans l'état final: physique du Higgs, modèle standard, nouvelle physique.
- Vise à différentier les b-jets des c-jets et light-jets (udsg).



b-hadron

c-hadron

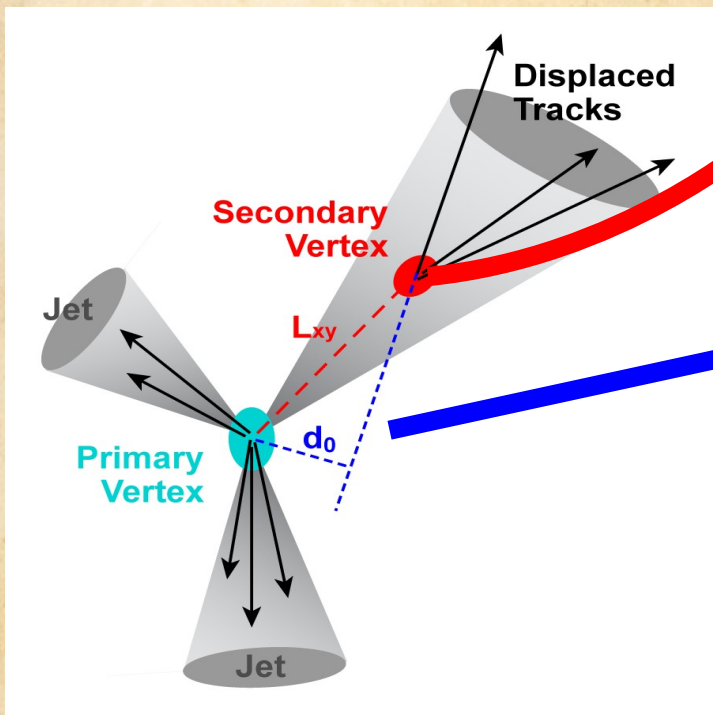
light-hadron



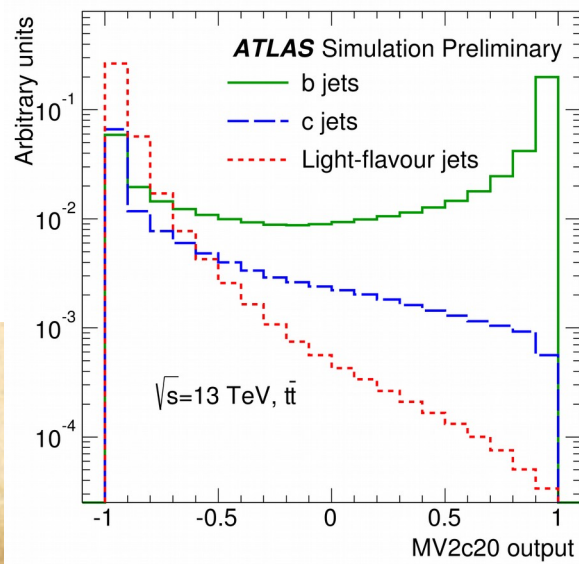
b-tagging

11

- Ingrédient fondamental pour toute analyse avec des b-quarks dans l'état final: physique du Higgs, modèle standard, nouvelle physique.
- Vise à différentier les b-jets des c-jets et light-jets (udsg).
- Basé sur la **longue durée de vie des b-hadrons: $\sim 1.5\text{ps}$** .



- **Vertex secondaire** pour la désintégration du B.
- Éloigné du vertex primaire: $L_{xy} \sim 4\text{mm}$.
- Masse importante: 1 à 5 GeV.
- Traces incompatibles avec le vertex primaire.
- **Grands paramètres d'impact.**

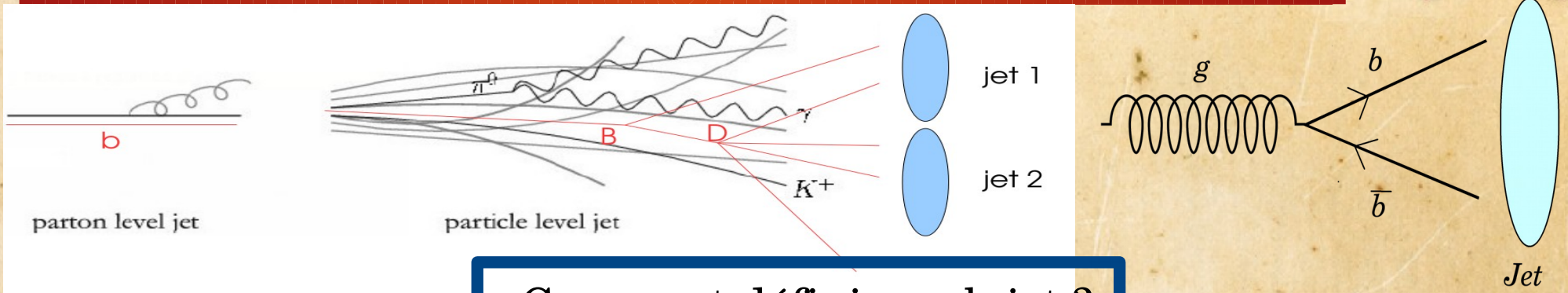


Discriminant final
du b-tagging

ATL-PHYS-PUB-2015-022

Étude du labelling pour le b-tagging

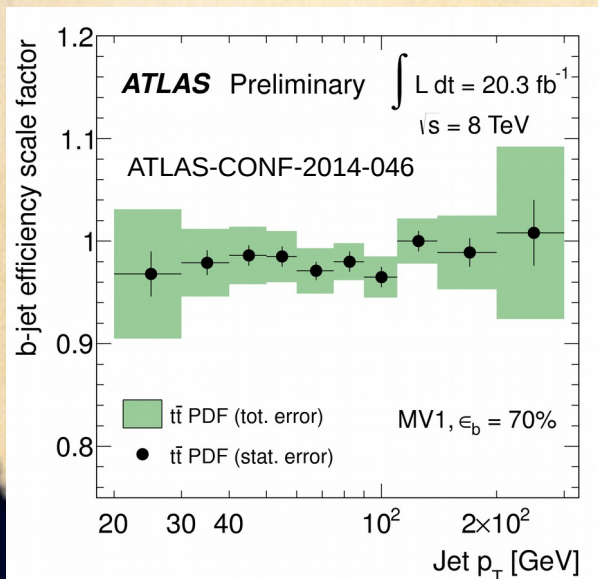
12



Comment définir un b-jet ?

Objectif : donner une définition cohérente avec le b-tagging et les données:

- Efficacités calculées sur les simulations.
- Doivent être aussi proche que possible des efficacités sur les données.



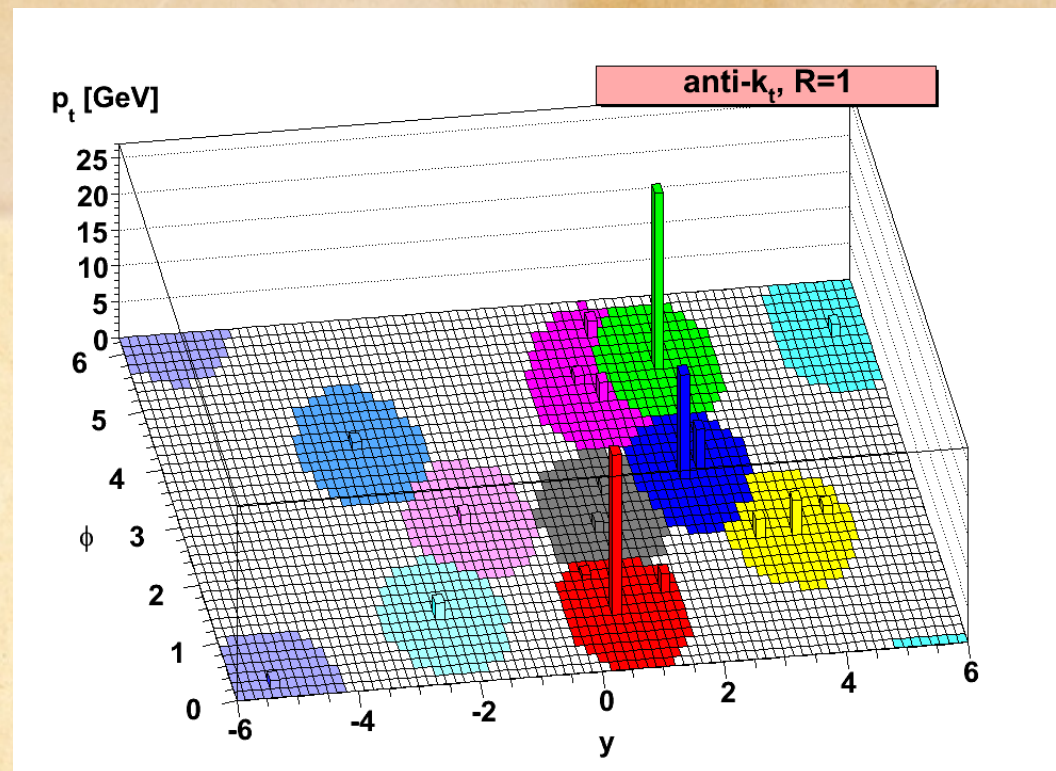
Facteur d'échelle pour les b-jets:

- Rapport entre efficacité mesurée et calculée.
- Correction appliquée aux simulations.

Définition des b-jets doit prendre en compte la région de l'espace des phases où on peut différencier les b-jets expérimentalement.

- Une définition mal choisie demanderait une extrapolation supplémentaire des simulations.

- Comparaison de différents algorithmes d'association quark \leftrightarrow jets
 - **Ghost association**: utilise l'algorithme de construction des jets.
 - **$\Delta R < 0.3$ exclusif**: toute particule dans un cône de rayon 0.3 autour du jet est associée à celui-ci. Si une particule est compatible avec plusieurs jets elle est associée au plus proche.



- Comparaison de différents algorithmes d'association quark \leftrightarrow jets
 - **Ghost association**: utilise l'algorithme de construction des jets.
 - **$\Delta R < 0.3$ exclusif**: toute particule dans un cône de rayon 0.3 autour du jet est associée à celui-ci. Si une particule est compatible avec plusieurs jets elle est associée au plus proche.

| | | | | |
|-------------|---------|----------|-------------------------------|-------------|
| Label light | 0.4% | | 0.3% | 49.0% |
| Label C | 0.1% | | 9.4% | 0.01% |
| Label BB | ~0% | 0.4% | <i>ATLAS</i> Work in progress | |
| Label B | 40.3% | 0.2% | 0.02% | 0.03% |
| DR / GA | Label B | Label BB | Label C | Label light |

$n(X\text{-jets})/n(\text{jets})$

| | | | | |
|-------------|---------|----------|-------------------------------|-------------|
| Label other | 1.0% | | 0.39% | 0.30% |
| Label C | 8.7% | | 20.3% | 6.7% |
| Label BB | 60% | 76.4% | <i>ATLAS</i> Work in progress | |
| Label B | 70.8% | 66.1% | 45.9% | 33.3% |
| DR / GA | Label B | Label BB | Label C | Label other |

Efficacité du b-tagging pour chaque catégorie

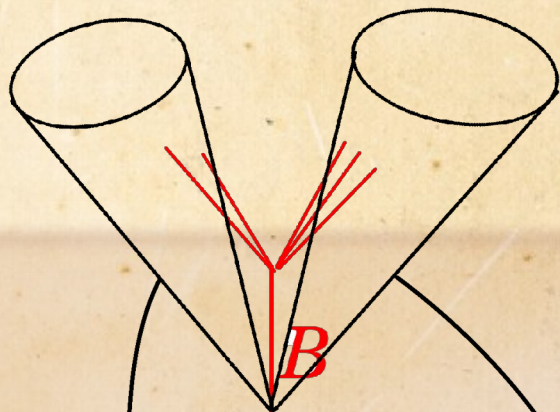
ΔR identifie moins de b-jets, mais ces jets ont une meilleure efficacité.

b-hadron divisé dans deux jets

15

*Jet associé
au b avec GA*

*Jet associé
au b avec DR*



Jet associé à un b-hadron par ΔR seulement:

- Souvent proche d'un autre jet.
- Dans **89%** des cas cet autre jet est associé au b-hadron par ghost association.

| | | | | |
|-------------|---------|----------|-------------------------------|-------------|
| Label other | 1.0% | | 0.39% | 0.30% |
| Label C | 8.7% | | 20.3% | 6.7% |
| Label BB | 60% | 76.4% | <i>ATLAS</i> Work in progress | |
| Label B | 70.8% | 66.1% | 45.9% | 33.3% |
| DR / GA | Label B | Label BB | Label C | Label other |

Le **b-tagging** semble préférer le jet choisi par ΔR . Pourquoi ?

- b-tagging basé sur les traces.
- **Traces associées au jets par ΔR .**
- Exploite la corrélation jet \leftrightarrow particule / jet \leftrightarrow traces

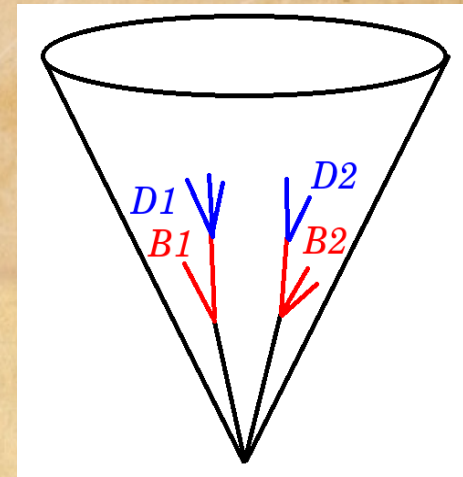
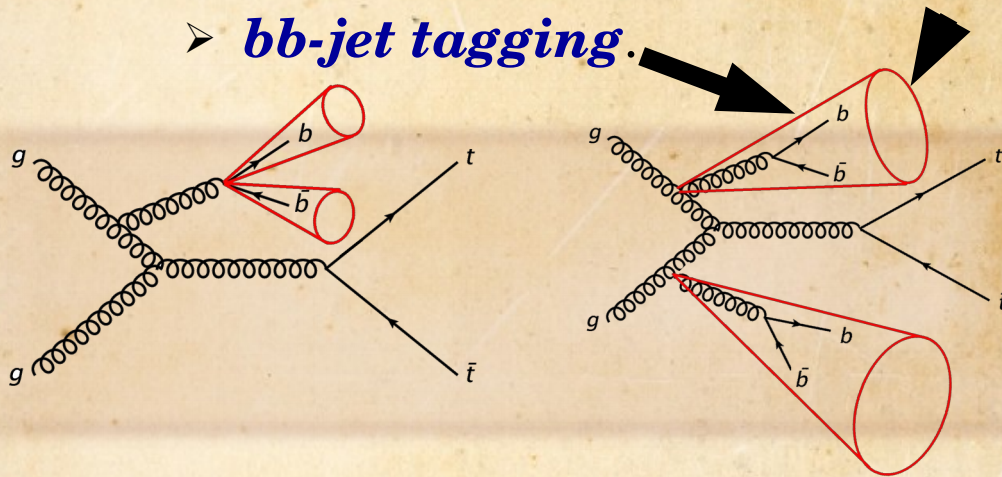
Double-b-tagging

16

Motivation : contraindre le bruit de fond $tt+bb$.

- Difficile à contrôler, importantes erreurs théoriques.
- Besoin d'un outil pour détecter $g \rightarrow bb$ dans les données.

➤ ***bb-jet tagging.***



MultiSVbb: bb-jet tagger

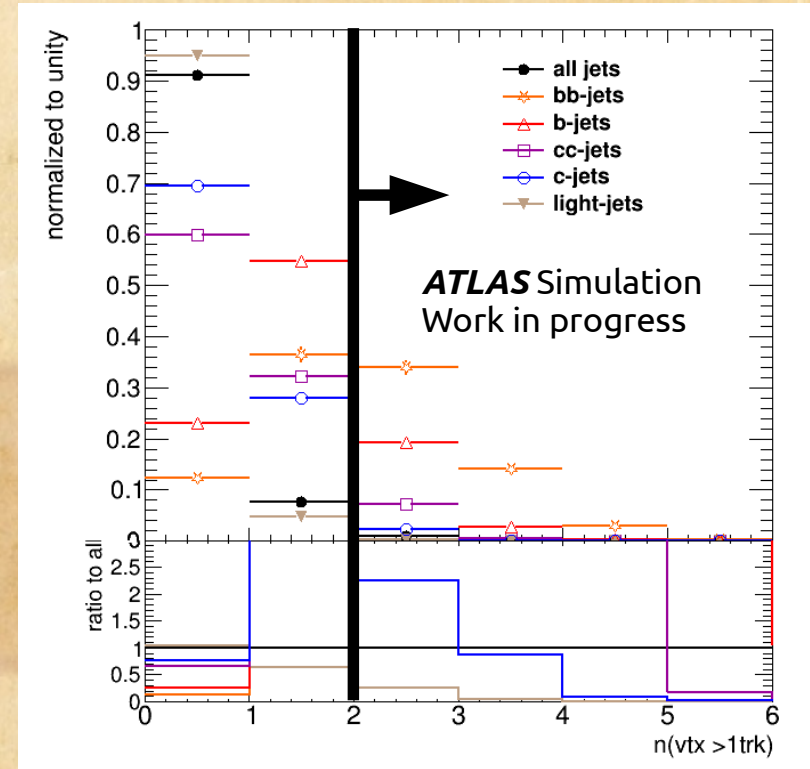
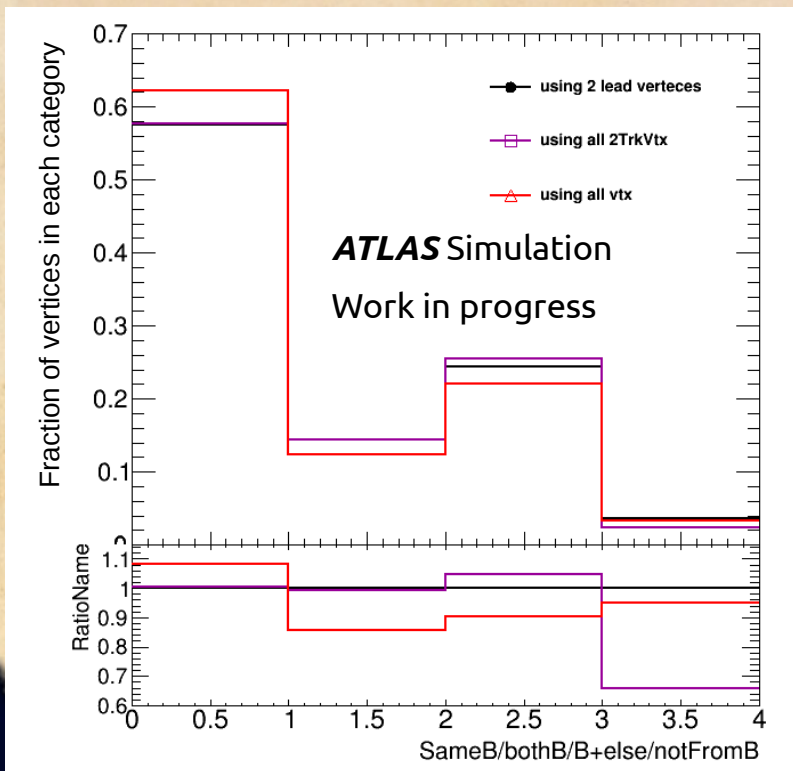
- Exploite les multiples vertex secondaires.
 - Théoriquement 4 : $2 \times (B \rightarrow D)$
- Utilise des arbres de décision boosté.
- Doit être optimisé pour le Run 2.

Multiples vertex secondaires

17

Nombre de vertex avec au moins 2 traces pour chaque saveur de jets.

- ~50% des bb-jets ont 2 vertex avec au moins 2 traces.
- Efficacité maximum pour MultiSVbb.

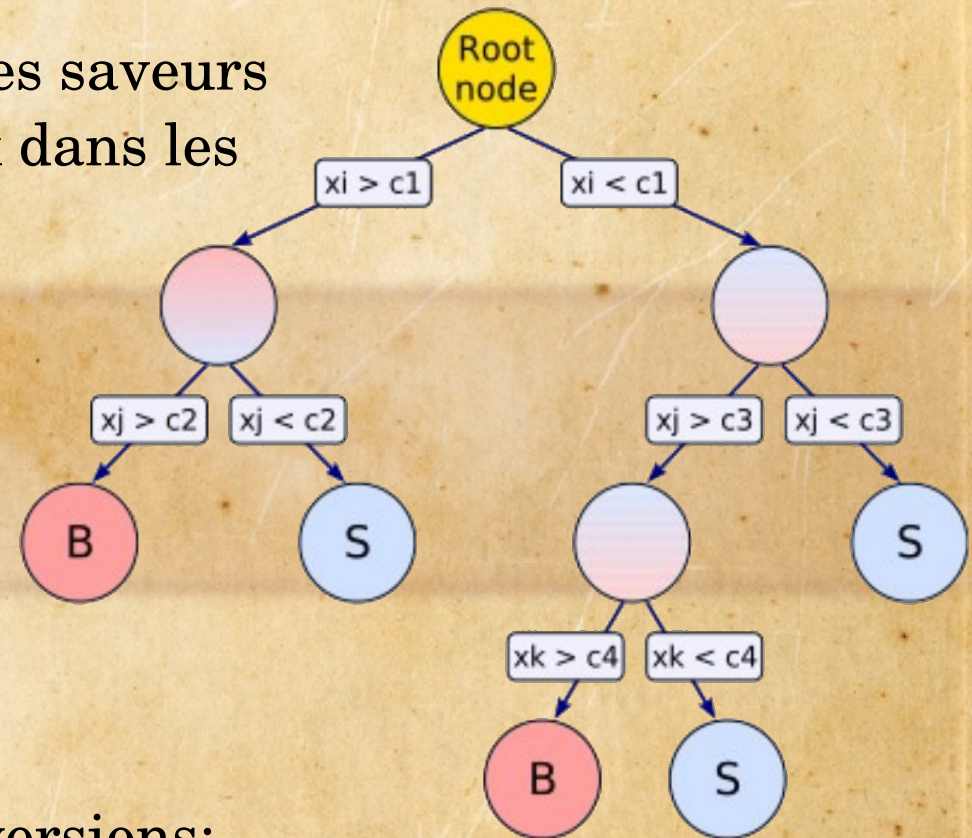
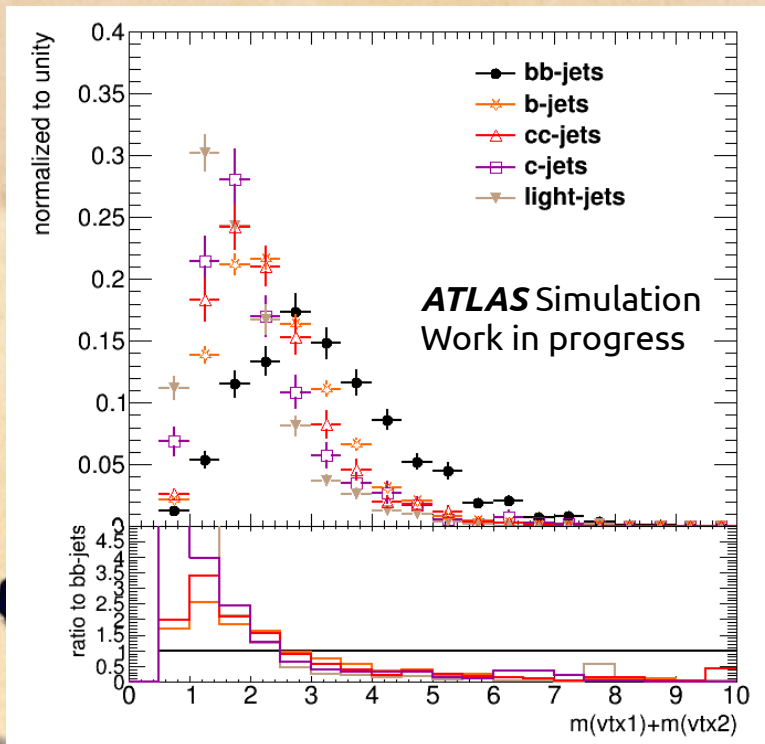


Pureté des vertex.

- ~58% des vertex n'ont que des traces du B.
- Large fraction de vertex avec des traces des 2 b-hadrons.
 - Diminution des performances.
- Faible fraction de vertex sans trace du B.

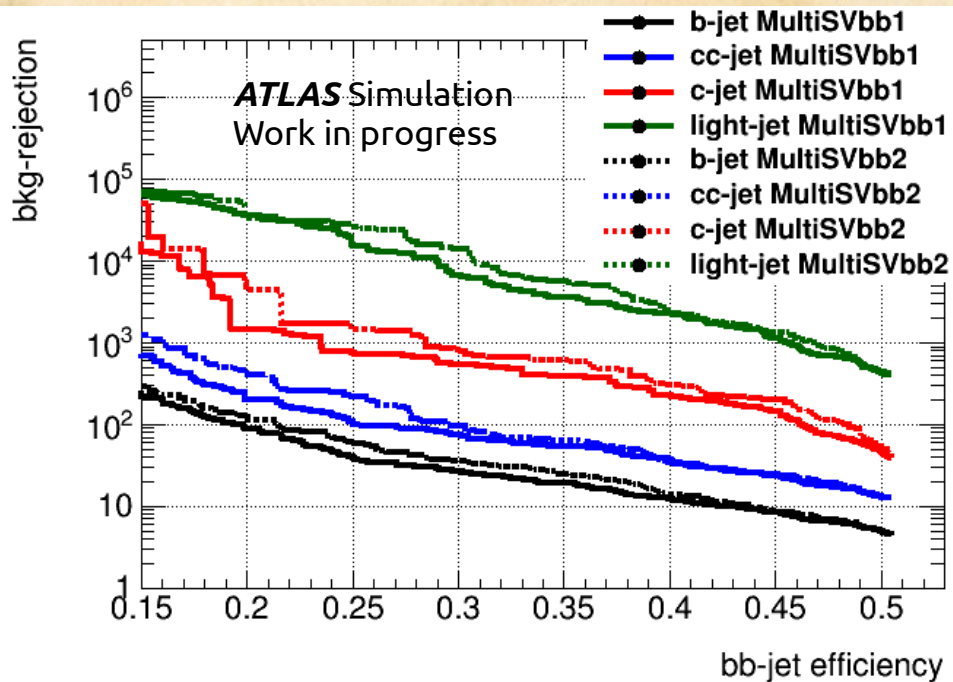
Objectif: séparer les bb-jets des autres saveurs

- Exploite les propriétés des vertex dans les jets.
- Coupure sur chaque variable.



Deux versions:

- **MultiSVbb1**: utilise uniquement les propriétés des vertex.
- **MultiSVbb2**: utilise des variables topologiques additionnelles.



Performances :

- Rejection = 1/efficacité
- Gain calculé entre la nouvelle configuration testée sur des simulations à 13TeV et l'ancienne configuration testée sur des simulations à 8TeV.

| @35% eff | MultiSVbb1 | MultiSVbb2 |
|----------------|-------------|-------------|
| b-rej/gain | 19 / +5% | 24 / +4% |
| cc-rej/gain | 55 / +57% | 63 / +66% |
| c-rej/gain | 390 / +100% | 600 / x2.5 |
| light-rej/gain | 3600 / +50% | 5500 / +70% |

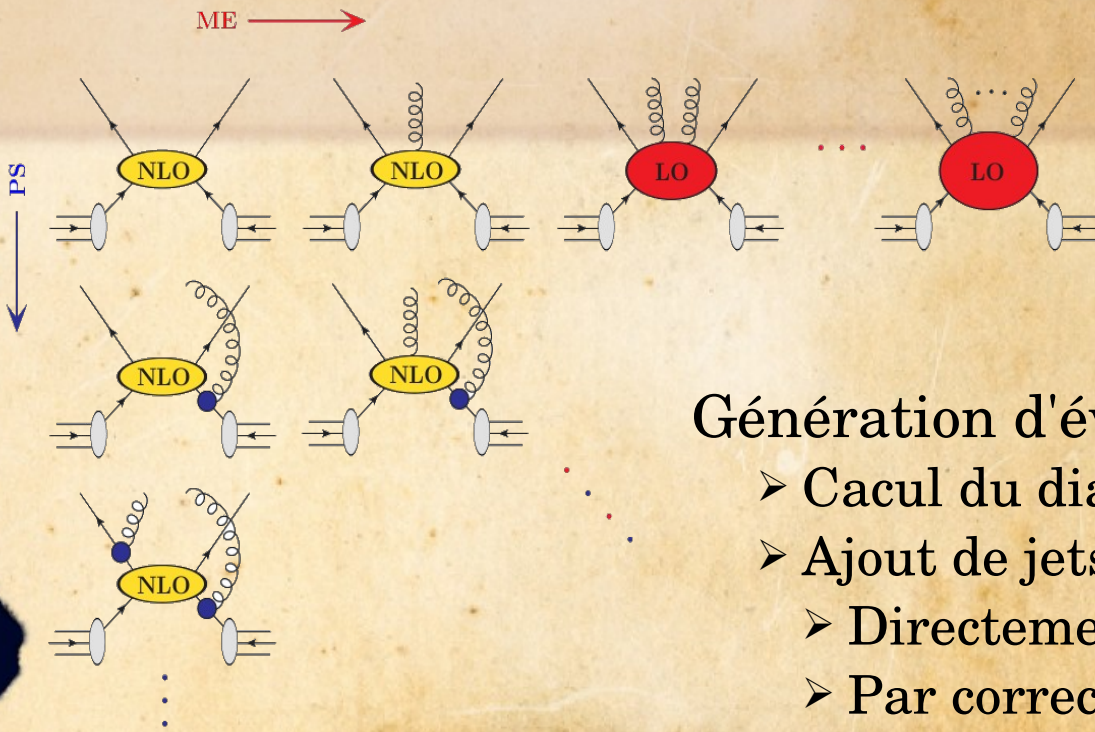
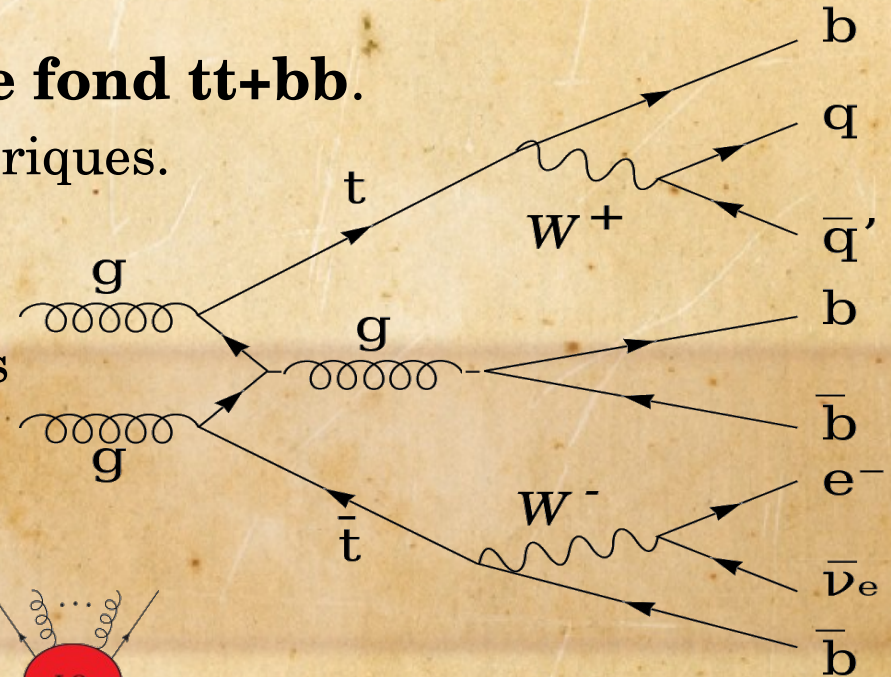
ATLAS Work in progress

Optimisation du software: nouveau format de lecture

- Plus rapide.
- Consomme moins de mémoire.

Motivation : contraindre le bruit de fond $tt+bb$.

- Difficile à contrôler, larges erreurs théoriques.
- Les nouveaux générateurs pourraient contraindre les incertitudes du $tt+bb$.
 - Calcul des productions de particules à des ordres supérieurs.



Génération d'évènement

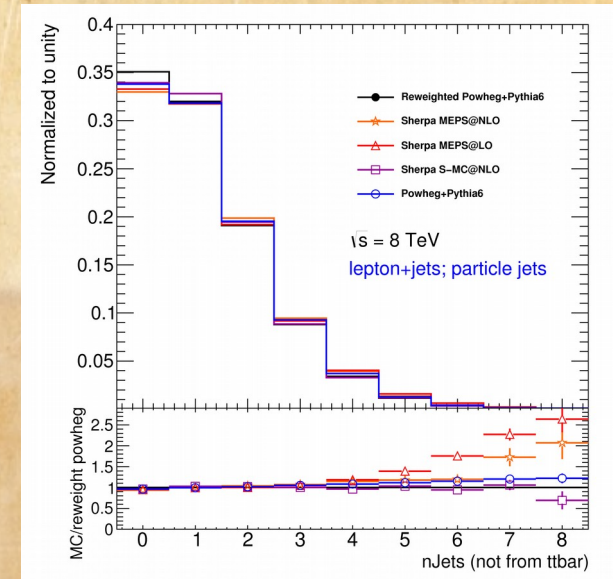
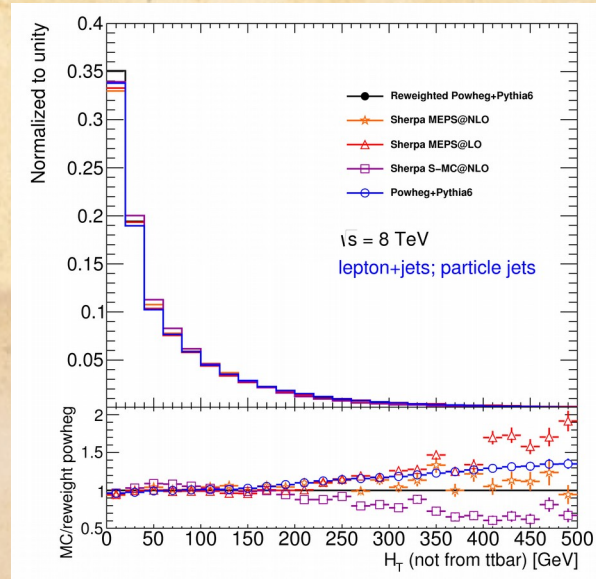
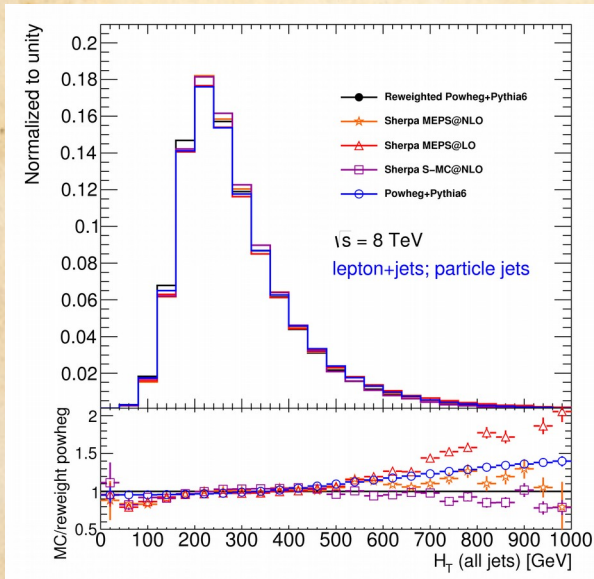
- Calcul du diagramme.
- Ajout de jets.
 - Directement dans le calcul du diagramme.
 - Par correction radiative.

- tt+bb difficile et long à générer.
 - Utilise ttbar pour les comparaisons.
- Comparaison de plusieurs algorithmes de génération:
 - Sherpa, Powheg+Pythia.
 - Différent nombre de jets supplémentaires.
 - Avec ou sans calcul au second ordre (NLO).
- Powheg+Pythia ttbar avec des poids:
 - Poids appliqués pour correspondre aux données à 7TeV.
- Générateur de pointe:
 - Sherpa **ME+PS@NLO**: ttbar + 0,1 jets NLO et +2,3,4 LO
- Reconstruction des quarks top à partir des jets associés aux particules de l'état final.

Structure des jets dans ttbar

22

ATL-PHYS-PUB-2014-022



$H_T = \sum p_T(\text{jets})$ pour tous les jets (gauche), que les jets additionnels (milieu).

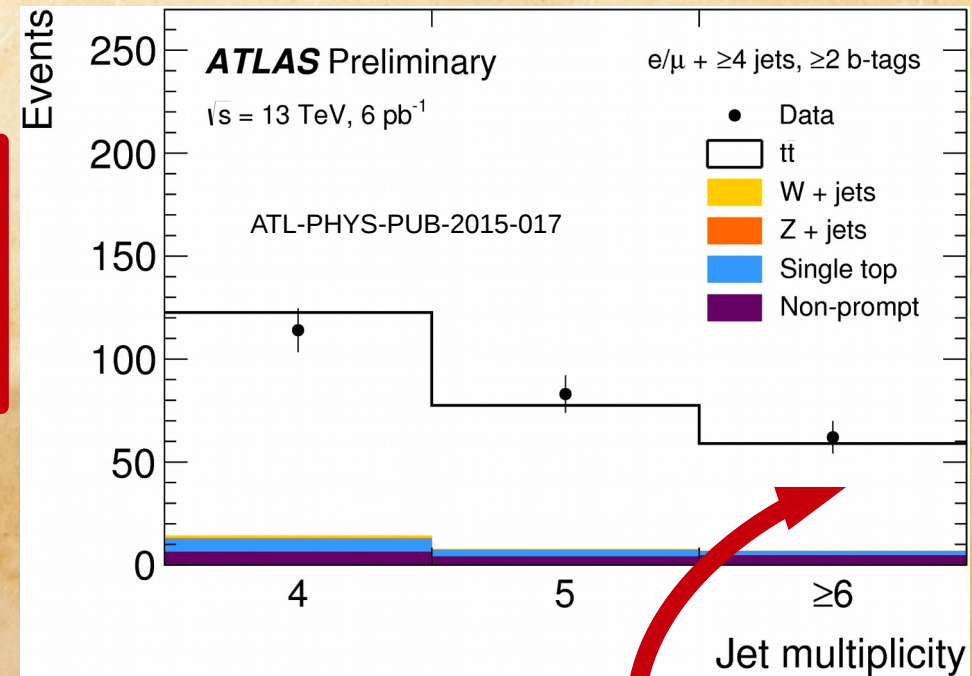
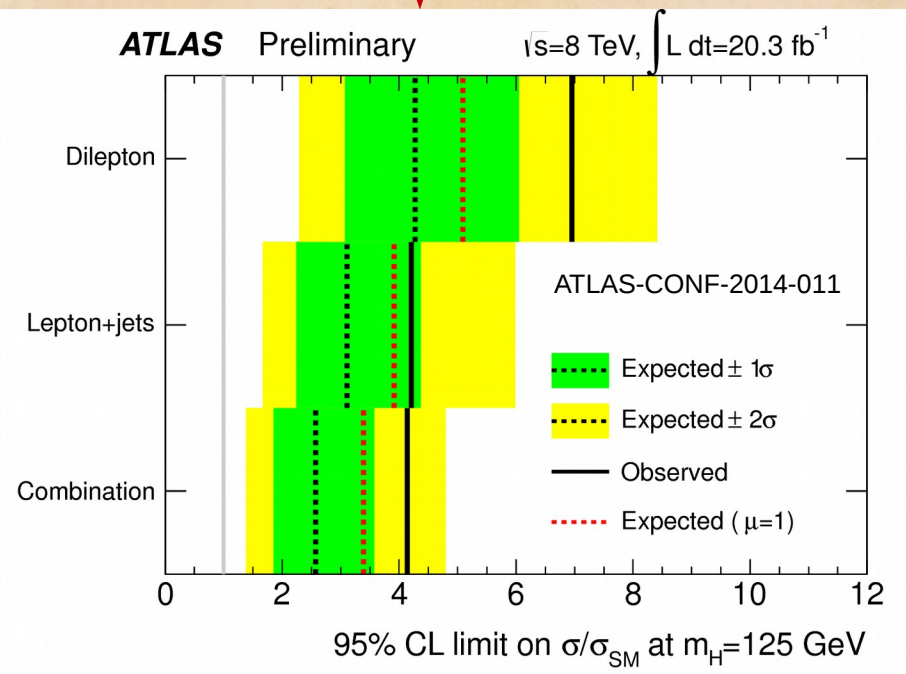
- Plus de jets dans Sherpa
 - Attendu: avec jets additionnels et calculs au NLO.
- Sherpa avec ME+PS: plus large H_T
- Sherpa NLO un peu plus petit H_T
- Sherpa ME+PS@NLO: semble être le plus proche de Powheg+Pythia6 avec poids

ttH(H->bb): résultat Run 1 et prévisions Run 2

23

Combinaison ttH(H->bb) avec les données à 8TeV:

➤ $\sigma/\sigma_{SM} < 4.1$ obs (2.6exp) @ 95% CL



- Signal ttH(H->bb) attendu principalement dans le bin 6 jets et 4 b-jets
- Sensitivité du Run 1 attendue pour ~ 10 fb⁻¹
- Prévu pour l'été prochain !

Le Run 2 a commencé. En plus de l'augmentation en énergie, les nouveaux algorithmes augmenteront la sensibilité du ttH.

- Études pour le b-tagging:
 - L'association des jets aux particules a été choisi grâce à mon étude.
 - Adapté au b-tagging.
 - Prometteur pour la compréhension des données.
 - bb-jets tagging.
 - Optimisation de l'algorithme: plus rapide et moins consommateur en mémoire.
 - Performances optimisées pour la configuration du Run 2.
- Études pour l'analyse ttH(H->bb):
 - Comparaison des générateurs de pointe pour la simulation.
 - Meilleure compréhension de la modélisation du bruit de fond.
 - Les nouveaux générateurs semblent plus compatibles avec la simulation matchant les données. Incertitudes systématiques pas encore prises en compte.

Backup

- Algorithme de reconstruction des jets:

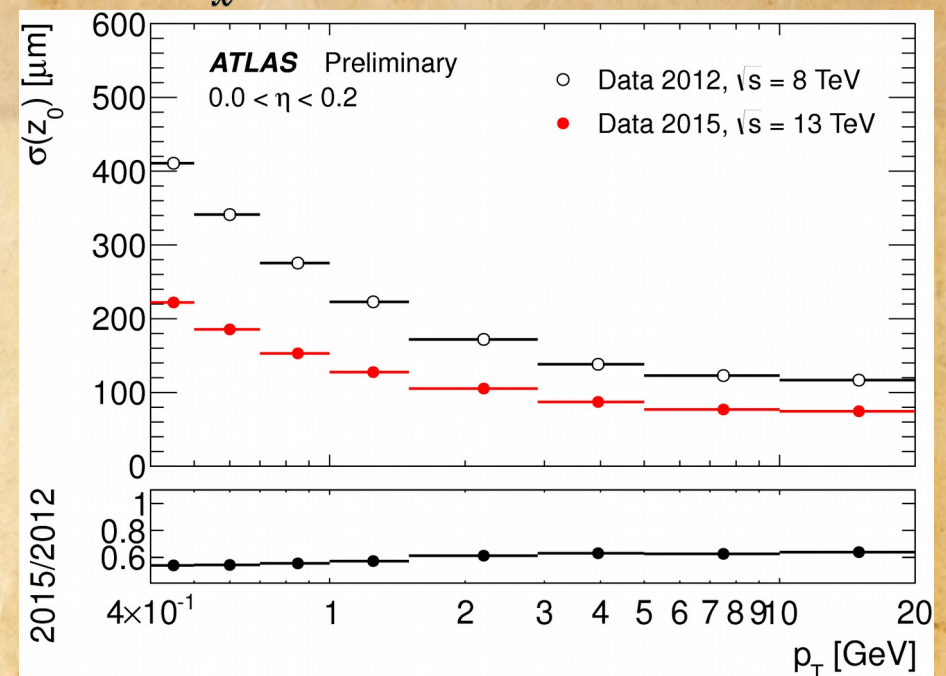
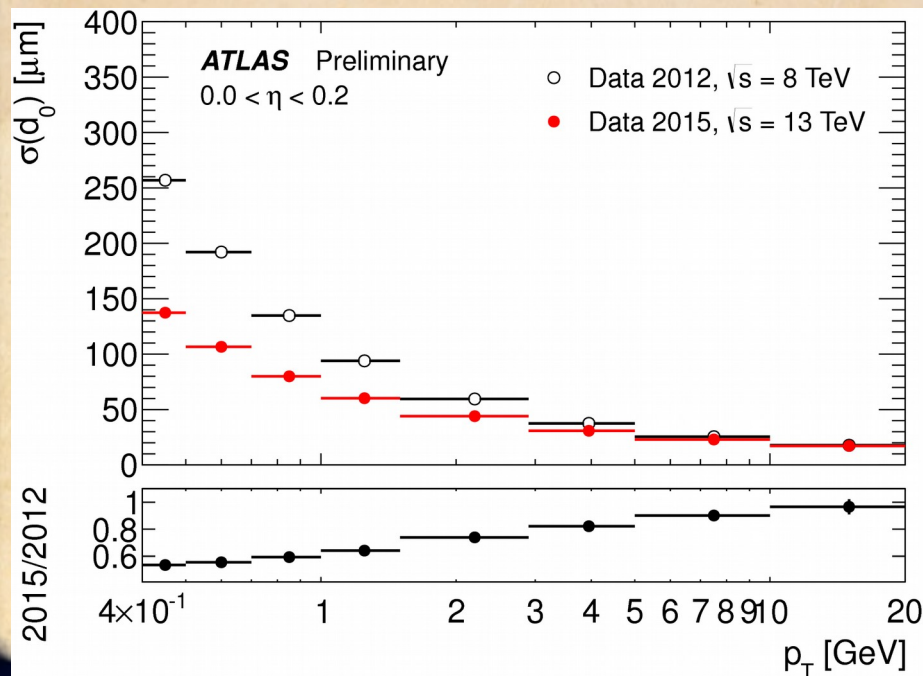
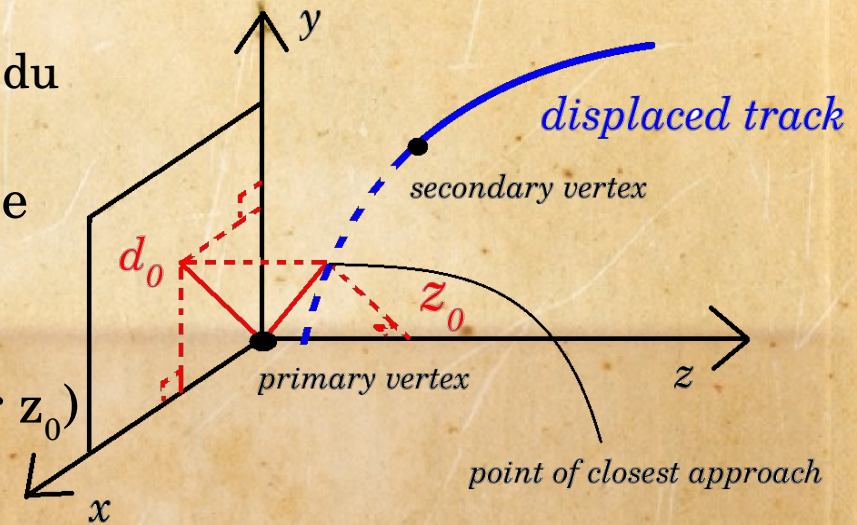
$$d_{ij} = \min(k_{ti}^{-2}, k_{tj}^{-2}) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2} \quad d_{i\text{Beam}} = k_{ti}^{-2}$$

- Distance entre 2 particules en $(1/p_T)^2$
- R : distance maximale pour que 2 particules soient dans le même jet.
- Ghost association:
 - Ajoute le b-hadron dans la liste des particules pour reconstruire les jets.
 - p_T du b-hadron mis très proche de 0 pour ne pas changer le jet.
 - Si la particule a été ajoutée au jet, elle y est associée.

Gain de l'IBL sur les paramètres d'impact

27

- z_0 : paramètre d'impact longitudinal
 - Coordonnée z du point de la trace le plus proche du vertex primaire.
- d_0 : paramètre d'impact dans le plan transverse
 - Distance au vertex primaire du point d'approche dans le plan (xy).
- $\sigma(d_0)$: d_0 divisé par l'erreur sur d_0 (idem pour z_0)



b-tagging: les algorithmes

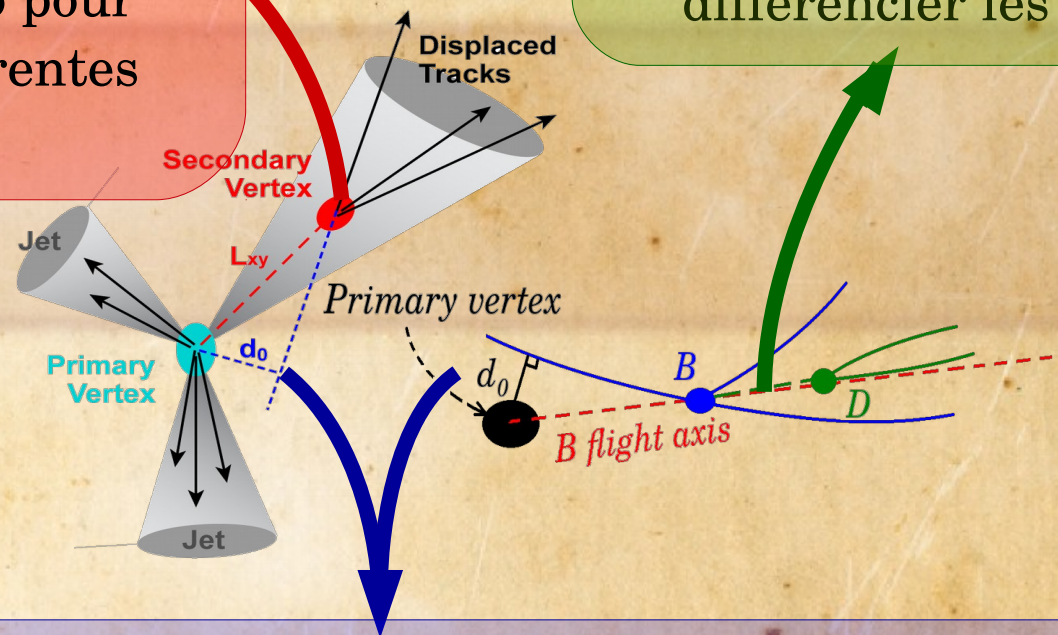
28

Algorithmes basés sur le vertex secondaire inclusif:

- Algorithme de reconstruction.
- Reconstitue un seul vertex.
- Log Likelihood Ratio pour discriminer les différents saveurs de jets.

Algorithme multi-vertex:

- Reconstruction de la chaîne PV->B->D.
- Réseau de neurones pour différencier les saveurs de jets.

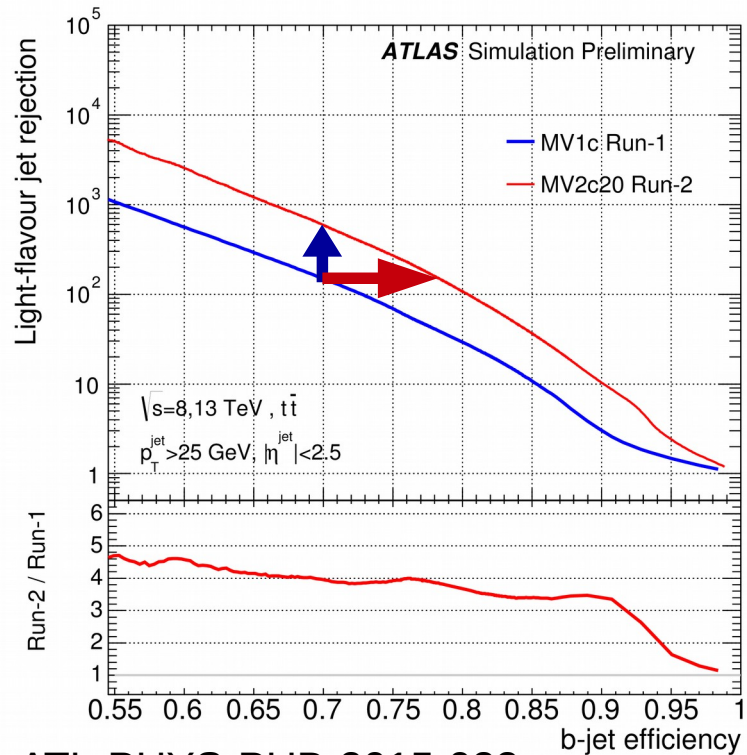


Algorithmes basés sur le paramètre d'impact:

- Significane avec signe du paramètre d'impact.
- Probabilité pour chaque saveur du jet.
- Log Likelihood Ratio par jet pour séparer les saveurs de jets.

b-tagging: du Run 1 au Run 2

29



ATL-PHYS-PUB-2015-022

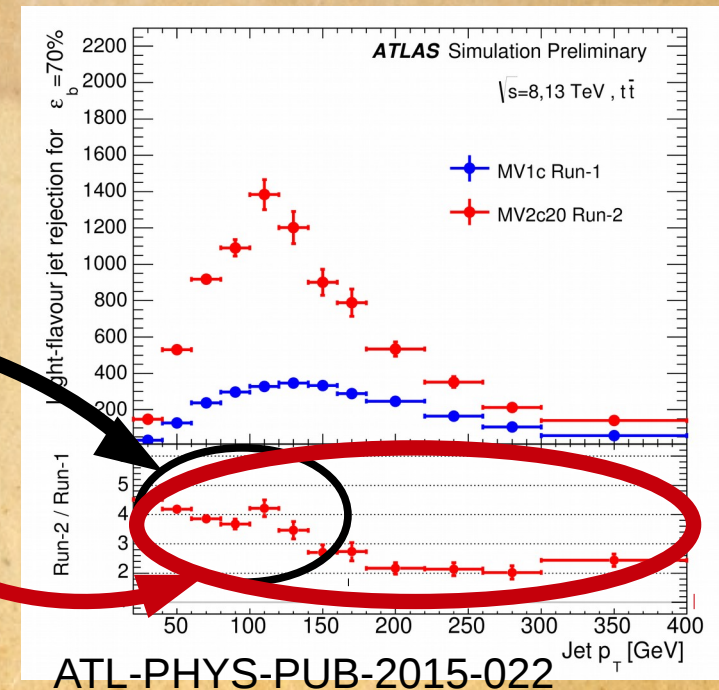
Comparaison Run 1 - Run 2 :

- Gain facteur 4 en rejection des lights-jets pour une efficacité de 70%.
- +10% d'efficacité relative des b-jets pour la rejection du Run 1.
- +40-50% d'acceptance au $ttH(H \rightarrow bb)$.

Gains dus à l'IBL principalement.

Gains dus aux nouveaux algorithmes.

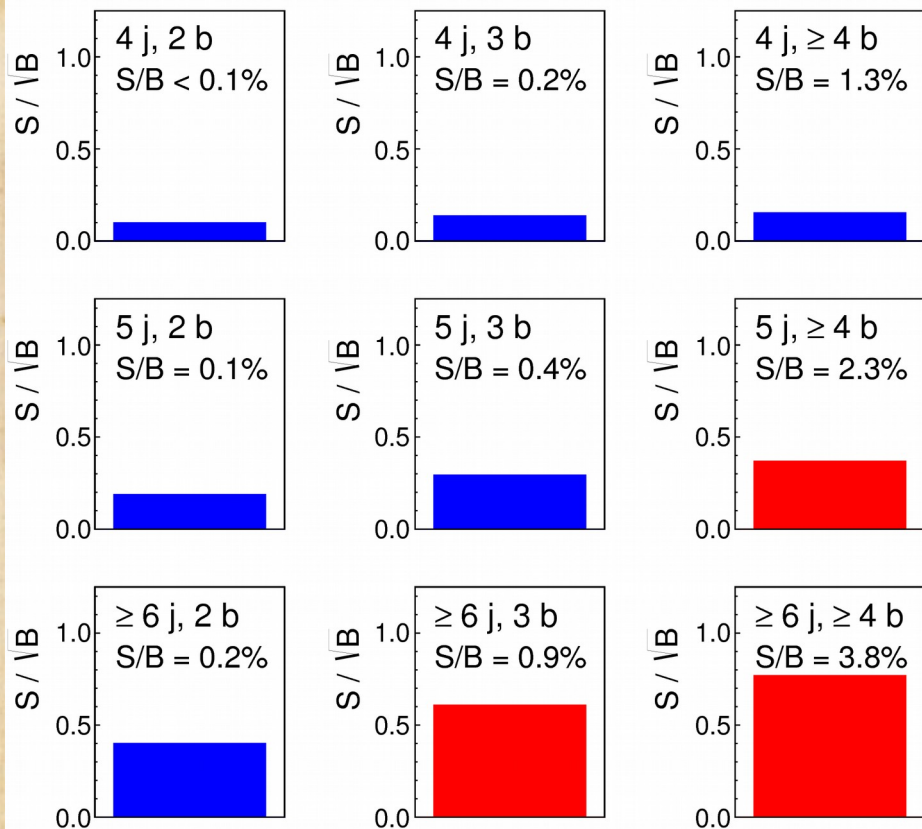
- Run 2: utilise directement les propriétés des vertex reconstruits.



Analyse ttH Run 1: regions et bruit de fond

ATLAS Preliminary Simulation

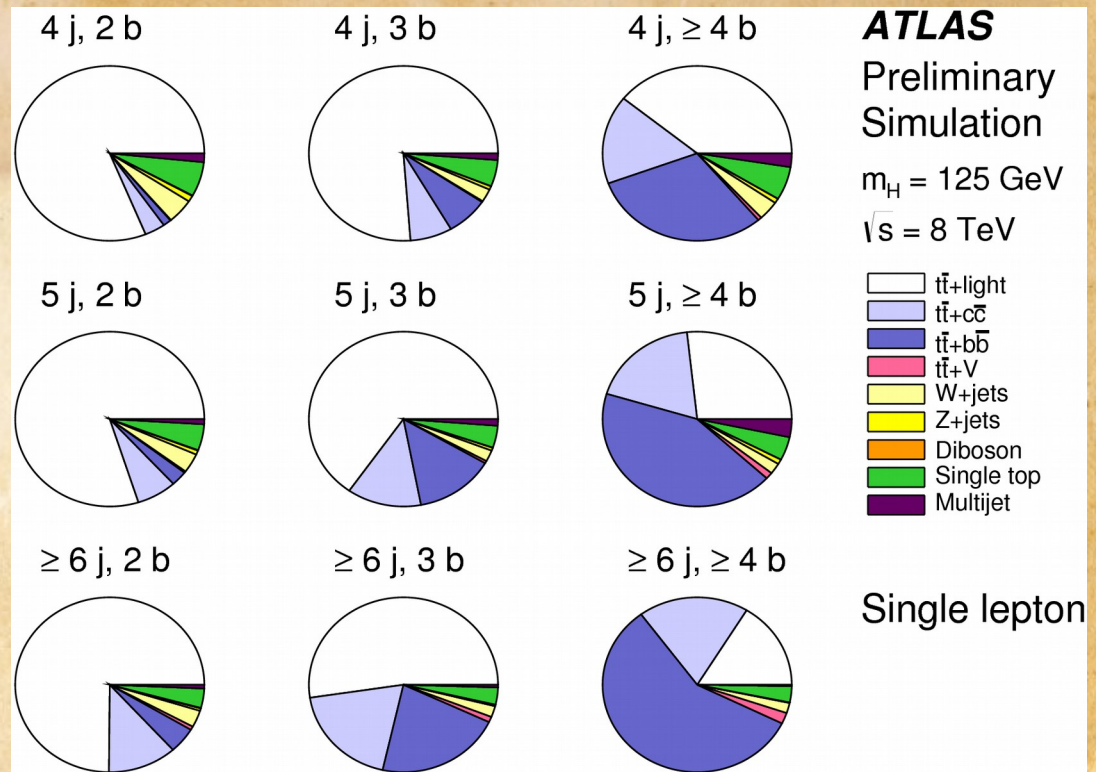
$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, $\int L dt = 20.3 \text{ fb}^{-1}$



Single lepton
 $m_H = 125 \text{ GeV}$

Regions de signal:

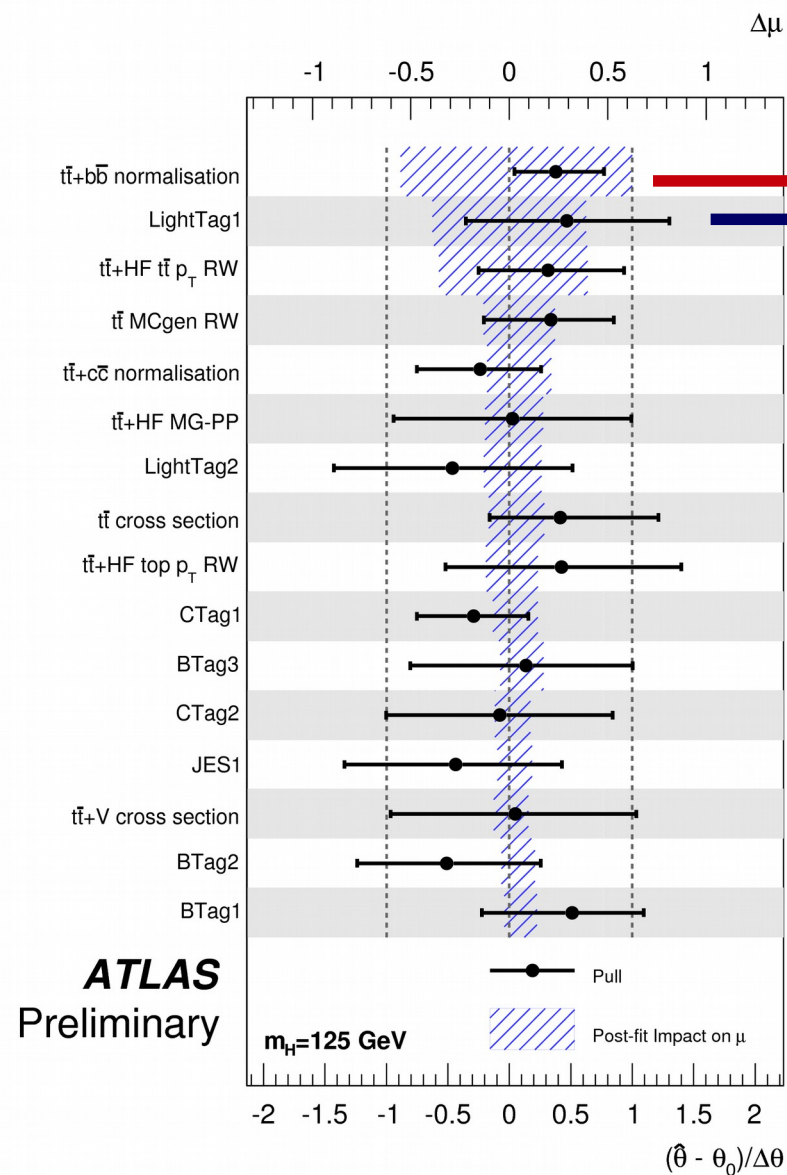
- S/B et S/√B grandes.
- Hautes multiplicités de jets et b-jets.
- Dominés par le bruit de fond tt+jets.
- Plus pure région de signal, ≥6 jets et ≥4 b-jets, dominée par tt+bb.



Analyse ttH Run 1: systematics

31

ATLAS-CONF-2014-011



Modélisation:

- Normalisation de tt+bb au calcul théorique au 3eme ordre.
- p $_T$ système ttbar dans tt+saveurs lourdes (c et b).
- Choix de la simulation ttbar.
- Sections efficaces du ttbar et du tt+V.

Objets physiques:

- Échelle d'énergie des jets.
- Identification des saveurs de jets.

ATLAS+CMS: désintégrations du Higgs

ATLAS-CONF-2015-044

| Channel | References for individual publications | | Signal strength [μ] | | Signal significance [σ] | |
|--------------------------------------|--|------|--|--|----------------------------------|--------------|
| | ATLAS | CMS | ATLAS | CMS | ATLAS | CMS |
| $H \rightarrow \gamma\gamma$ | [51] | [52] | $1.15^{+0.27}_{-0.25}$ ($+0.26$) (-0.24) | $1.12^{+0.25}_{-0.23}$ ($+0.24$) (-0.22) | 5.0 (4.6) | 5.6 (5.1) |
| $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ | [53] | [54] | $1.51^{+0.39}_{-0.34}$ ($+0.33$) (-0.27) | $1.05^{+0.32}_{-0.27}$ ($+0.31$) (-0.26) | 6.6 (5.5) | 7.0 (6.8) |
| $H \rightarrow WW$ | [55, 56] | [57] | $1.23^{+0.23}_{-0.21}$ ($+0.21$) (-0.20) | $0.91^{+0.24}_{-0.21}$ ($+0.23$) (-0.20) | 6.8 (5.8) | 4.8 (5.6) |
| $H \rightarrow \tau\tau$ | [58] | [59] | $1.41^{+0.40}_{-0.35}$ ($+0.37$) (-0.33) | $0.89^{+0.31}_{-0.28}$ ($+0.31$) (-0.29) | 4.4 (3.3) | 3.4 (3.7) |
| $H \rightarrow bb$ | [38] | [39] | $0.62^{+0.37}_{-0.36}$ ($+0.39$) (-0.37) | $0.81^{+0.45}_{-0.42}$ ($+0.45$) (-0.43) | 1.7 (2.7) | 2.0 (2.5) |
| $H \rightarrow \mu\mu$ | [60] | [61] | -0.7 ± 3.6 (± 3.6) | 0.8 ± 3.5 (± 3.5) | | |
| ttH production | [28, 62, 63] | [65] | $1.9^{+0.8}_{-0.7}$ ($+0.72$) (-0.66) | $2.9^{+1.0}_{-0.9}$ ($+0.88$) (-0.80) | 2.7 (1.6) | 3.6 (1.3) |

ATLAS+CMS: production du Higgs

ATLAS-CONF-2015-044

| Production process | Measured significance (σ) | Expected significance (σ) |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| VBF | 5.4 | 4.7 |
| WH | 2.4 | 2.7 |
| ZH | 2.3 | 2.9 |
| VH | 3.5 | 4.2 |
| ttH | 4.4 | 2.0 |
| Decay channel | | |
| $H \rightarrow \tau\tau$ | 5.5 | 5.0 |
| $H \rightarrow bb$ | 2.6 | 3.7 |

