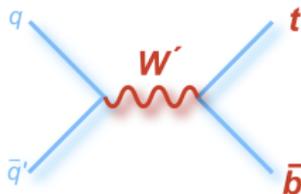


Recherche de nouveaux bosons de jauge lourds W' avec le détecteur ATLAS au LHC



Geoffrey GILLES

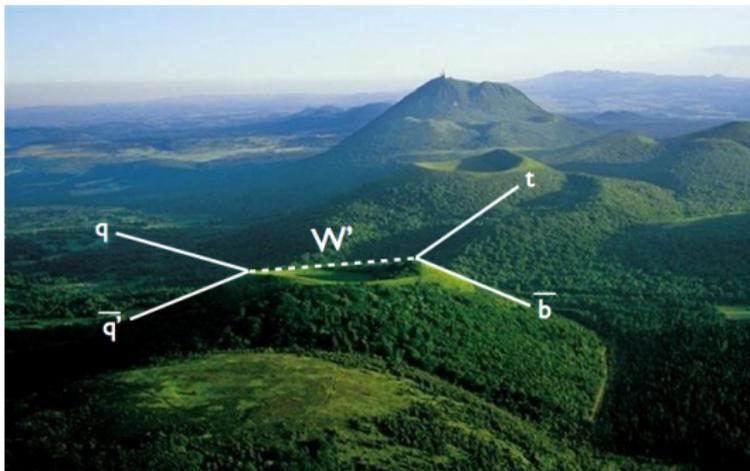
Université Blaise Pascal - LPC - CNRS/IN2P3

4 décembre 2013



Introduction

- Thèse au Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand
 - Dans l'équipe ATLAS, sous la direction de Julien Donini



Sujet : Recherche de Nouvelle Physique avec le Détecteur ATLAS au LHC
Étude des résonances lourdes W' dans la physique du quark top

Autres Activités : Simulation du Détecteur ATLAS

Sommaire

- 1 Motivations
- 2 Contexte expérimental
- 3 Stratégie de recherche
- 4 Analyse des données d'ATLAS
- 5 Conclusions et perspectives

Motivations

Une Physique Au-Delà du Model Standard

- Le Model Standard (MS) : Un succès jusqu'à maintenant
 - Cependant, des limites théoriques et expérimentales
Gravitation - Nombre de paramètres libres - Problème de Hierarchie - Matière Noire - Masse des Neutrinos - ...

→ Approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale

- Nombreux développements théoriques au-delà du MS ...
 - Extensions à de nouvelles symétries
 - Dimensionnalité de l'espace-temps

→ Nouvelles particules, Nouveaux couplages

Motive la recherche dite de
"Nouvelle Physique"



Le W' , un nouveau boson de jauge lourd chargé

- Nouvelles interactions au-delà du MS
 - Nouvelles interactions = Nouveaux médiateurs!
 - Prédiction de nouveaux bosons de jauge lourds chargés $\rightarrow W'$

Le W' , un nouveau boson de jauge lourd chargé

- Nouvelles interactions au-delà du MS
 - Nouvelles interactions = Nouveaux médiateurs!
 - Prédiction de nouveaux bosons de jauge lourds chargés $\rightarrow W'$

Modèles de Symétrie Droite/Gauche

- Restorer la symétrie de Parité à haute énergie
- Ajout d'un secteur droit au MS - introduction d'un neutrino droit

Boson W' \rightarrow homologue massif de chiralité droite du boson W

Le W' , un nouveau boson de jauge lourd chargé

- Nouvelles interactions au-delà du MS
 - Nouvelles interactions = Nouveaux médiateurs!
 - Prédiction de nouveaux bosons de jauge lourds chargés $\rightarrow W'$

Modèles de Symétrie Droite/Gauche

- Restorer la symétrie de Parité à haute énergie
- Ajout d'un secteur droit au MS - introduction d'un neutrino droit

Boson W' \rightarrow homologue massif de chiralité droite du boson W

Modèles des Extra-Dimensions Universelles de Kaluza-Klein

- Initialement introduit pour décrire la gravitation de façon unifiée
- Ajout d'une ou plusieurs dimension d'espace

Boson W' \rightarrow 1^{ère} excitation de Kaluza-Klein du boson W

Le W' , un nouveau boson de jauge lourd chargé

- Nouvelles interactions au-delà du MS
 - Nouvelles interactions = Nouveaux médiateurs!
 - Prédiction de nouveaux bosons de jauge lourds chargés $\rightarrow W'$

Modèles de Symétrie Droite/Gauche

- Restorer la symétrie de Parité à haute énergie
- Ajout d'un secteur droit au MS - introduction d'un neutrino droit

Boson W' \rightarrow homologue massif de chiralité droite du boson W

Modèles des Extra-Dimensions Universelles de Kaluza-Klein

- Initialement introduit pour décrire la gravitation de façon unifiée
- Ajout d'une ou plusieurs dimension d'espace

Boson W' \rightarrow 1^{ère} excitation de Kaluza-Klein du boson W

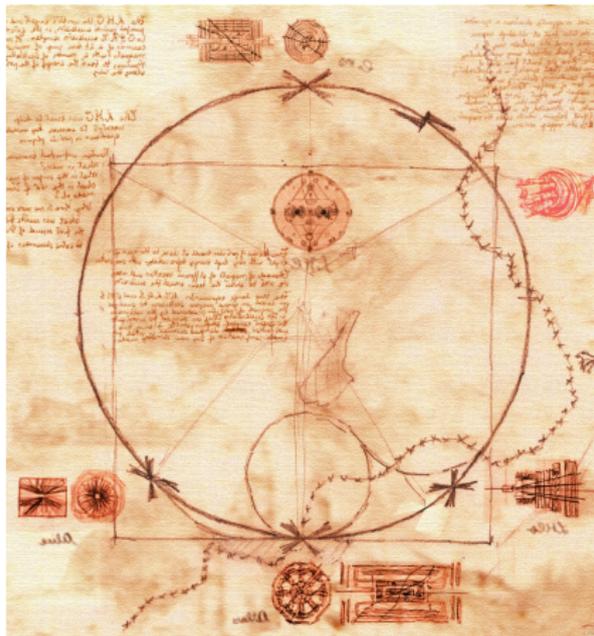
Autres Modèles

- "Little Higgs", Top Color, Top Flavor, etc.

Contexte Expérimental

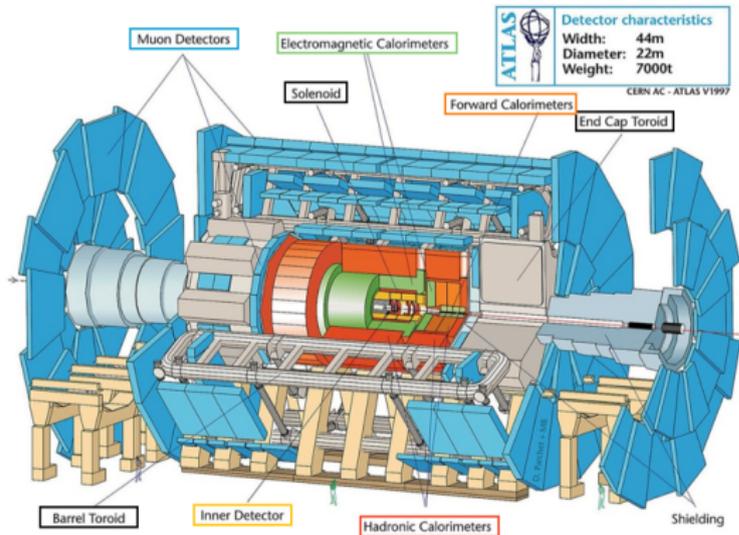
Le LHC

- Accélérateur/Collisionneur de particule le plus puissant du monde
- Situé au CERN, près de Genève
 - 27 km de circonférence
 - 100 m de profondeur
- Collisions à haute énergie
 - Proton-proton (ions lourds)
 - $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV} \rightarrow 14 \text{ TeV}$
 - Accès à de nouvelles particules massives
- Très haute fréquence de collision
 - Étudier des phénomènes rares

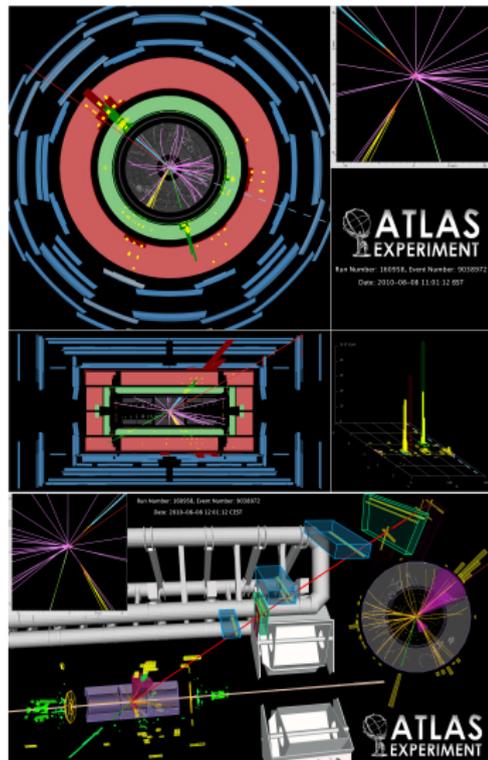


ATLAS une fenêtre sur la Nouvelle Physique

- A Toroidal Lhc ApparatuS



- Collaboration internationale
3500 membres, 177 instituts, 38 pays



Stratégie de Recherche

Recherche directe et approche effective

- Recherche directe dans une approche la plus générale
 - S'appuyer sur un modèle effectif!

Recherche directe et approche effective

- Recherche directe dans une approche la plus générale
 - S'appuyer sur un modèle effectif!

Lagrangien Effectif

$$\mathcal{L} = \frac{V'_{ij}}{2\sqrt{2}} \bar{f}_i \gamma_\mu (g'_{i,j}{}^R (1 + \gamma^5) + g'_{i,j}{}^L (1 - \gamma^5)) W'^\mu f_j + h.c.$$

avec $g'_{i,j}{}^{R(L)}$ les constantes de couplage du boson W' avec les fermions f_i et f_j et V'_{ij} une matrice de type CKM pour les changements de saveur de quarks

- Structure chirale inspirée du boson W
- Différents scénarios
 - Bosons W' de chiralité droite ou gauche

Choix d'une signature expérimentale pertinente

Choix d'une signature expérimentale pertinente

- Fort couplage attendu avec la 3^{ème} génération de quarks

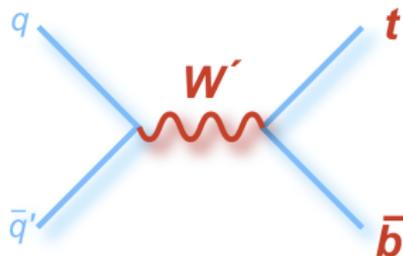
Choix d'une signature expérimentale pertinente

- Fort couplage attendu avec la 3^{ème} génération de quarks

Le couplage $W' \rightarrow tb$

- Permet d'identifier et reconstruire le quark top
- Une signature $W' \rightarrow tb$ ouvre des canaux inaccessibles aux recherches "leptoniques"

Ex : - Sensible aux modèles leptophobiques
- Hypothèses sur un neutrino droit



Analyse des Données d'ATLAS

avec $\int L dt = 14.3 fb^{-1}$

enregistrés en 2012 à $\sqrt{s} = 8$ TeV

Stratégie d'Analyse

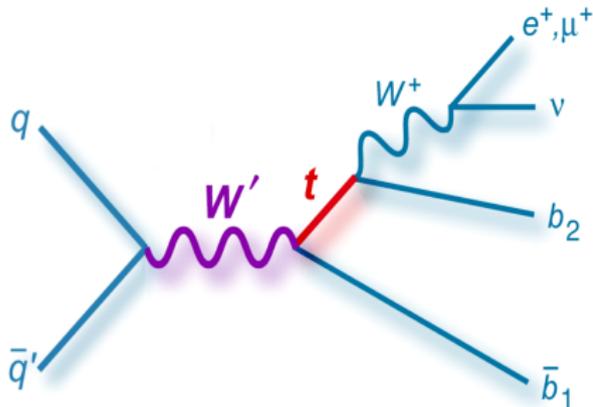
Stratégie d'Analyse

- 1 Simulation
- 2 Critères de sélection
- 3 Estimation du bruit de fond
- 4 Incertitudes systématiques
- 5 Analyse multivariée par arbres de décision boostés
- 6 Rechercher un excès de signal dans les données
- ? Poser des limites

Critères de Sélection

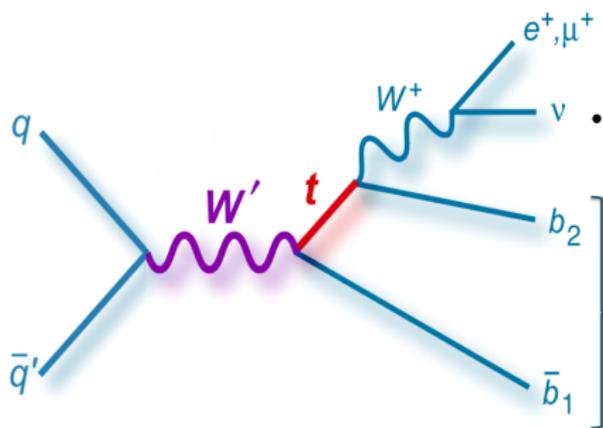
Critères de Sélection

- Recherche dans un état final semi-leptonique $W' \rightarrow tb \rightarrow bbl\nu$
 - Signature expérimentale plus propre
 - Réduction du bruit de fond



Critères de Sélection

- Recherche dans un état final semi-leptonique $W' \rightarrow tb \rightarrow bbl\nu$
 - Signature expérimentale plus propre
 - Réduction du bruit de fond



- Lepton : Un électron ou muon isolé avec $p_T > 30$ GeV
- Energie Manquante : $E_T^{\text{miss}} > 35$ GeV

- Jets : 2 ou 3 anti- k_T jets avec $p_T > 30$ GeV, dont 2 identifiés comme b-jets.

- Sélections Additionnelles : - $E_T^{\text{miss}} + m_T(W) > 60$ GeV.
- Définir **région de signal** : $m(tb) > 270$ GeV.

Caractérisation des bruits de fond

Caractérisation des bruits de fond

- Deux principaux bruits de fond :

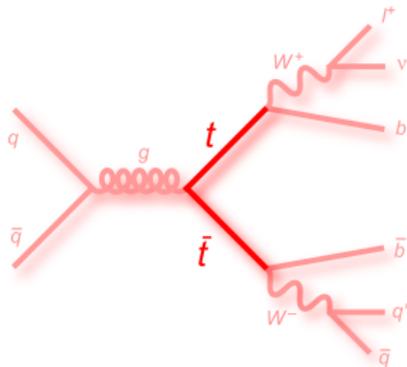
Paires de quark top ($t\bar{t}$)

W+jets

Caractérisation des bruits de fond

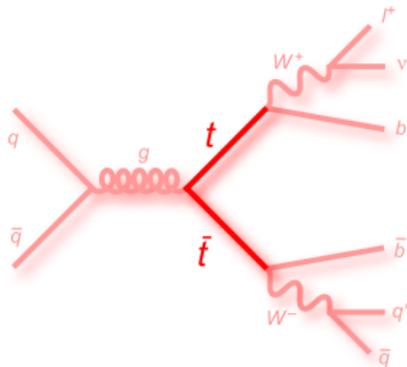
- Deux principaux bruits de fond :
Paires de quark top ($t\bar{t}$)

W+jets

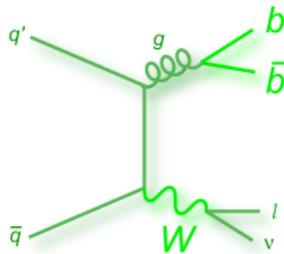


Caractérisation des bruits de fond

- Deux principaux bruits de fond :
Paires de quark top ($t\bar{t}$)

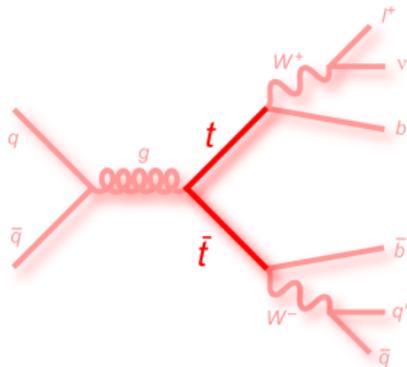


W +jets

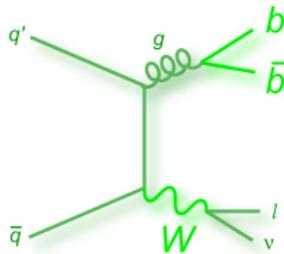


Caractérisation des bruits de fond

- Deux principaux bruits de fond :
Paires de quark top ($t\bar{t}$)



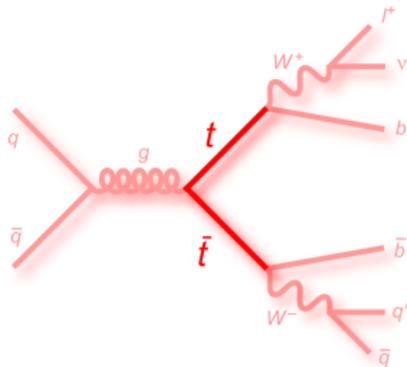
W+jets



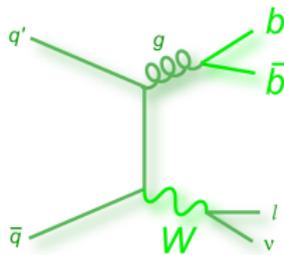
- Autres bruits de fond mineurs :
 - Production quark top célibataire, Dibosons, Z+jets

Caractérisation des bruits de fond

- Deux principaux bruits de fond :
Paires de quark top ($t\bar{t}$)

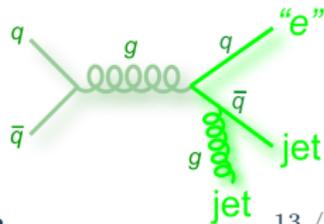


W+jets



- Autres bruits de fond mineurs :
 - Production quark top célibataire, Dibosons, Z+jets

- Bruit de fond instrumental :
 - Provient de la production multijet
 - Où un jet est identifié comme un lepton



Estimation des bruits de fond

Estimation des bruits de fond

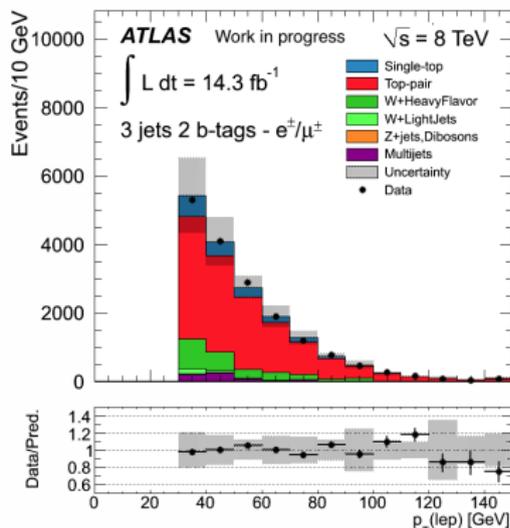
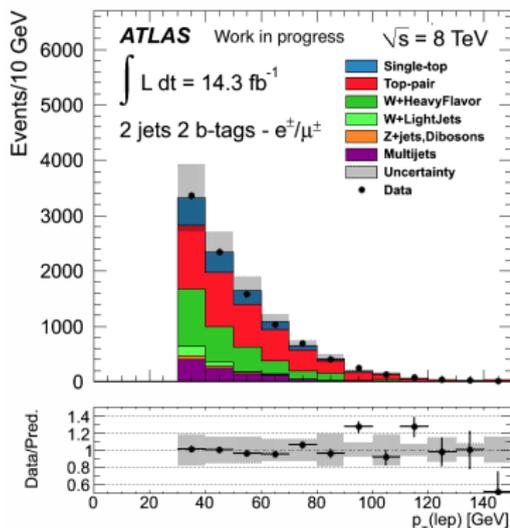
- Bruits fond Multijet et W +jets déterminés grâce aux données
 - Distributions cinématiques modelisées à partir de simulation MC
 - Normalisés aux données dans des régions de contrôle

Estimation des bruits de fond

- Bruits fond Multijet et W +jets déterminés grâce aux données
 - Distributions cinématiques modélisées à partir de simulation MC
 - Normalisés aux données dans des régions de contrôle
- Tous les autres bruits de fond modélisés par simulations MC et normalisés à leur prédiction théorique

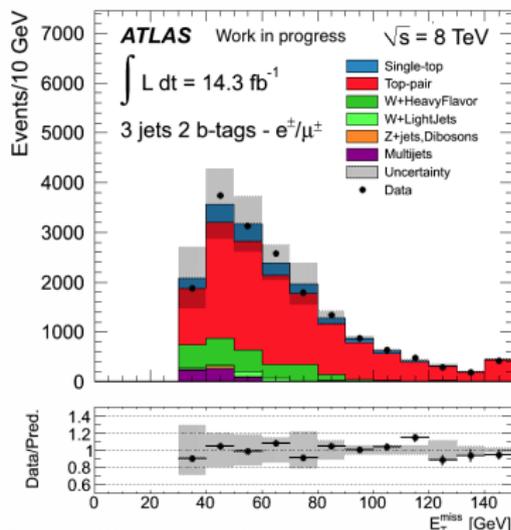
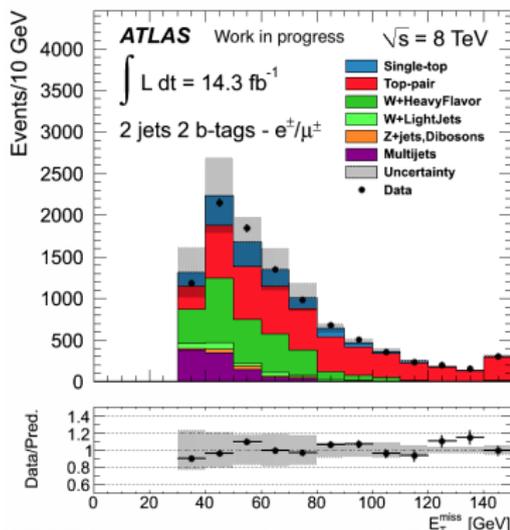
Estimation des bruits de fond

- Bruits fond Multijet et W +jets déterminés grâce aux données
 - Distributions cinématiques modélisées à partir de simulation MC
 - Normalisés aux données dans des régions de contrôle
- Tous les autres bruits de fond modélisés par simulations MC et normalisés à leur prédiction théorique



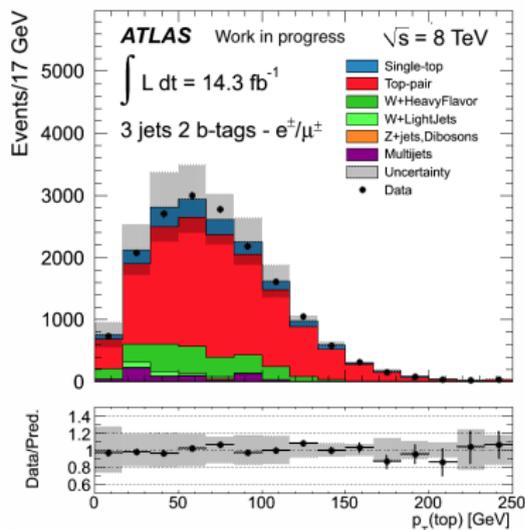
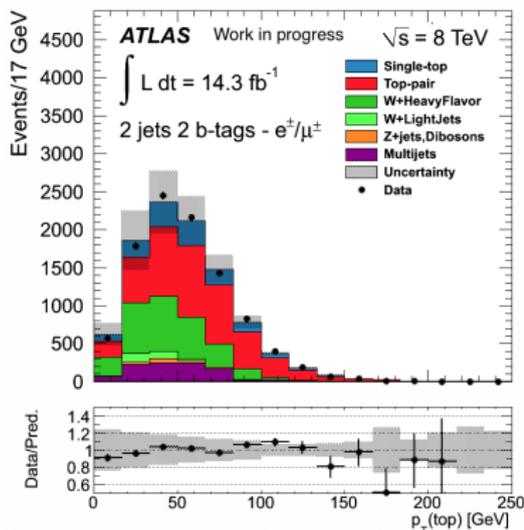
Estimation des bruits de fond

- Bruits fond Multijet et W +jets déterminés grâce aux données
 - Distributions cinématiques modélisées à partir de simulation MC
 - Normalisés aux données dans des régions de contrôle
- Tous les autres bruits de fond modélisés par simulations MC et normalisés à leur prédiction théorique



Estimation des bruits de fond

- Bruits fond Multijet et W +jets déterminés grâce aux données
 - Distributions cinématiques modélisées à partir de simulation MC
 - Normalisés aux données dans des régions de contrôle
- Tous les autres bruits de fond modélisés par simulations MC et normalisés à leur prédiction théorique



Nombre d'événements attendus dans la région de signal

	2-jet 2-tag channel	3-jet 2-tag channel
W'_R (0.5 TeV)	11800 ± 2700	8200 ± 1800
W'_R (1.0 TeV)	600 ± 150	660 ± 160
W'_R (1.5 TeV)	42 ± 11	56 ± 13
W'_R (2.0 TeV)	4.2 ± 1.1	6.2 ± 1.5
W'_R (2.5 TeV)	0.69 ± 0.17	0.87 ± 0.20
W'_R (3.0 TeV)	0.22 ± 0.06	0.25 ± 0.06
$t\bar{t}$	8300 ± 2100	22000 ± 5000
Single-top t -channel	1000 ± 270	1400 ± 400
Single-top Wt	400 ± 80	880 ± 170
Single-top s -channel	310 ± 90	160 ± 50
W +jets	3600 ± 1900	4000 ± 5000
Diboson	130 ± 60	80 ± 40
Z +jets	26 ± 20	42 ± 30
Multijets	700 ± 400	410 ± 210
Total bkg.	14400 ± 3100	29000 ± 7000

Nombre d'événements attendus dans la région de signal

	2-jet 2-tag channel	3-jet 2-tag channel
W'_R (0.5 TeV)	11800 ± 2700	8200 ± 1800
W'_R (1.0 TeV)	600 ± 150	660 ± 160
W'_R (1.5 TeV)	42 ± 11	56 ± 13
W'_R (2.0 TeV)	4.2 ± 1.1	6.2 ± 1.5
W'_R (2.5 TeV)	0.69 ± 0.17	0.87 ± 0.20
W'_R (3.0 TeV)	0.22 ± 0.06	0.25 ± 0.06
$t\bar{t}$	8300 ± 2100	22000 ± 5000
Single-top t -channel	1000 ± 270	1400 ± 400
Single-top Wt	400 ± 80	880 ± 170
Single-top s -channel	310 ± 90	160 ± 50
W +jets	3600 ± 1900	4000 ± 5000
Diboson	130 ± 60	80 ± 40
Z +jets	26 ± 20	42 ± 30
Multijets	700 ± 400	410 ± 210
Total bkg.	14400 ± 3100	29000 ± 7000

- Nécessité de rejeter un important bruit de fond
 - Utilisation de techniques multivariées pour séparer signal/bruit de fond

Analyse Multivariée par Arbre de Décision Boostés

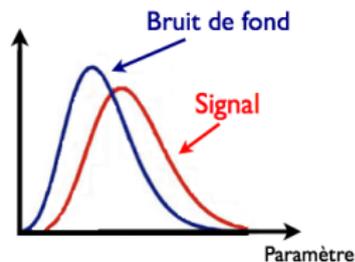
Analyse Multivariée par Arbre de Décision Boostés

- Discriminer signal et bruits de fond
 - Utiliser le pouvoir discriminant combiné de plusieurs variables cinématiques

Analyse Multivariée par Arbre de Décision Boostés

- Discriminer signal et bruits de fond
 - Utiliser le pouvoir discriminant combiné de plusieurs variables cinématiques

Variable Discriminante



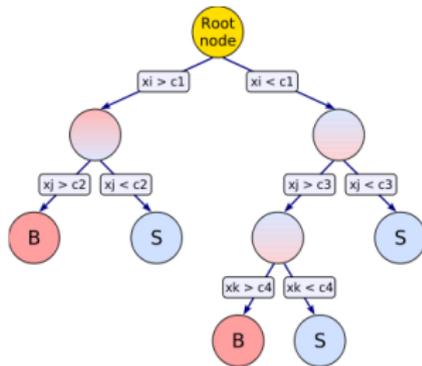
Analyse Multivariée par Arbre de Décision Boostés

- Discriminer signal et bruits de fond
 - Utiliser le pouvoir discriminant combiné de plusieurs variables cinématiques
- Arbres de Décision Boostés (BDT)
 - Technique discriminante prédictive
 - Défini groupe d'appartenance d'un individu (Signal/Bruit de fond)
 - Défini une fonction de classement
 - A partir de descripteurs (Variables discriminantes)
 - Retourne un poids pour chaque événement entre -1 and 1

2 étapes : Apprentissage/test et Application

Analyse Multivariée par Arbre de Décision Boostés

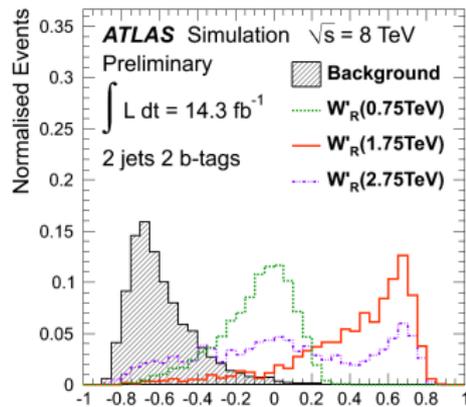
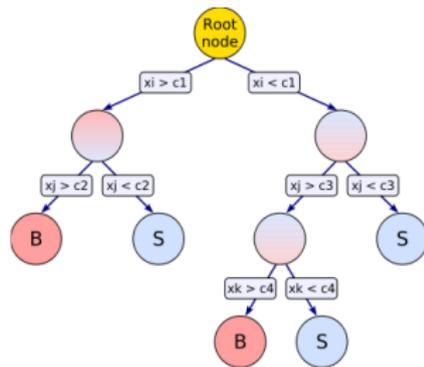
- Discriminer signal et bruits de fond
 - Utiliser le pouvoir discriminant combiné de plusieurs variables cinématiques
- Arbres de Décision Boostés (BDT)
 - Technique discriminante prédictive
 - Défini groupe d'appartenance d'un individu (Signal/Bruit de fond)
 - Défini une fonction de classement
 - A partir de descripteurs (Variables discriminantes)
 - Retourne un poids pour chaque événement entre -1 and 1



2 étapes : Apprentissage/test et Application

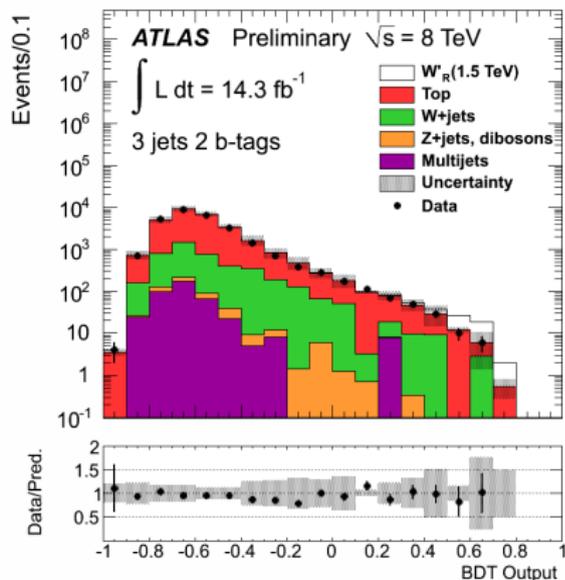
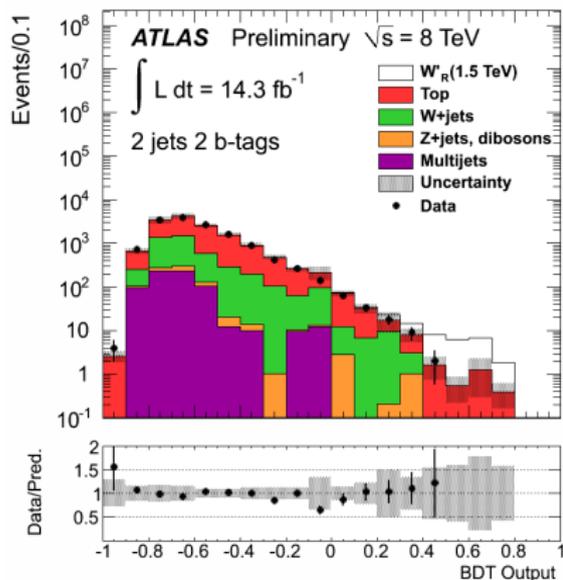
Analyse Multivariée par Arbre de Décision Boostés

- Discriminer signal et bruits de fond
 - Utiliser le pouvoir discriminant combiné de plusieurs variables cinématiques
- Arbres de Décision Boostés (BDT)
 - Technique discriminante prédictive
 - Défini groupe d'appartenance d'un individu (Signal/Bruit de fond)
 - Défini une fonction de classement
 - A partir de descripteurs (Variables discriminantes)
 - Retourne un poids pour chaque événement entre -1 and 1



2 étapes : Apprentissage/test et Application

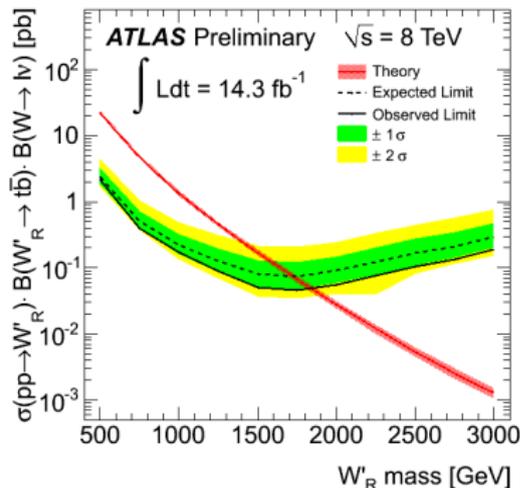
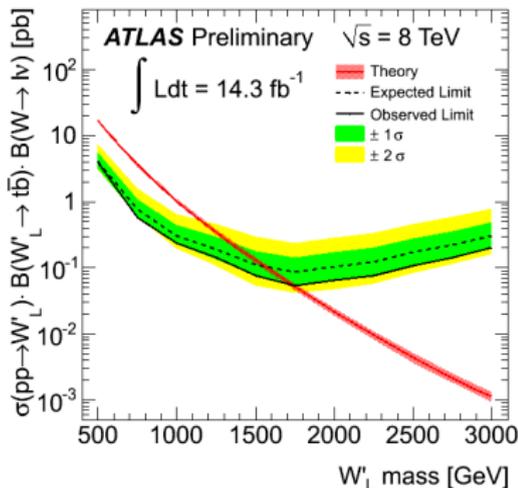
Premiers Résultats



Aucun excès de signal observé dans les données au delà des incertitudes reportées sur tout le spectre de BDT

Limites sur la section efficace de production

- Distributions de BDT combinées dans une analyse statistique
- Limite d'exclusion sur la section efficace de production du W'



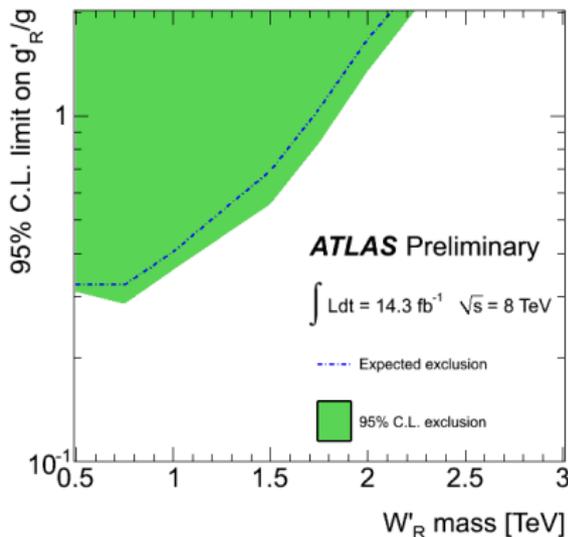
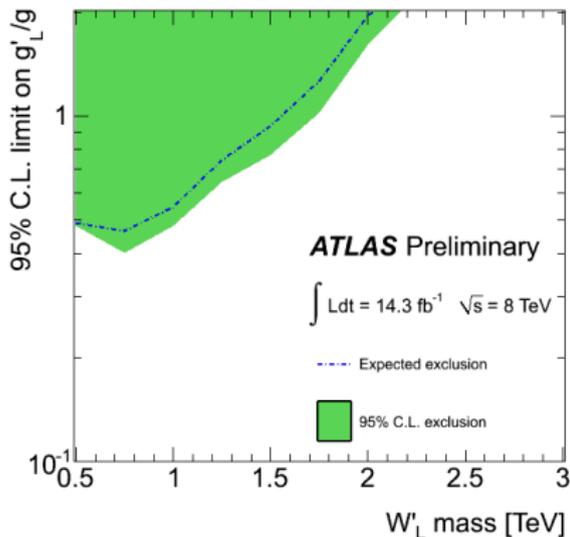
- Masses < 1.84 (1.74) TeV exclues pour des Bosons W' droits (gauches)

Limite sur le couplage effectif g'/g

- Intérêts de regarder la limite d'exculsion sur le couplage g'/g .
 - Comparaisons directes avec les modèles théoriques
 - Nombreuses contraintes phénoménologiques ...

Limite sur le couplage effectif g'/g

- Intérêts de regarder la limite d'exclusion sur le couplage g'/g .
 - Comparaisons directes avec les modèles théoriques
 - Nombreuses contraintes phénoménologiques ...



Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Conclusions

- Recherche d'un boson $W' \rightarrow tb$ dans une approche effective
 - Mise en place de la stratégie d'analyse
 - Techniques multivariées par arbres de décision boostés
- Pas de déviation observée aux prédictions du Modèle Standard
 - Limites sur la section efficace et les couplages du boson W'
 - Masses < 1.84 (1.74) TeV exclues pour des bosons W' droits (gauches)

Note de Conference : <https://cds.cern.ch/record/1547566>

Conclusions et perspectives

Perspectives

- Améliorations de l'analyse
 - Ajout de canaux supplémentaires
 - Interférences entre bosons W_L et boson W
 - ...
 - A plus long terme : analyse à 14 TeV
- Contraintes sur la Nouvelle Physique
 - Comprendre quelles contraintes plus large peuvent être apportées sur la Nouvelle Physique ...

Merci

Back-up

Limite sur le couplage effectif g'/g

Limite sur le couplage effectif g'/g

- Intérêts de regarder la limite d'exclusion sur le couplage g'/g .
 - Comparaisons directes avec les modèles théoriques
 - Nombreuses contraintes phénoménologiques ...

Limite sur le couplage effectif g'/g

- Intérêts de regarder la limite d'exclusion sur le couplage g'/g .
 - Comparaisons directes avec les modèles théoriques
 - Nombreuses contraintes phénoménologiques ...

Ex : Modèle des Extra Dimension Universelles Minimal

- g'/g décrit comme fonction du cutoff sans dimension ΛR
 - R^{-1} l'échelle de compactification
 - Λ le cutoff de la théorie

$$\rightarrow \frac{g'}{g_{SM}} = -0.065 \times \ln(\Lambda R/4)$$

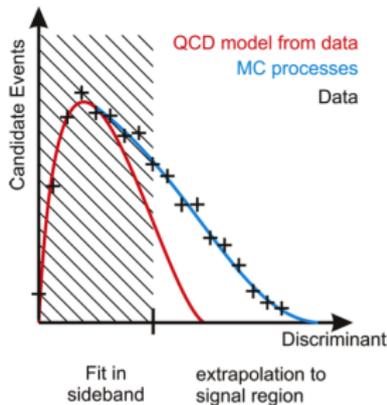
Multijet background estimate

- **Shapes** obtained from **dijet MC** sample \rightarrow **Pythia JF17** at 8TeV
 \rightarrow Electron requirement replaced by jet requirement : **Jet Electron Model**
 \rightarrow **Model used for electron and muon channels**
- **Normalisations** using a **binned likelihood fit on the E_T^{miss} distribution**
 All background fixed with their theoretical uncertainty, and **multijet model left free**

QCD fraction in Data extrapolated for $E_T^{miss} > 35$ GeV

Sample	Central Elec.	Forward Elec.	Muon
2-jet 1-tag	12.7%	17.1%	9.36%
2-jet 2-tag	6.85%	12.5%	6.43%
3-jet 1-tag	4.58%	10.9%	5.09%
3-jet 2-tag	2.53%	4.57%	1.83%

- A **50% uncertainty** assumed on all fractions
 \rightarrow Estimated by studying the impact of pile-up events on the fit results and by performing likelihood fits on other distributions : $m_T(W)$, etc.



W +Jets background estimate

- **Shapes and accepances** obtained from MC samples → **Alpgen/Jimmy**
- **Overall Normalisation**
 - Total number of W +jets events in the signal region (SR) is extrapolated from 2-tag control region (CR) for each jet multiplicity and lepton selection
 - CR defined by cutting on inv. reco. mass $m_{tb} < 270$ GeV
 - Expecting W +jets sample composition in the 2-tag CR and SR quite similar
 - Ensuring $S/B < 5\%$ in CR, all over the W' mass range (500 GeV → 3 TeV)

The general strategy

- (1) Number of W +jets events in CR is estimated, for channel i (e/mu), as the number of data events observed in this region after subtraction of all non- W +jets background sources

$$N_{W\text{jets},i}^{\text{CR,norm}} = N_{\text{Data},i}^{\text{CR}} - N_{\text{other backgrounds},i}^{\text{CR}}$$

- (2) A scale factor computed analytically for each channel i , is used to rescale the number of expected events in SR

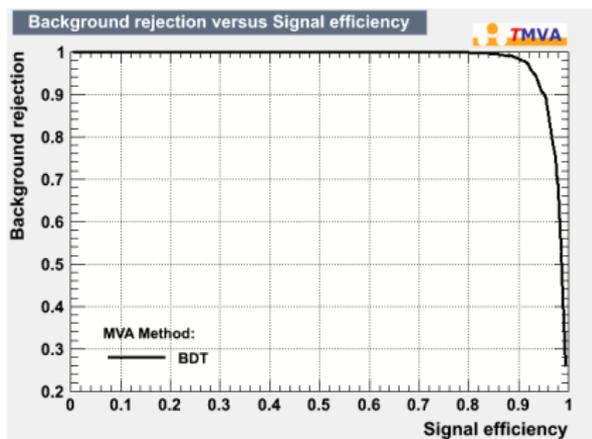
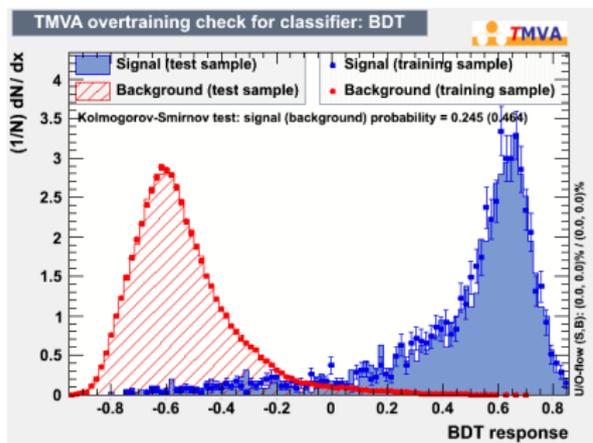
$$N_{W\text{jets},i}^{\text{SR,norm}} = \text{SF}_i \cdot N_{W\text{jets},i}^{\text{SR}} \quad \text{with} \quad \text{SF}_i = \frac{N_{W\text{jets},i}^{\text{CR,norm}}}{N_{W\text{jets},i}^{\text{CR}}}$$

Sections efficace et rapports d'embranchement

$m_{W'}$ [GeV]	$\mathcal{B}(W'_R \rightarrow t\bar{b})$	$\sigma_{W'_R} \times \mathcal{B}$ [pb]	$\mathcal{B}(W'_L \rightarrow t\bar{b})$	$\sigma_{W'_L} \times \mathcal{B}$ [pb]
500	0.298	69.749	0.223	52.087
750	0.319	14.662	0.240	11.044
1000	0.326	4.207	0.245	3.176
1250	0.329	1.411	0.248	1.073
1500	0.330	0.524	0.249	0.400
1750	0.331	0.207	0.250	0.160
2000	0.332	0.086	0.250	0.067
2250	0.332	0.037	0.250	0.029
2500	0.332	0.017	0.251	0.014
2750	0.332	0.008	0.251	0.007
3000	0.333	0.004	0.251	0.003

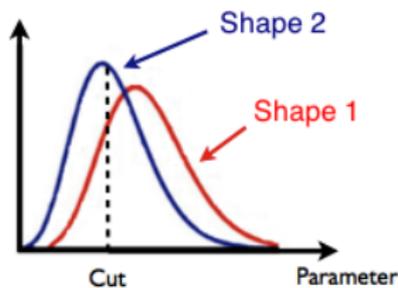
Branching ratio $\mathcal{B}(W' \rightarrow t\bar{b})$ and $pp \rightarrow W' \rightarrow t\bar{b}$ cross section of right-handed and left-handed W' -boson production calculated from theory. Z. Sullivan and al.

Entraînement et test du BDT

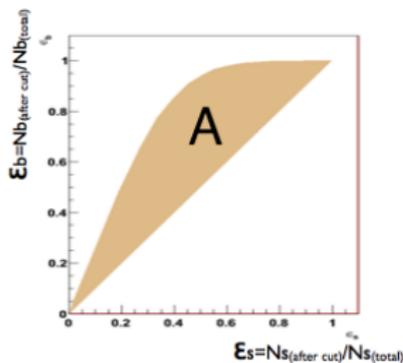


Multivariate Analysis with Boosted Decision Trees

- Figure of merit used for the selection of variable
 - Ensuring well-modeled variables and not too correlated



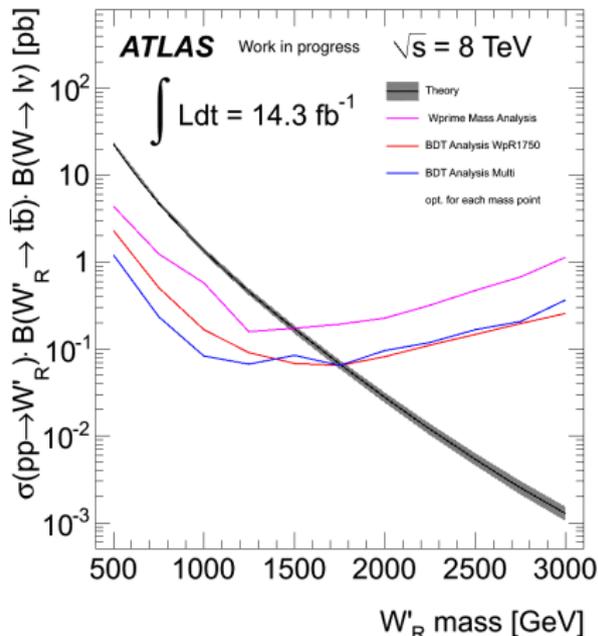
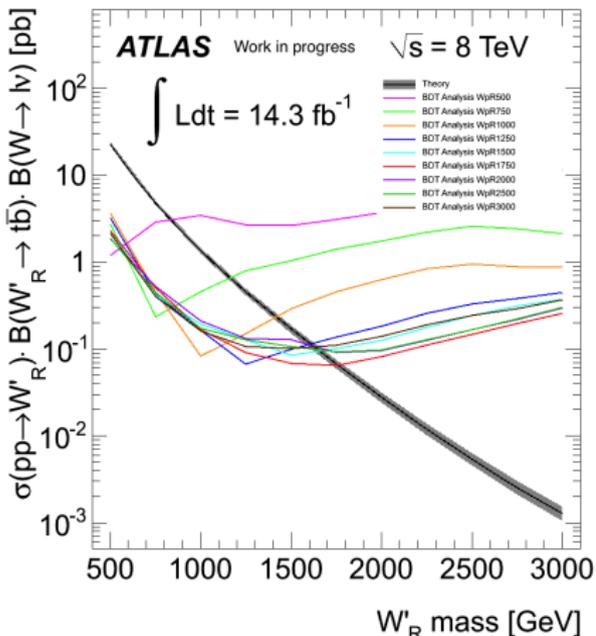
(a)



(b)

By applying a sliding cut on the variable (a) we draw the selection efficiency curve of the shape 1 (ϵ_B) vs the shape 2 (ϵ_S) for that variable (b). The figure of merit is the shaded area, A, under that curve. Only variables with $A > \text{threshold } \%$ are selected.

Comparisons of expected exclusion limits for different BDT approaches



Limit settings

- BDT distribution for 2 and 3 jets channels (e^-/μ^- merged) **combined in a statistical analysis** to calculate exclusion limits on W' cross section as function of its mass
 - Re-optimized BDT bin width : MC stat error < 40%
- Hypothesis testing performed with **CLs procedure**
 - Using a log-likelihood ratio (LLR) as test statistic

$$LLR = -2\ln \frac{\mathcal{L}(data|H_1)}{\mathcal{L}(data|H_0)},$$

- Pseudo experiments are generated for both hypothesis
 - Fraction of pseudo-exp for H1 (H2) hypothesis with $LLR > \text{threshold}$ gives CL_{s+b} (CL_b)
 - Threshold is set to the observed (background median) LLR for the observed (expected)
- Signal cross section for $CL_s = CL_{s+b}/CL_b < \mathbf{0.05}$ is consider excluded at 95% C.L.