



Nicolas Tonon

**Recherche de la production associée d'un quark top solitaire  
et d'un boson Z à 13 TeV dans l'expérience CMS**  
*Préparation de l'analyse*

**Stage de recherche – Master 2 Physique Subatomique & Astroparticules**

**Sous la direction de Jérémy Andrea & Nicolas Chanon**

*Equipe CMS*

# Plan

- › Le Modèle Standard
- › Le LHC & CMS
- › Le processus  $tZq$
- › Bruits de fond et « faux leptons »

**Contextes théorique & expérimental**

- › Sélection des événements
- › Exercice de synchronisation
- › Comparaisons Données/Simulations

**Mise en place de l'analyse à 13 TeV**

- › Estimation de bruits de fond à partir des données
- › Validation : mesure de section efficace WZ

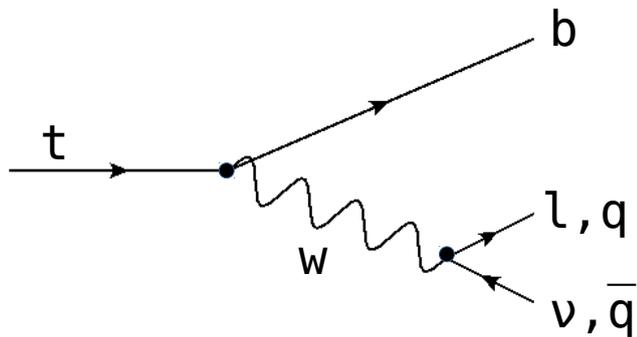
**Développement d'un aspect de l'analyse**

# Le Modèle Standard

➤ Décrit les particules élémentaires & leurs interactions

➤ **Bon accord** théorie / expérience

2012 : Découverte du boson de Higgs



	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	BOSONS DE JAUGE	
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> boson de Higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> électron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> boson Z	
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino électronique	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonique	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauique	<b><math>W^\pm</math></b> bosons $W^\pm$	

# Le Modèle Standard

➤ Décrit les particules élémentaires & leurs interactions

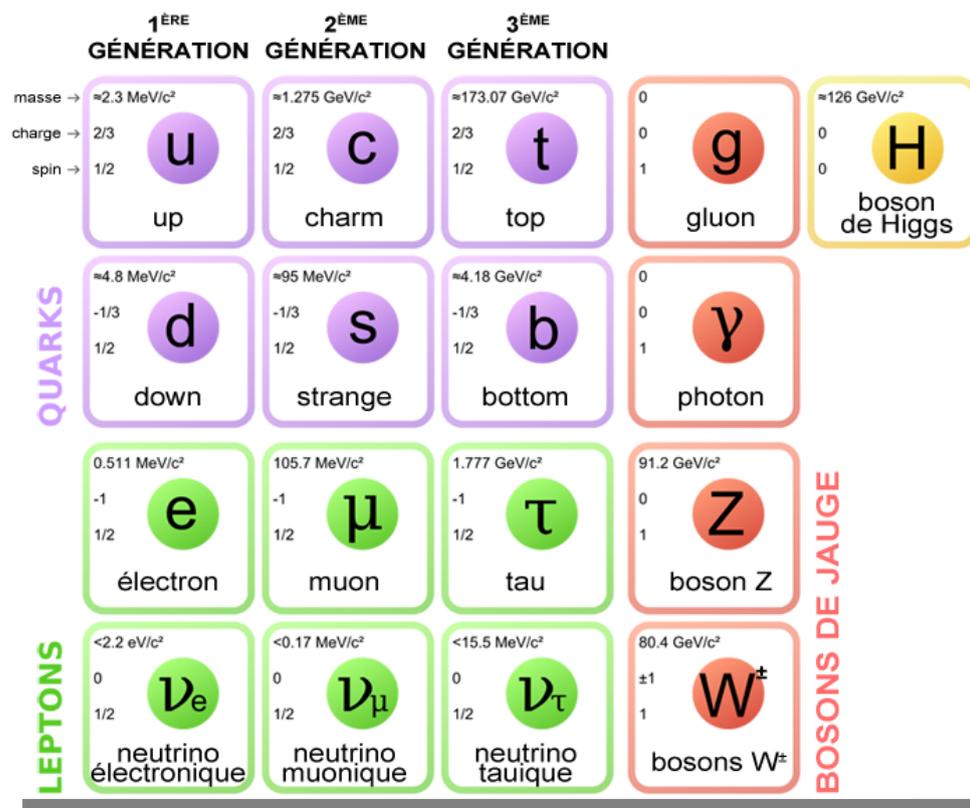
➤ Bon accord théorie / expérience

2012 : Découverte du boson de Higgs

➤ Plusieurs **problèmes**

- Matière noire inexpliquée
- Masses des neutrinos inexpliquées
- Masse du Higgs, « ajustement fin »
- ...

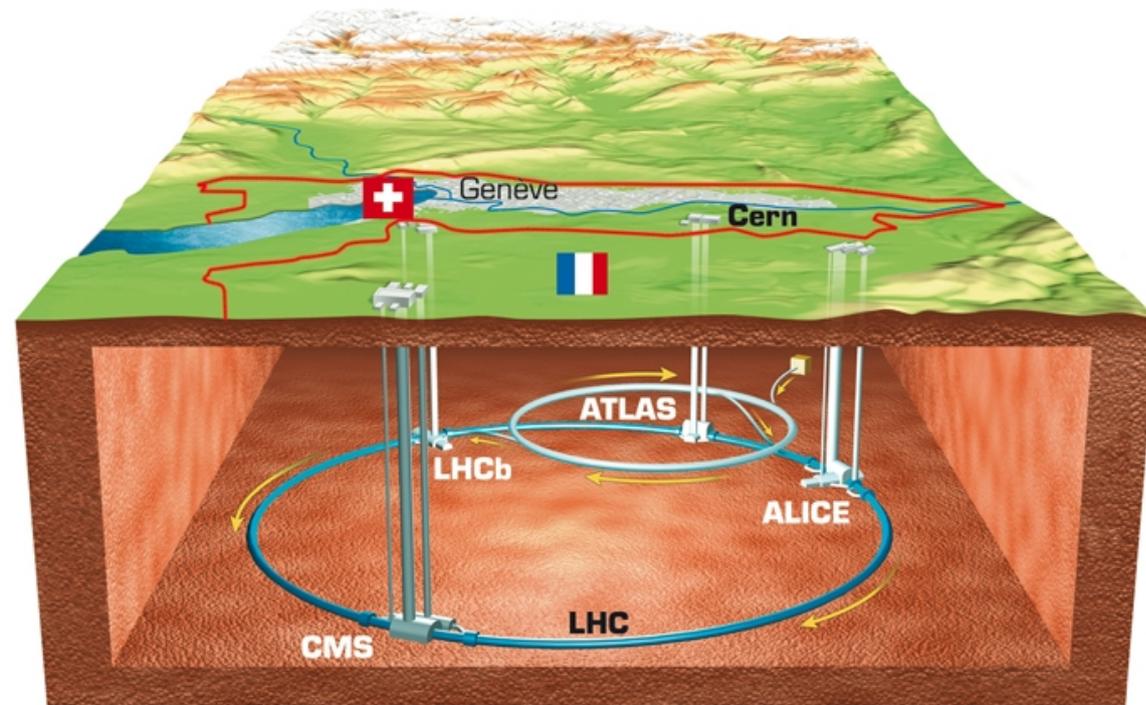
→ Modèles de « **nouvelle physique** » (BSM)



# Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC)

## ➤ Run I

- ♦ 2010 – 2012
- ♦  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  (puis 8 TeV)
- ♦ Luminosité intégrée  $\approx 20 \text{ fb}^{-1}$



# Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC)

## › Run I

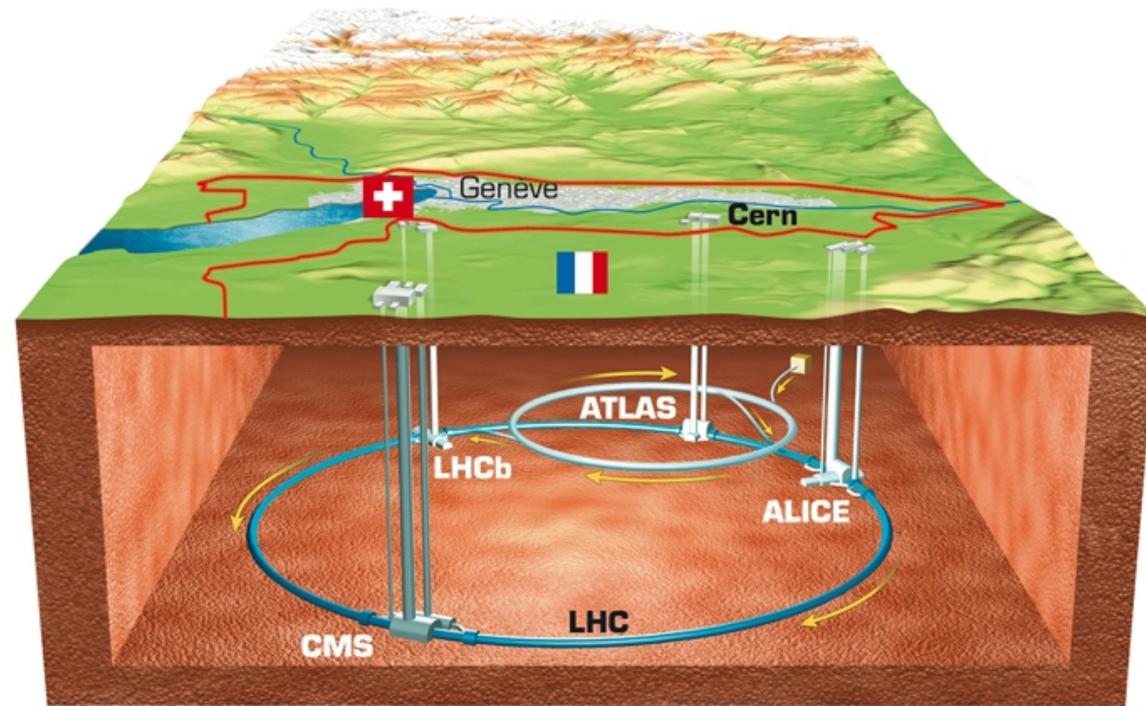
- ♦ 2010 – 2012
- ♦  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  (puis 8 TeV)
- ♦ Luminosité intégrée  $\approx 20 \text{ fb}^{-1}$

## › Run II

- ♦ 2015 – 2018
- ♦  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
- ♦ Haute luminosité

$$N = \mathcal{L} \times \sigma$$

- ♦ 1 milliard de collisions p-p / seconde
- ♦ Luminosité intégrée  $\approx 30 \text{ fb}^{-1}$  fin 2016



# L'expérience CMS

## 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  $\mu\text{m}$ )  $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$  channels  
 Microstrips (80x180  $\mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$  channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

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

PRESHOWER

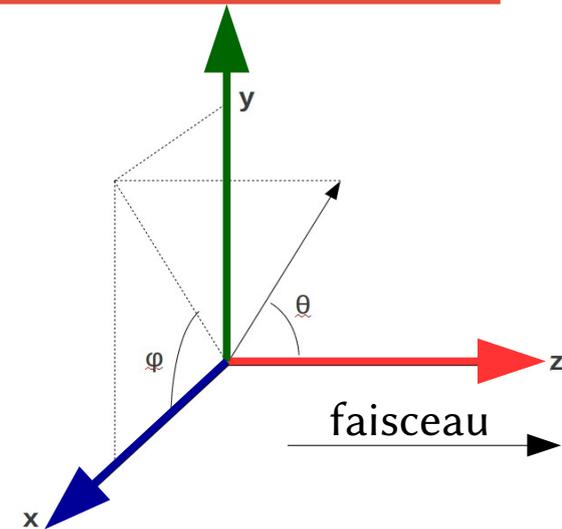
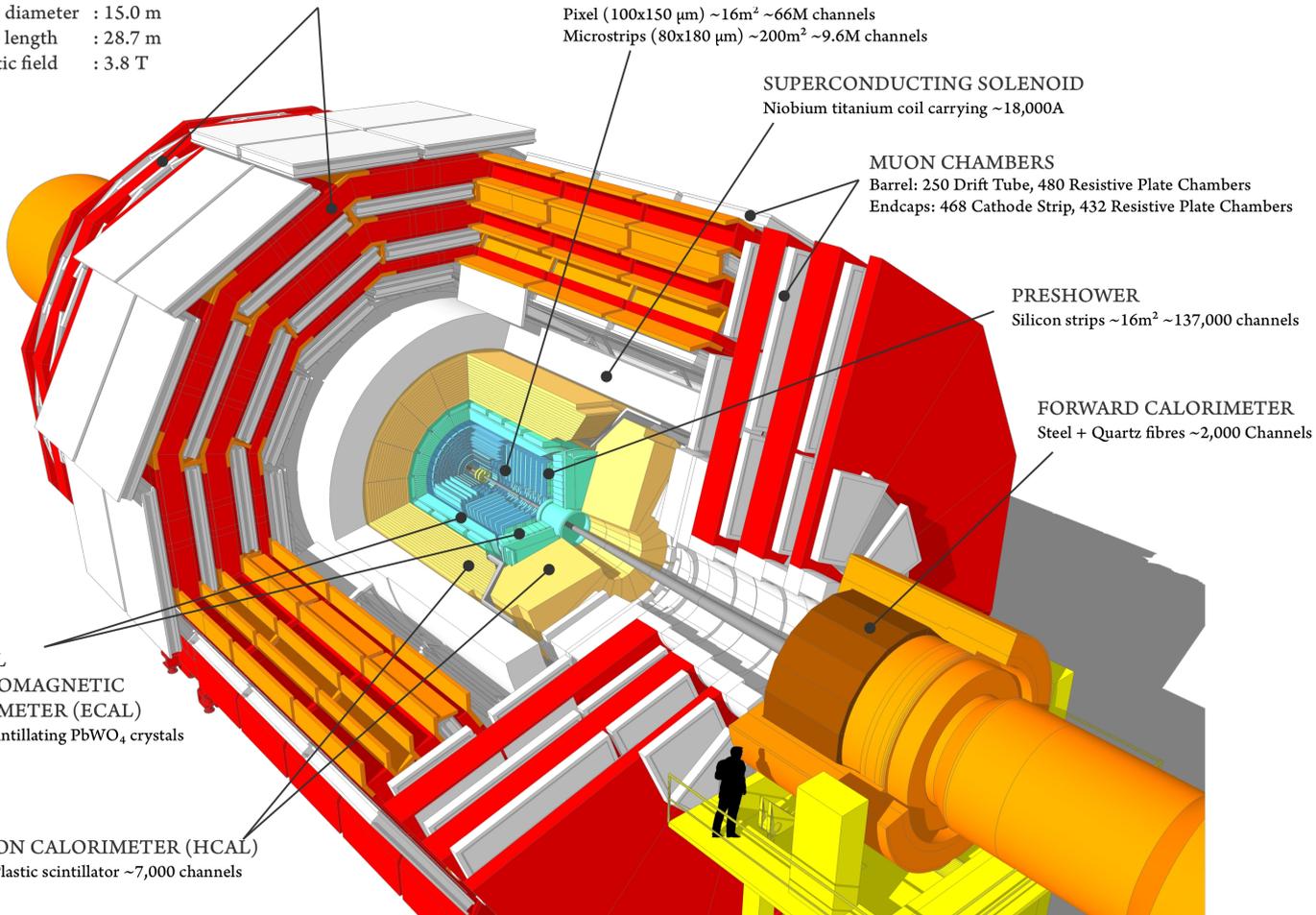
Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$  channels

FORWARD CALORIMETER

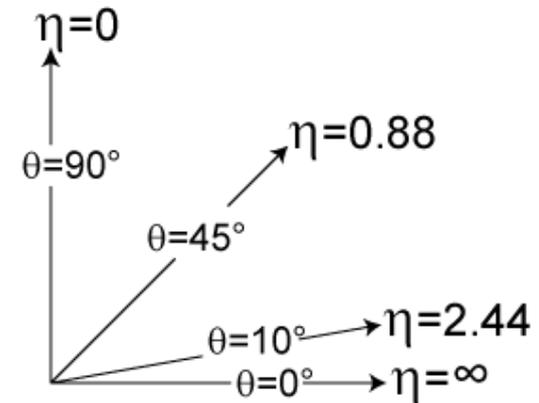
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)  
 $\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

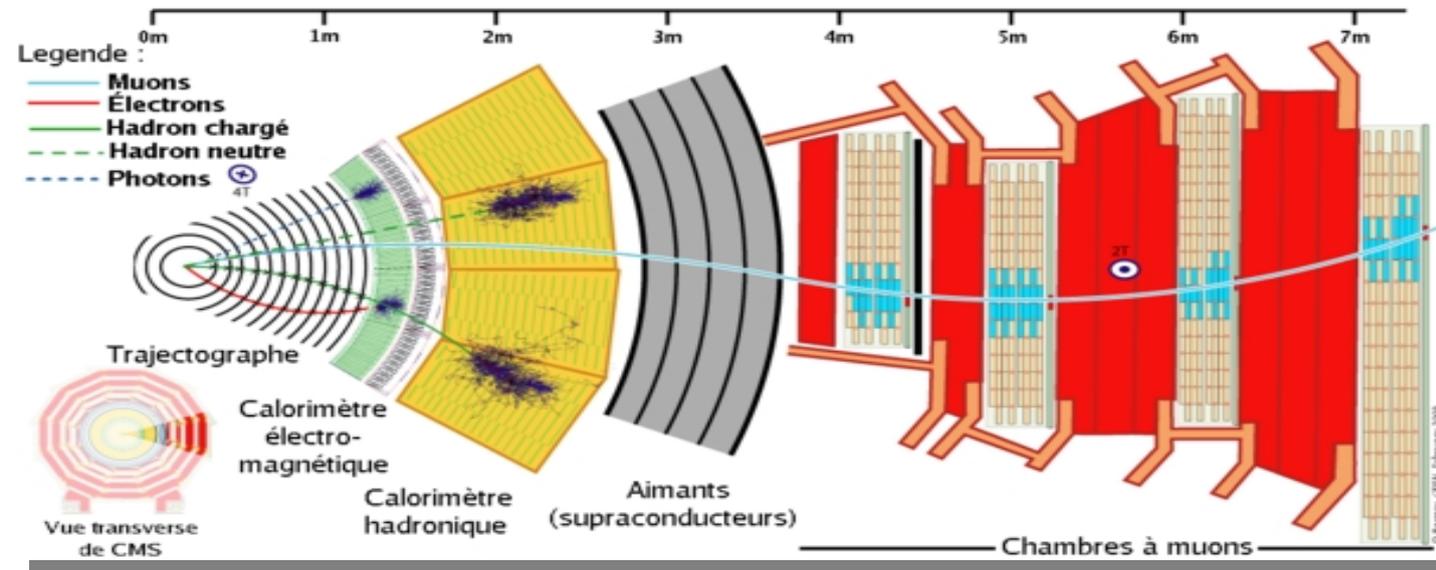
HADRON CALORIMETER (HCAL)  
 Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels



$$\eta = -\ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$$



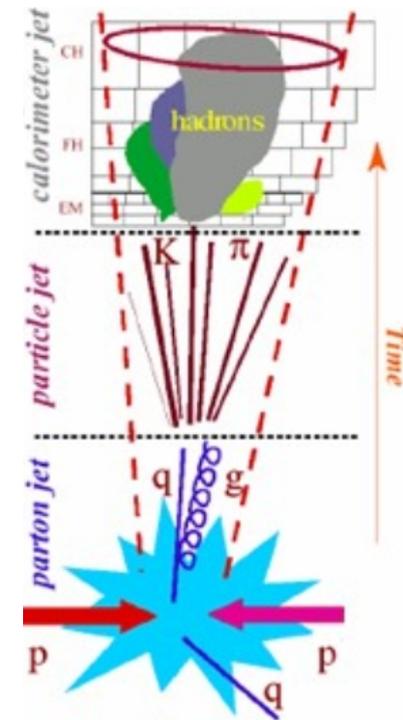
# L'expérience CMS



$$E_T = - \left| \sum_i \vec{p}_T(i) \right| \quad \begin{array}{l} i: \\ \text{particules} \\ \text{visibles de} \\ \text{l'état final} \end{array}$$

- Plusieurs **sous-détecteurs** spécialisés
- **Combinaison** des informations par l'algorithme Particle Flow
- **Reconstruction** de l'événement (particules, MET, ...)

- Les quarks s'hadronisent et engendrent des jets

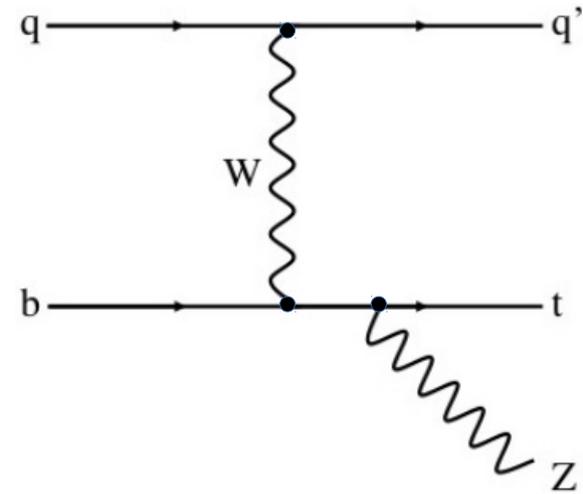


# Description du signal de l'analyse

# Le processus $tZq$

- › Production d' 1 quark top solitaire et 1 boson Z
- › Processus prédit par le Modèle Standard (MS)

Non observé durant le Run I



# Le processus $tZq$

- › Production d' 1 quark top solitaire et 1 boson Z
- › Processus prédit par le Modèle Standard (MS)

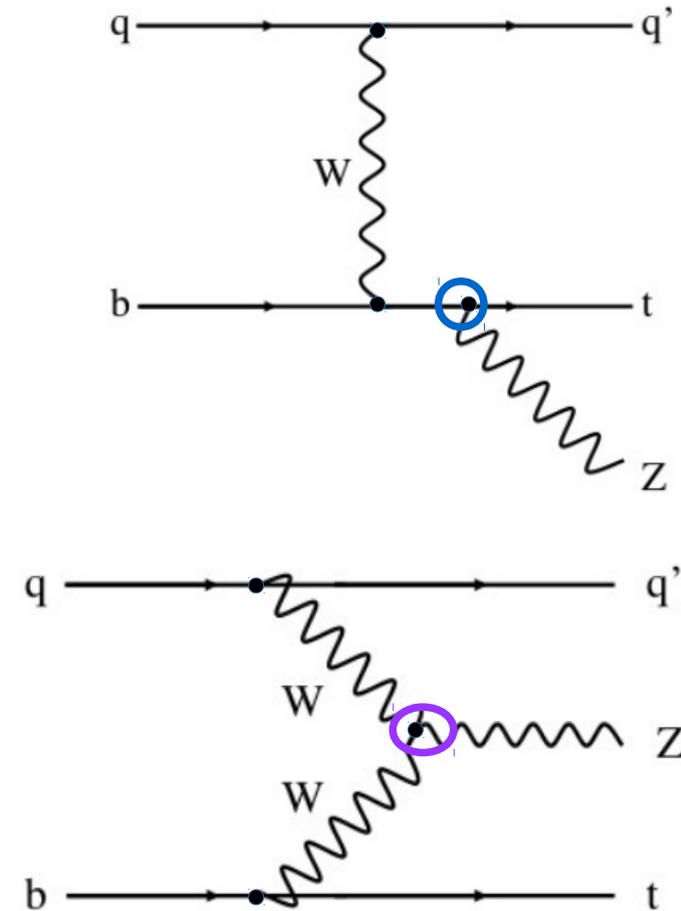
Non observé durant le Run I

$$\sigma_{tZq}^{13\text{TeV}} = 808 \pm 24 \text{ fb}$$

- › Sensible aux couplages t-Z & W-Z

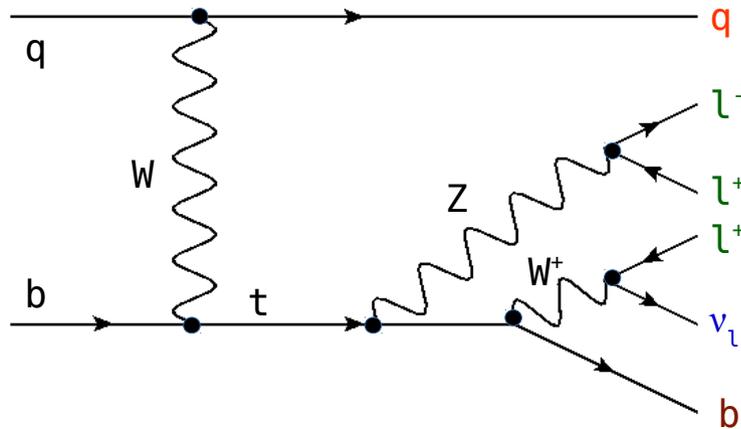
→ La mesure de  $\sigma_{tZq\text{-SM}}$  est un **test important du MS**

- › Peut-être produit par Changement de Saveur par Courant Neutre (FCNC) → **BSM**



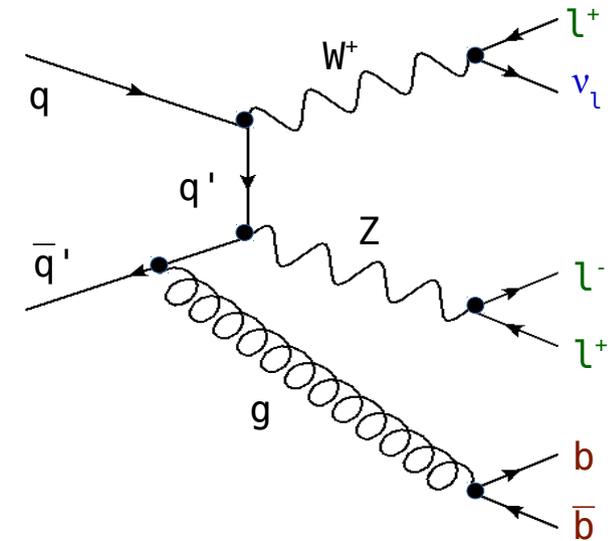
# Les bruits de fond de l'analyse

► Etat final : 3 leptons ( $e$  ou  $\mu$ ) + 1 jet-b + 1 jet léger + MET



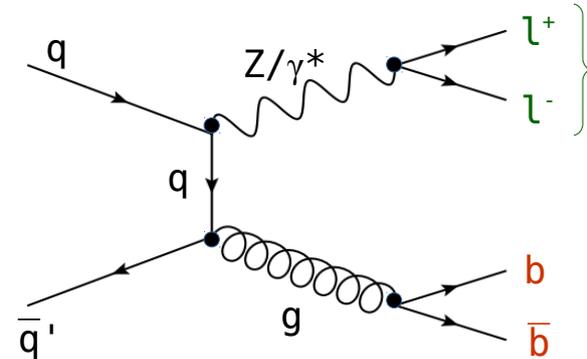
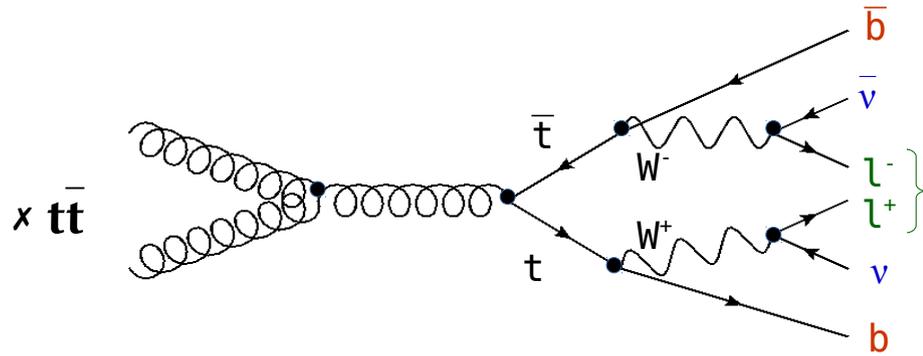
► Bruits de fond : Signatures expérimentales proches du signal

- × **WZ, ZZ, WW** + jets
- × **t $\bar{t}$**  + W/Z
- × **t $\bar{t}$**
- × **Drell-Yan** ( $Z/\gamma^* \rightarrow l^+l^-$ ) + jets



# Les « faux leptons »

x Drell-Yan ( $Z/\gamma^* \rightarrow l^+l^-$ ) + jets



- Nécessairement associés à un « **faux lepton** »
  - mal identifié (*jet reconstruit en lepton, ...*)
  - mal isolé (*désintégration semi-leptonique d'un hadron lourd, ...*)
- Taux de faux leptons **mal modélisé** par la simulation Monte-Carlo
  - Il faut estimer ces bruits de fond **à partir des données**
- Signal et autres bruits de fond estimés par la simulation (théorie + effets de détecteur)

**MISE EN PLACE DE L'ANALYSE À  $\sqrt{s} = 13$  TeV**

# Sélection des objets

<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <math>p_T &gt; 20 \text{ GeV}</math></li><li>✓ <math> \eta  &lt; 2.4</math></li><li>✓ Critères d'identification «serrés»</li><li>✓ Coupure d'isolation</li></ul> <p><b>Muons</b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <math>p_T &gt; 20 \text{ GeV}</math></li><li>✓ <math> \eta  &lt; 2.5</math></li><li>✓ Critères d'identification «serrés»</li><li>✓ Coupure d'isolation</li></ul> <p><b>Électrons</b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <math>p_T &gt; 30 \text{ GeV}</math></li><li>✓ <math> \eta  &lt; 4.5</math></li><li>✓ Critères d'identification «relâchés»</li></ul> <p><b>Jets</b></p>
--	--	---

➤ Isolation : 
$$Iso \propto \sum_{i \in \text{cône}} |\vec{p}_T|(i) \quad \left| \quad i : \text{particules reconstruites} \right.$$

➤ Peu de données → Coupures relâchées pour mettre en place les outils d'analyse

# Sélection des évènements

Trigger  $ee / \mu\mu / e\mu$

3 leptons « serrés »

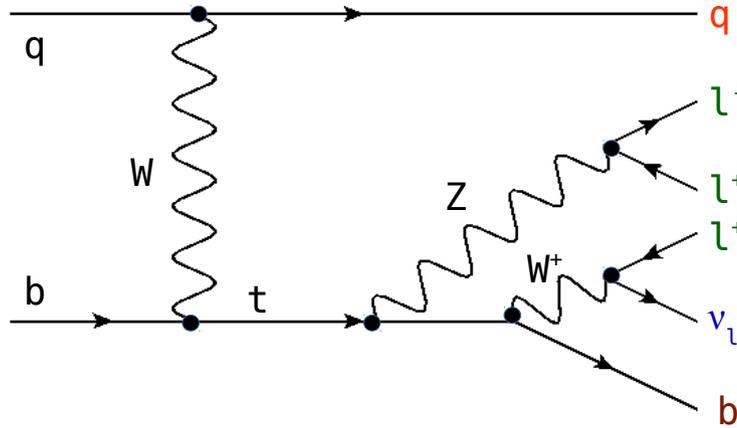
Veto lepton additionnel

Masse du boson Z

$$76 \leq m_{ll} \leq 106 \text{ GeV}$$

$\geq 2$  jets

= 1 jet-b



Masse reconstruite du top

$$95 \leq m_{lvb} \leq 200 \text{ GeV}$$

Masse Transverse du W

$$m_T(W) = \sqrt{2p_T^l \cdot \cancel{E}_T [1 - \cos(\Delta\phi(l - \cancel{E}_T))]} \quad m_T(W) \geq 20 \text{ GeV}$$

Energie Transverse Manquante

$$MET \geq 25 \text{ GeV}$$

# Exercice de synchronisation

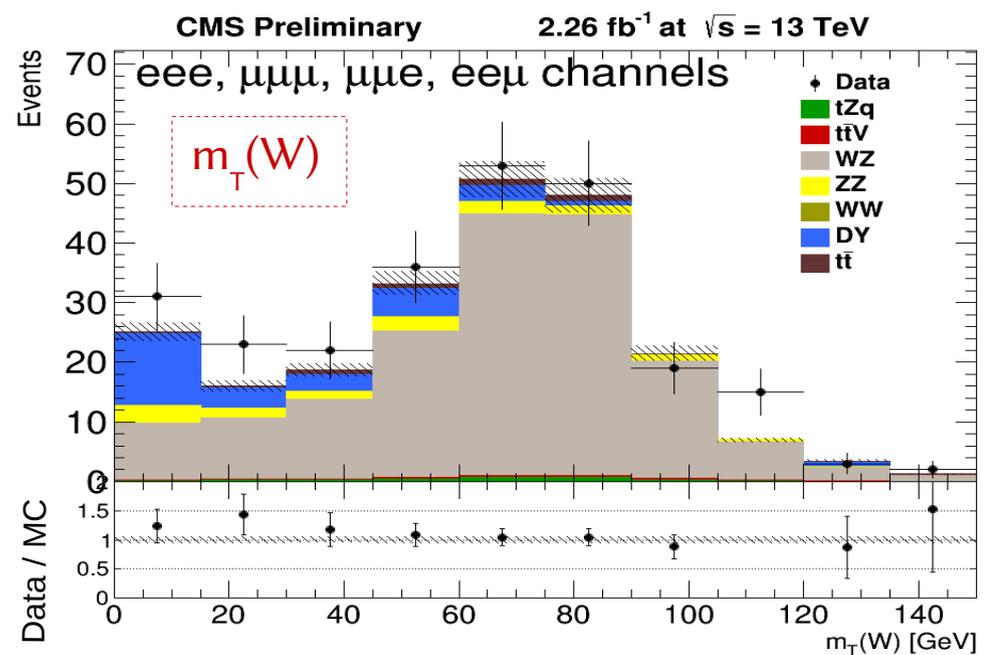
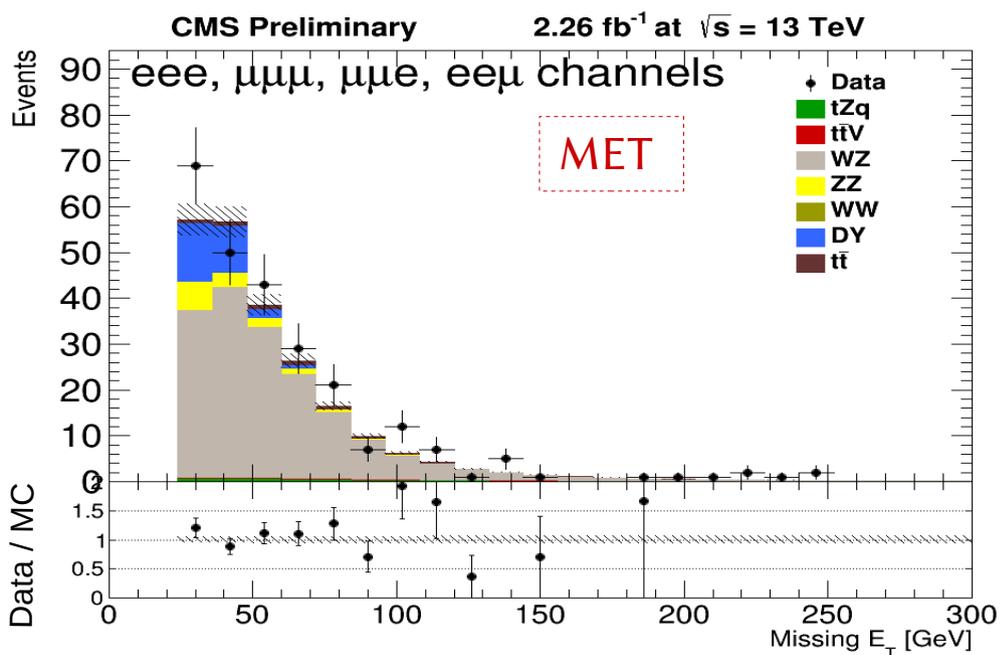
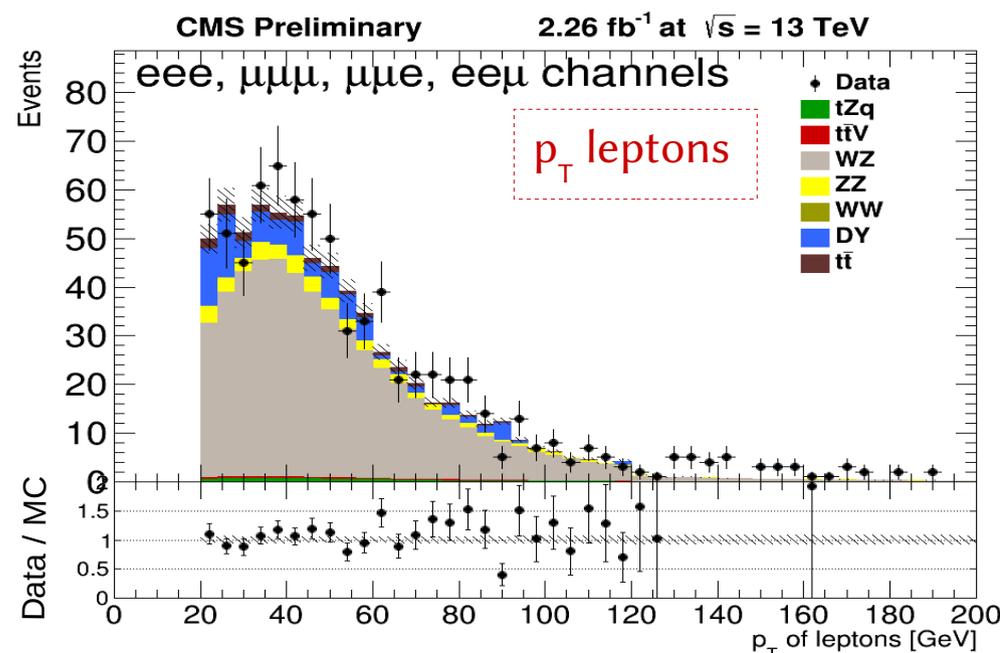
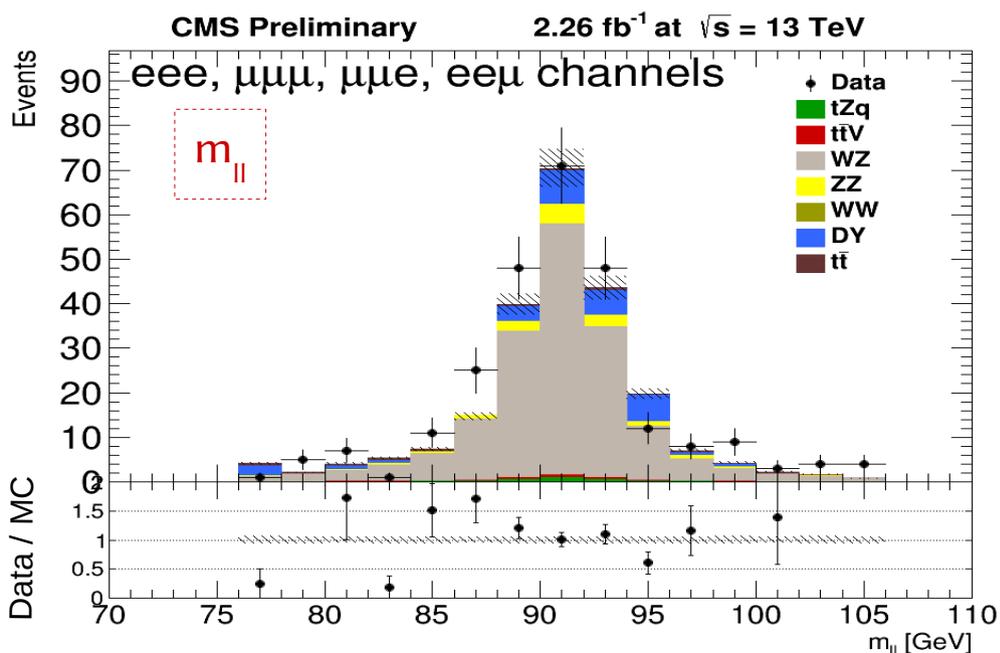
- **Collaboration** de chercheurs de 5 pays différents
  - Codes et structures d'analyse propres à chaque équipe
    - S'assurer que tout le monde effectue les mêmes sélections !
  - **Comparaison** des nombres d'événements après chaque étape de sélection
  - Processus long et complexe
  - **Échange** d'informations et de résultats (processus itératif)
  - Rôle moteur, prise d'initiatives, contact fréquent (*mail, skype, ...*)
- ✓ **Synchronisation**

Vérification modélisation bruits de fond  
 → **Région de contrôle**

tZq	Total MC	} <i>Nb d'événements</i> ( <i>echantillons simulés</i> )
$3.15 \pm 0.06$	$224.71 \pm 5.81$	

Comparaison entre observations et prédictions → Accord raisonnablement bon

18



# ESTIMATION DE BRUITS DE FOND PAR AJUSTEMENT DE MODELES

# Principe de la méthode d'ajustement de modèles

- › **Formes** attendues des distributions .....► Modèles
- › **Normalisations** des modèles .....► Paramètres libres ou constraints

› Méthode statistique



**Permet d'extraire les normalisations des bruits de fond**

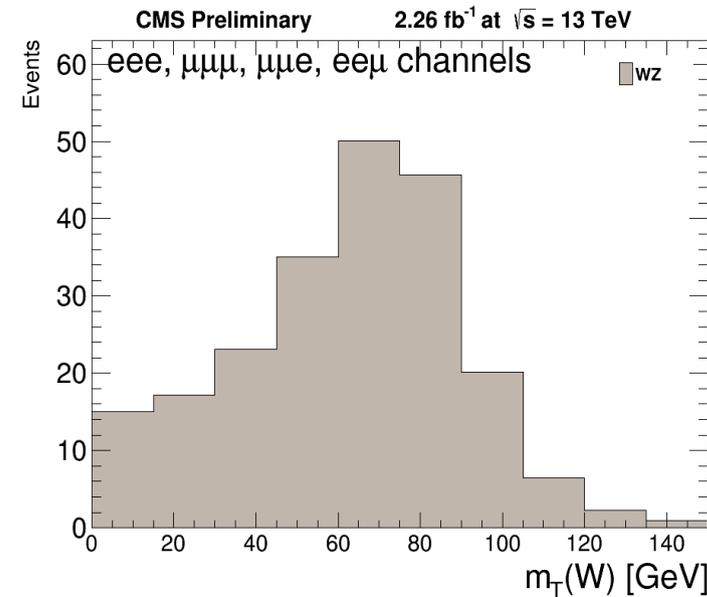
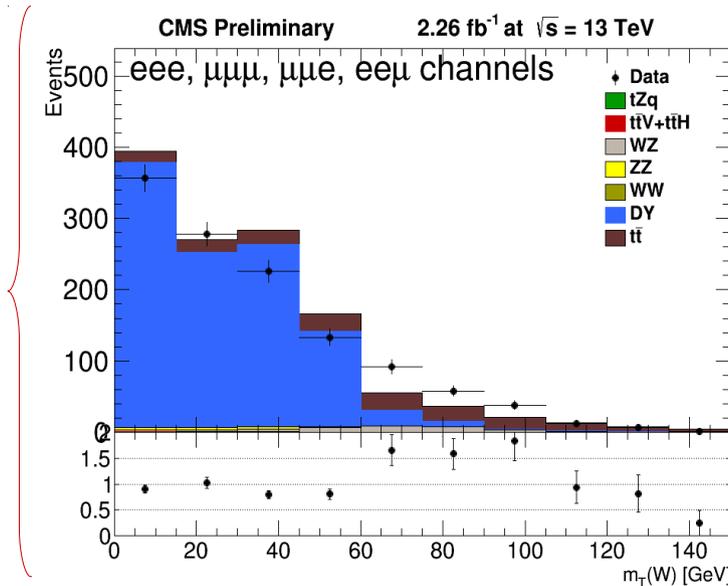
› Modèle distinct pour chaque canal :  $eee$ ,  $\mu\mu\mu$ ,  $ee\mu$ ,  $\mu\mu e$

# Les modèles

- Estimation effectuée dans une région de contrôle WZ (+ sensible)
- Utilisé pour contraindre les bruits de fond dans la région de signal
  - On exploite la **différence de forme** des distributions de  $m_T(W)$

Données enrichies en faux leptons

(coupure d'isolation inversée)



Simulation  
WZ

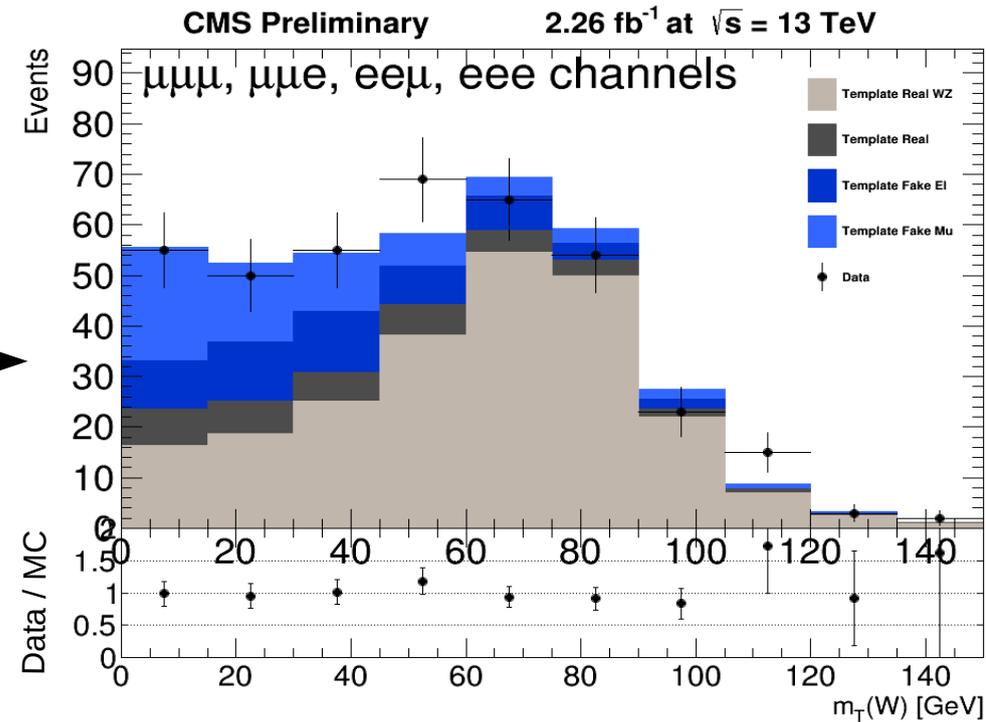
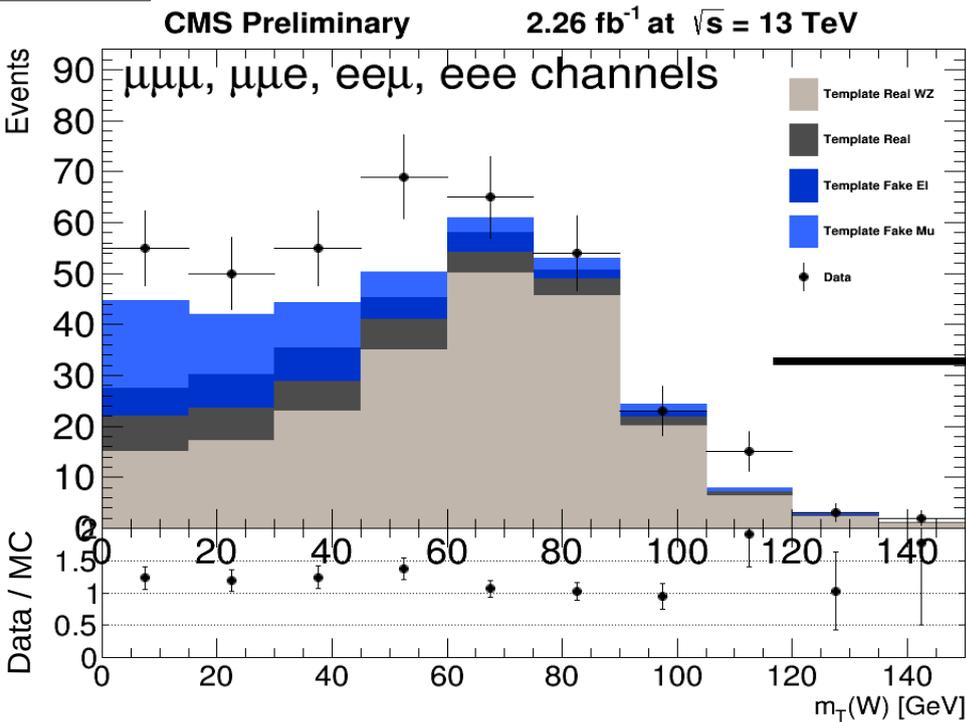
# Ajustement des modèles

➤ Comparaison entre Données et Modèles

✓ **Accord amélioré**

Avant

Après



➤ Les normalisations des modèles « faux électrons » et « faux muons » ont augmenté de  $\sim +80\%$  et  $\sim +30\%$

→ Le taux de faux leptons semble effectivement être **sous-estimé** par la simulation

# Mesure de section efficace WZ

- › Vérifier que l'ajustement **converge** et produit des résultats **cohérents**  
→ Mesure de section efficace WZ

- › WZ traité comme un signal, normalisation libre lors de l'ajustement

- › 
$$\sigma(WZ \rightarrow l\nu l'l') = 5.73_{-0.64}^{+0.69} \text{ (stat+syst) pb}$$

- › **Compatible** avec la valeur théorique utilisée : 5.26 pb

# Conclusion et perspectives

## ✓ Mise en place de l'analyse

- ✓ **Implémentation** du code de sélection pour le groupe ;
- ✓ Participation active à l'exercice de **synchronisation** ;
- ✓ **Vérifications des accords** Données/Simulations dans plusieurs régions de contrôle.

## ✓ Prise en charge d'un aspect de l'analyse : estimation des bruits de fond contenant un faux lepton

- ✓ Procédure **ré-applicable** aux nouvelles données ;
- ✓ **Validation** par une mesure de section efficace WZ.

- ♦ Intégrer toutes les incertitudes systématiques
- ♦ Optimiser les sélections
- ♦ Recherche FCNC

## Perspectives

**BACKUP**

# Ajustement des modèles

- Les **normalisations** des modèles qui représentent le comportement des faux leptons ont **augmenté**

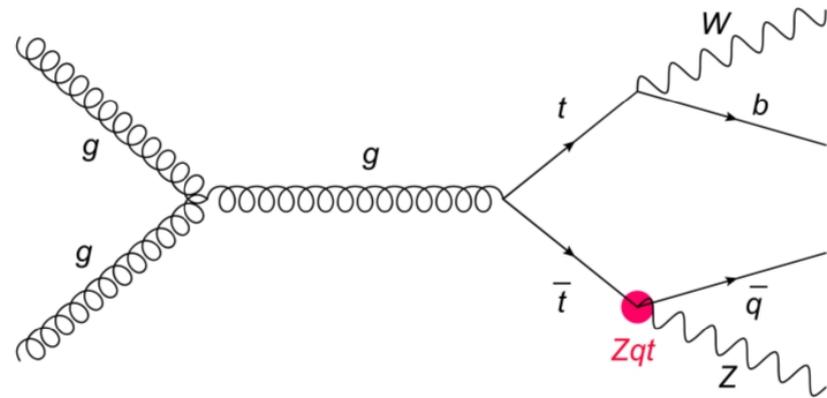
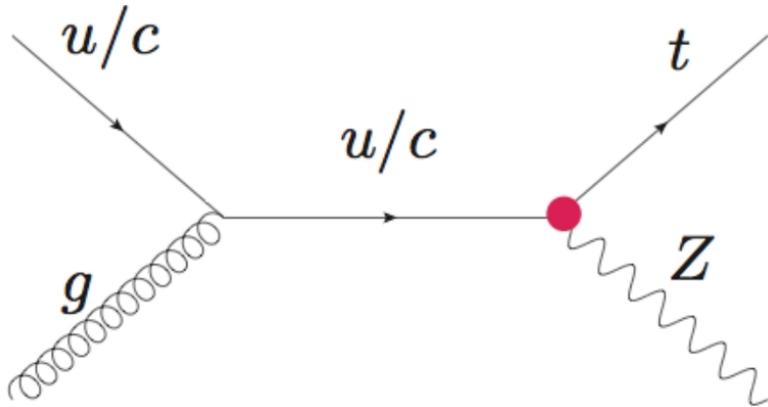
Modèles « faux leptons »

<i>Nb évènements</i>	<b>Avant</b>	<b>Après</b>	<b>Ratio</b>
$\mu\mu\mu$	$36.4 \pm 1.4$	$47.3 \pm 1.9$	$\sim +30\%$
$e\bar{e}\mu$	$14.5 \pm 0.9$	$18.8 \pm 1.8$	
$e\bar{e}e$	$8.1 \pm 0.9$	$14.5 \pm 1.6$	$\sim +80\%$
$\mu\bar{\nu}e$	$21.5 \pm 1.4$	$38.6 \pm 1.6$	
<b>All</b>	$80.4 \pm 2.4$	$119.2 \pm 3.5$	$\sim +50\%$

<i>Après</i>	<b>Total modèles</b>	<b>Données</b>
$\mu\mu\mu$	$161.9 \pm 2.2$	$163 \pm 13$
$e\bar{e}\mu$	$67.7 \pm 1.4$	$66 \pm 8$
$e\bar{e}e$	$49.6 \pm 1.8$	$46 \pm 7$
$\mu\bar{\nu}e$	$111.0 \pm 2.8$	$119 \pm 11$
<b>All</b>	$390.2 \pm 4.2$	$394 \pm 20$

→ Le taux de faux leptons semble effectivement être **sous-estimé** par la simulation

# tZq et nouvelle physique



- Sensible aux Changements de Saveur par Courant Neutre (**FCNC**)
- FCNC fortement supprimés dans MS (*Mécanisme de GIM*)
- Plusieurs extensions BSM prédisent une forte augmentation des FCNC

where  $X = H, \gamma, Z$  or  $g$ . In models beyond SM, branching ratios up to  $10^{-3}$  are predicted [2].

→ La mesure de  $\sigma_{tZq\text{-SM}}$  peut constituer une **porte d'accès vers la nouvelle physique**

# Table de synchronisation

<i>Echantillon simulé <math>tZq</math> (avant)</i>	IPHC	CIEMAT	VUB	Islamabad	Brunel
<b>Avant sélections</b>	200888	200888	200888	200888	200888
1 - <b>Triggers</b>	98446	98446	98446	98446	98446
2 - <b>3 leptons ‘serrés’</b>	7591	6487	6687	6968	9605
3 - <b>Pas de lepton additionnel</b>	7577	6469	6671	6931	9250
4 - <b>Coupure <math>m_{ll}</math></b>	6986	5965	6154	5993	8448
5 - <b><math>\geq 1</math> jet</b>	6813	5532	6144	4726	7761
6 - <b>Exactement 1 jet-b</b>	3616	4394	3138	1611	5977
8 - <b>Coupure <math>m_T(W)</math></b>	3237	3931	2814	1441	5977
9 - <b>Coupure <math>m_{top}</math></b>	2162	2313	2043	1002	1334

<i>Echantillon simulé <math>tZq</math> (après)</i>	IPHC	CIEMAT	VUB	Islamabad	Brunel
<b>Avant sélections</b>	200888	200888	200888	200888	200888
1 - <b>Triggers</b>	98446	98446	98446	98446	98446
2 - <b>3 leptons ‘serrés’</b>	6487	6487	6487	6487	6487
3 - <b>Pas de lepton additionnel</b>	6469	6469	6469	6477	6476
4 - <b>Coupure <math>m_{ll}</math></b>	5965	5965	5965	5971	5972
5 - <b><math>\geq 1</math> jet</b>	5532	5532	5532	5538	5539
6 - <b>Exactement 1 jet-b</b>	3114	3114	3115	3117	3118
8 - <b>Coupure <math>m_T(W)</math></b>	2795	2795	2794	2796	2797
9 - <b>Coupure <math>m_{top}</math></b>	1841	1831	1830	1832	1053

TABLE A.1 – Nombres d’évènements obtenus par les différents groupes après chaque étape de sélection. La Table du haut a été obtenue peu après le début de l’exercice de synchronisation, celle du bas contient les derniers chiffres obtenus. La synchronisation est quasiment réalisée entre tous les groupes.

# Paramètres de nuisance

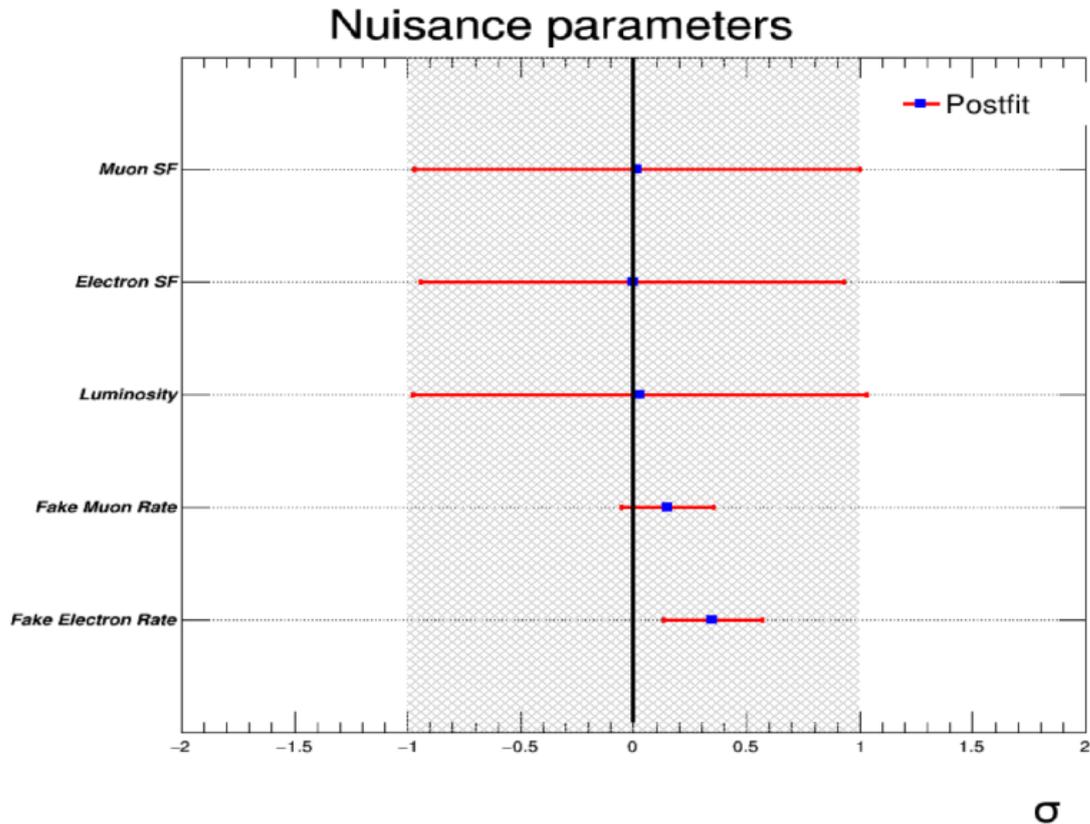


FIGURE A.2 – Valeurs après ajustement des paramètres de nuisance, comparées à leurs valeurs initiales (“0”). Les hachures représentent l’incertitude initiale d’un paramètre ( $\pm 1\sigma$ ), et la barre d’erreur son incertitude après ajustement. Les paramètres de nuisance pris en compte sont les incertitudes sur les facteurs d’échelle appliqués (voir texte), sur la luminosité, et les taux de mauvaise identifications des électrons et des muons. Afin de laisser libre la normalisation des bruits de fond contenant un lepton mal identifié, on a fixé les incertitudes initiales des taux de mauvaise identification à 5 fois les écarts gaussiens déterminés par les POG de CMS.