

Études de la troisième génération

Pour la physique électro-faible et au-delà

Romain Madar - LPC

Habilitation à Diriger des Recherches

11/09/2019

Préambule : contexte scientifique

1. Le Modèle Standard (MS) laisse certaines questions sans réponse

1. **Le Modèle Standard (MS)** laisse certaines questions sans réponse
2. **Le secteur électro-faible** pose plusieurs problèmes
 - (a) construction basée sur l'invariance de jauge : **masse?** (courte portée)
 - (b) construction *ad hoc* : $\sigma(W^+W^- \rightarrow W^+W^-)$ **non physique**

1. **Le Modèle Standard (MS)** laisse certaines questions sans réponse
2. **Le secteur électro-faible** pose plusieurs problèmes
 - (a) construction basée sur l'invariance de jauge : **masse?** (courte portée)
 - (b) construction *ad hoc* : $\sigma(W^+W^- \rightarrow W^+W^-)$ **non physique**

Le MS est incomplet et :

1. **Le Modèle Standard (MS)** laisse certaines questions sans réponse
2. **Le secteur électro-faible** pose plusieurs problèmes
 - (a) construction basée sur l'invariance de jauge : **masse?** (courte portée)
 - (b) construction *ad hoc* : $\sigma(W^+W^- \rightarrow W^+W^-)$ **non physique**

Le MS est incomplet et :

- il perd son pouvoir prédictif à $\mathcal{O}(1 \text{ TeV})$

1. **Le Modèle Standard (MS)** laisse certaines questions sans réponse

2. **Le secteur électro-faible** pose plusieurs problèmes

(a) construction basée sur l'invariance de jauge : **masse?** (courte portée)

(b) construction *ad hoc* : $\sigma(W^+W^- \rightarrow W^+W^-)$ **non physique**

Le MS est incomplet et :

- il perd son pouvoir prédictif à $\mathcal{O}(1 \text{ TeV})$
- l'énergie où il *échoue* est **connue** et **accessible** par l'expérience

1. Le Modèle Standard (MS) laisse certaines questions sans réponse
2. Le secteur électro-faible pose plusieurs problèmes

Une stratégie claire

Sonder la région d'invalidité du MS **par l'expérience** grâce au **LHC**.

Le boson de Higgs est **l'un** des scénarios possibles, guidant les recherches, mais son existence ne **conditionne pas** une possible découverte.

- l'énergie où il *échoue* est connue et accessible par l'expérience

Après la découverte du boson de Higgs

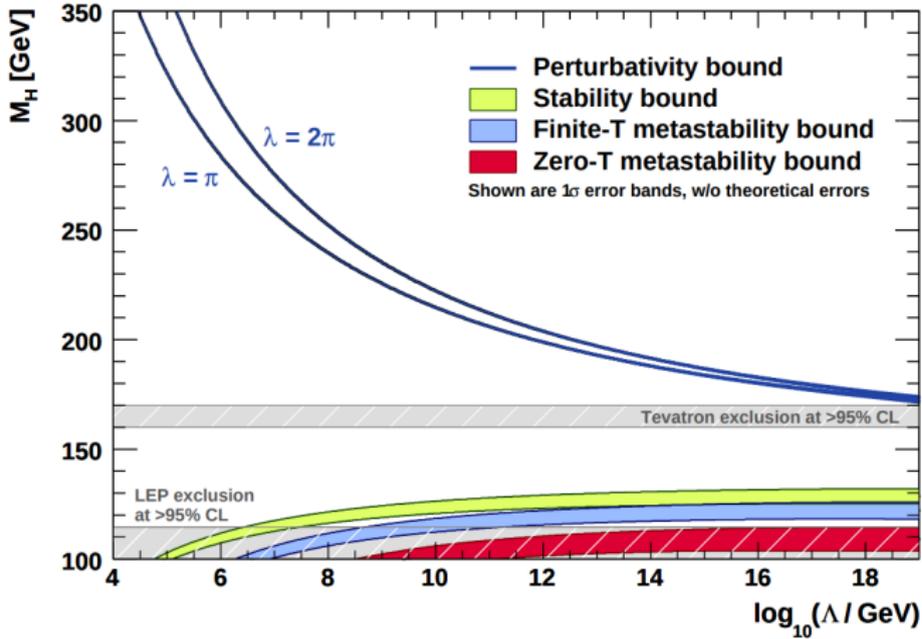
Juillet 2012 : découverte du boson de Higgs et $m_H = 125 \text{ GeV}$

Juillet 2012 : découverte du boson de Higgs et $m_H = 125 \text{ GeV}$

Le secteur électro-faible est cohérent et prédictif jusqu'à une échelle d'énergie trop grande pour être (directement) explorée par l'expérience

Après la découverte du boson de Higgs

Contraintes indirectes sur la masse du boson de Higgs



Le secret
d'énergie

le
ce

Juillet 2012 : découverte du boson de Higgs et $m_H = 125 \text{ GeV}$

Le secteur électro-faible est cohérent et prédictif jusqu'à une échelle d'énergie trop grande pour être (directement) explorée par l'expérience

Le MS est incomplet mais :

- il est cohérent et prédictif
- l'énergie où il *échoue* est *inconnue*

Juillet 2012 : découverte du boson de Higgs et $m_H = 125 \text{ GeV}$

Nouvelle stratégie

Mettre en évidence des **anomalies** par l'*expérience* pour les **étudier**

Comment ?

- explorer des énergies encore plus grandes
- analyser des phénomènes/secteurs *singuliers* - à définir

• l'énergie ou l'échelle est inconnue

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

Lepton tau et boson de Higgs

Couplages aux bosons de jauge :

- entièrement déterminés par la [symétrie de jauge](#)

Couplages aux fermions :

- contraints par aucune symétrie : [secteur de Yukawa](#)

Couplages aux bosons de jauge :

- entièrement déterminés par la symétrie de jauge
- recherche de $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron

Couplages aux fermions :

- contraints par aucune symétrie : secteur de Yukawa
- mise en évidence de $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

Couplages aux bosons de jauge :

- entièrement déterminés par la **symétrie de jauge**
- recherche de $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron

Couplages aux fermions :

- contraints par aucune symétrie : **secteur de Yukawa**
- mise en évidence de $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

Difficulté expérimentale : les leptons tau

- désintégrations leptoniques τ_ℓ (35%) et **hadroniques** τ_h (65%)
- forte **contamination des jets** en collisionneur hadronique

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

1. Lepton tau et boson de Higgs

1.1 Motivations et enjeux expérimentaux

1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron

1.3

2. Qui

2.1

2.2

2.3

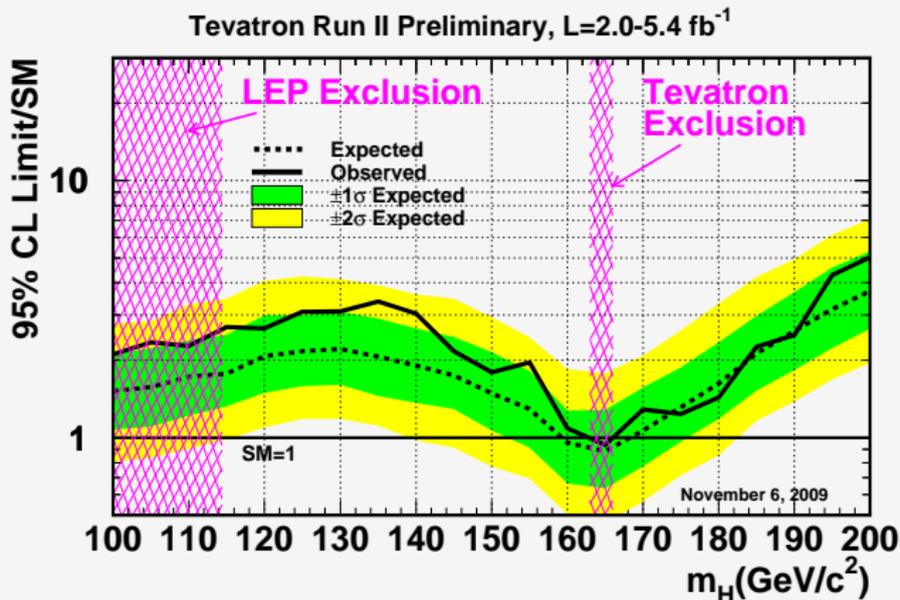
3. Cal

3.1

3.2

3.3

4. Rés



1. Lepton tau et boson de Higgs

1.1 Motivations et enjeux expérimentaux

1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron

1.3

2. Qui

2.1

2.2 FNAL

2.3

ATLAS

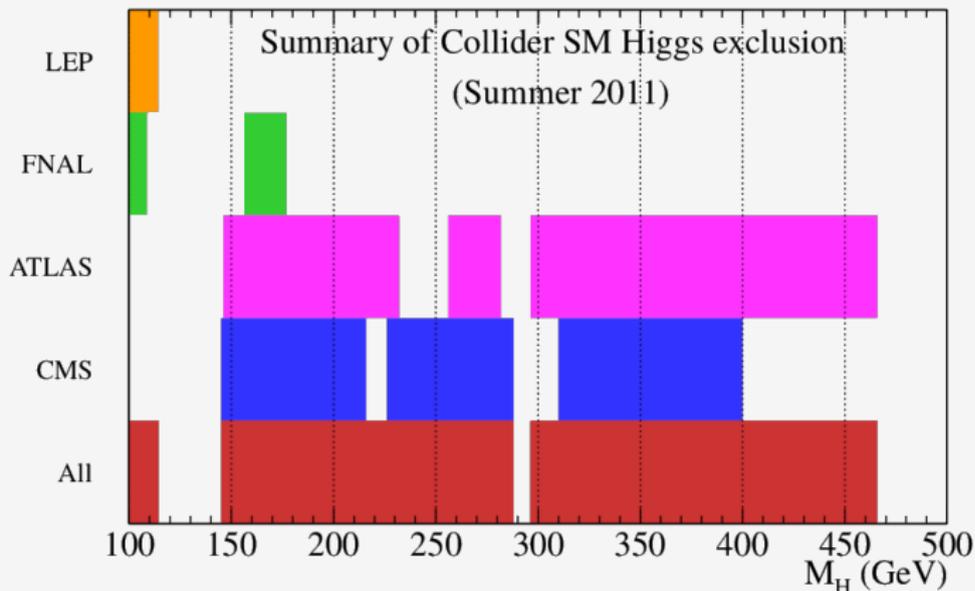
3. Cal

3.1 CMS

3.2

3.3 All

4. Rés



Progression de l'exposé

1. Lepton tau et boson de Higgs

1.1 Moti **De Juillet 2011 à Juillet 2012 ...**

1.2 Coup

1.3 Coup

2. Quark t

2.1 Strat

2.2 Anal

2.3 Vers

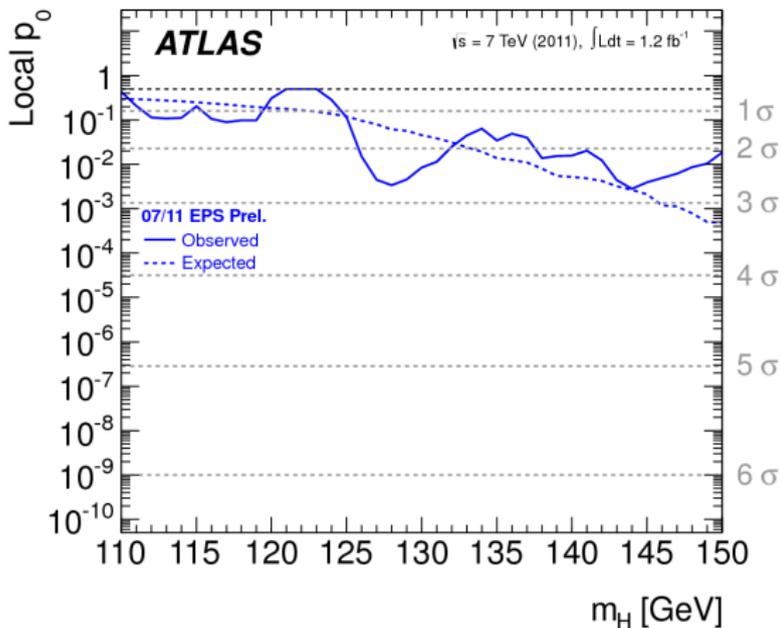
3. Calorim

3.1 Prés

3.2 Élect

3.3 Le p

4. Résumé



vatron

Progression de l'exposé

1. Lepton tau et boson de Higgs

1.1 Moti **De Juillet 2011 à Juillet 2012 ...**

1.2 Coup

1.3 Coup

2. Quark t

2.1 Strat

2.2 Anal

2.3 Vers

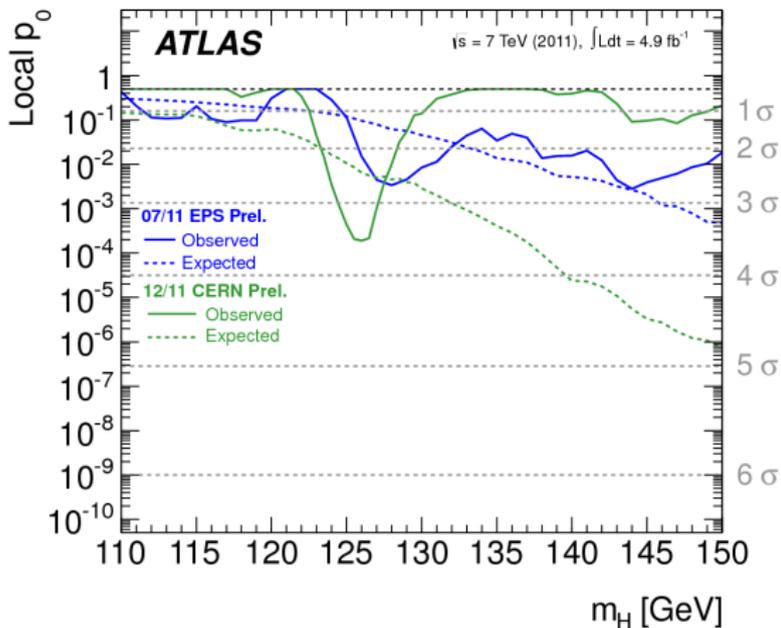
3. Calorim

3.1 Prés

3.2 Élect

3.3 Le p

4. Résumé



vatron

Progression de l'exposé

1. Lepton tau et boson de Higgs

1.1 Moti **De Juillet 2011 à Juillet 2012 ...**

1.2 Coup

1.3 Coup

2. Quark t

2.1 Strat

2.2 Anal

2.3 Vers

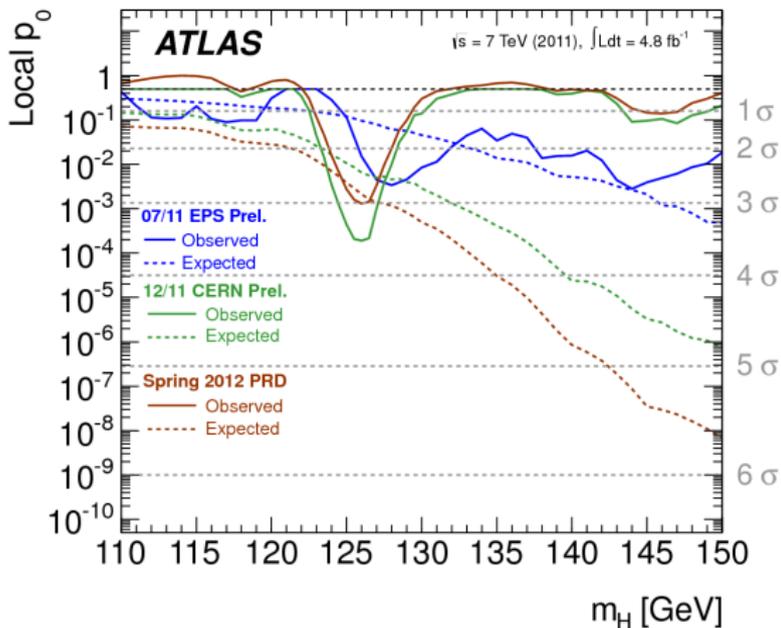
3. Calorim

3.1 Prés

3.2 Élect

3.3 Le p

4. Résumé



vatron

Progression de l'exposé

1. Lepton tau et boson de Higgs

1.1 Moti

1.2 Coup

1.3 Coup

2. Quark t

2.1 Strat

2.2 Anal

2.3 Vers

3. Calorim

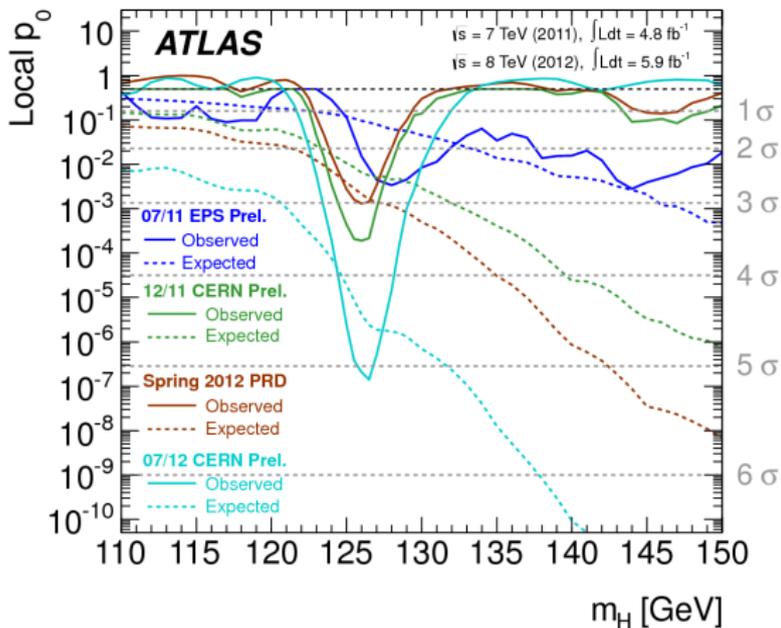
3.1 Prés

3.2 Élect

3.3 Le p

4. Résumé

De Juillet 2011 à Juillet 2012 ...

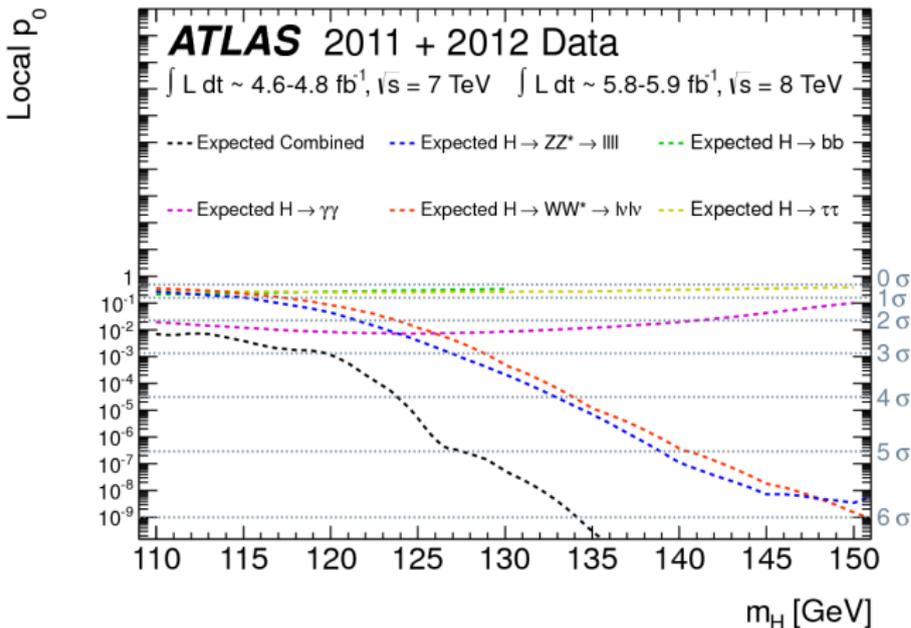


vatron

Progression de l'exposé

1. Lepton tau et boson de Higgs

Découverte basée sur les couplages aux bosons



2. Quant

2.1 S

2.2 A

2.3 V

3. Calor

3.1 F

3.2 E

3.3 L

4. Résu

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

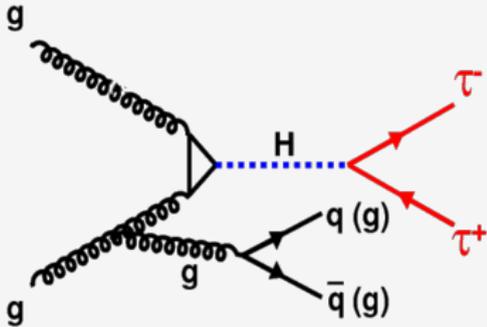
3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

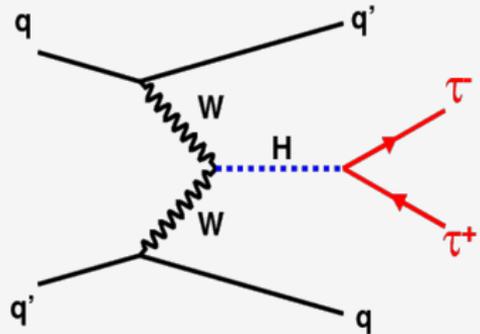
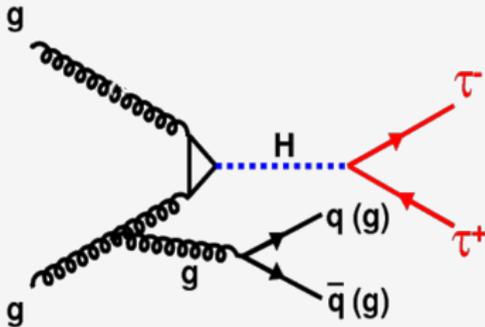
Modes de production et catégorisation

- fusion de gluons (GGF) : $p_T^H \geq 100 \text{ GeV} \rightarrow$ catégorie dite *boostée*



Modes de production et catégorisation

- fusion de gluons (GGF) : $p_T^H \geq 100 \text{ GeV} \rightarrow$ catégorie dite *boostée*
- fusion de bosons vecteurs (VBF) : $|\Delta\eta_{jj}| \geq 2.5 \rightarrow$ catégorie dite *VBF*



Modes de production et catégorisation

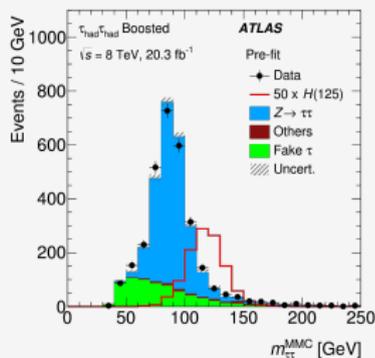
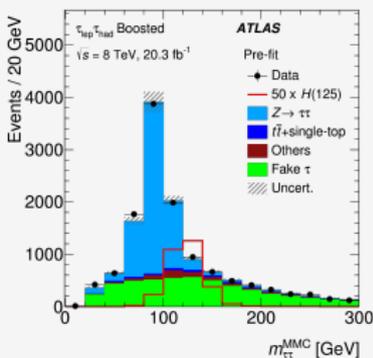
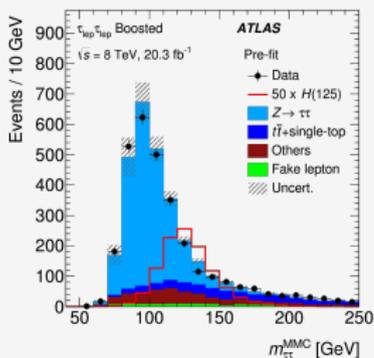
- fusion de gluons (GGF) : $p_T^H \geq 100 \text{ GeV} \rightarrow$ catégorie dite *boostée*
- fusion de bosons vecteurs (VBF) : $|\Delta\eta_{jj}| \geq 2.5 \rightarrow$ catégorie dite *VBF*

Reconstruction de $m_{\tau\tau}$: séparation entre $H \rightarrow \tau\tau$ et $Z \rightarrow \tau\tau$

Modes de production et catégorisation

- fusion de gluons (GGF) : $p_T^H \geq 100 \text{ GeV} \rightarrow$ catégorie dite *boostée*
- fusion de bosons vecteurs (VBF) : $|\Delta\eta_{jj}| \geq 2.5 \rightarrow$ catégorie dite *VBF*

Reconstruction de $m_{\tau\tau}$: séparation entre $H \rightarrow \tau\tau$ et $Z \rightarrow \tau\tau$



Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (CB0) : avant mon arrivée dans le projet

Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (**CB0**) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (**CB1**)

Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (**CB0**) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (**CB1**)
- Optimisations 2 : analyse *multivariée* (**MVA**)

Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (**CB0**) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (**CB1**)
- Optimisations 2 : analyse *multivariée* (**MVA**)

Première phase d'optimisations

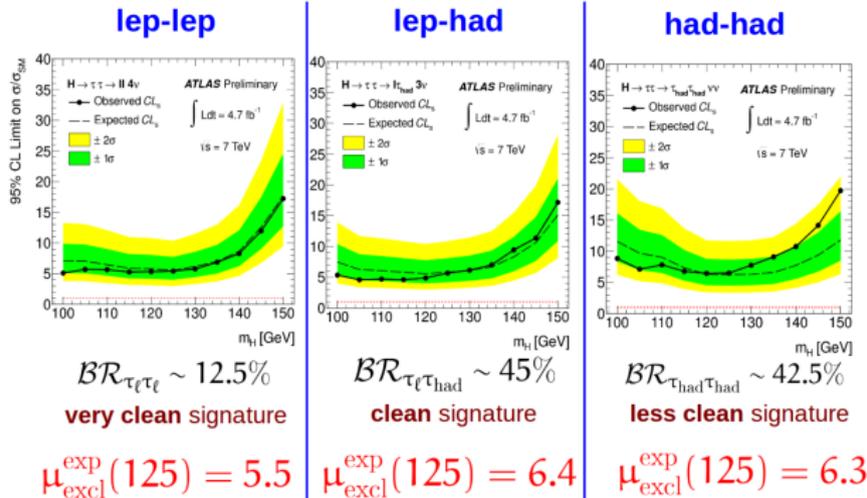
- motivation : sensibilité relative des trois canaux

Les deux phases d'optimisation

Workshop (Mars 2012) : comment améliorer l'analyse de 2011 ?

Higgs search in $\tau\ell\tau_{had}$ channel (VBF)

Motivation 2 : ATLAS vs ATLAS



Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (**CB0**) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (**CB1**)
- Optimisations 2 : analyse *multivariée* (**MVA**)

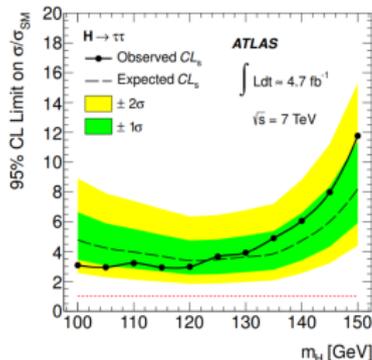
Première phase d'optimisations

- motivation : sensibilité relative des trois canaux
- restructuration profonde des *catégories* (boostée, VBF plus stricte)

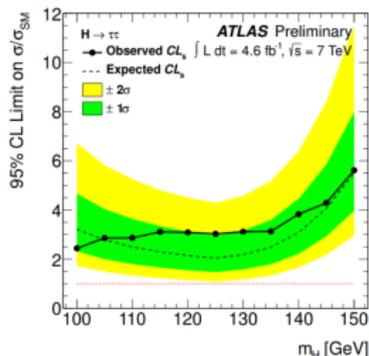
Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (CB0) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (CB1)

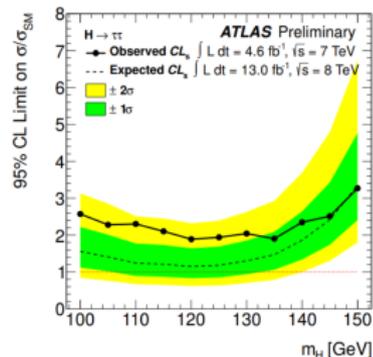
Résultat de la première phase



(a) 2011 : avant optimisations [41]



(b) 2011 : après optimisations [43]



(c) 2011+2012 [43]

Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (**CB0**) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (**CB1**)
- Optimisations 2 : analyse *multivariée* (**MVA**)

Première phase d'optimisations

- motivation : sensibilité relative des trois canaux
- restructuration profonde des *catégories* (boostée, VBF plus stricte)

Deuxième phase d'optimisations

- motivation : **CB1** avec les données 2011-2012 $\rightarrow p_0 \sim 2\sigma$

Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (**CB0**) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (**CB1**)
- Optimisations 2 : analyse *multivariée* (**MVA**)

Première phase d'optimisations

- motivation : sensibilité relative des trois canaux
- restructuration profonde des *catégories* (boostée, VBF plus stricte)

Deuxième phase d'optimisations

- motivation : **CB1** avec les données 2011-2012 $\rightarrow p_0 \sim 2\sigma$
- approche *multivariée* basée sur l'expérience acquise : analyse **MVA**

Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (**CB0**) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (**CB1**)
- Optimisations 2 : analyse *multivariée* (**MVA**)

Première phase d'optimisations

- motivation : sensibilité relative des trois canaux
- restructuration profonde des *catégories* (boostée, VBF plus stricte)

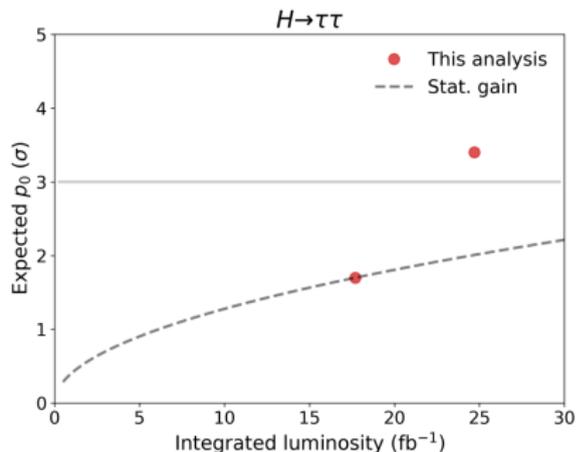
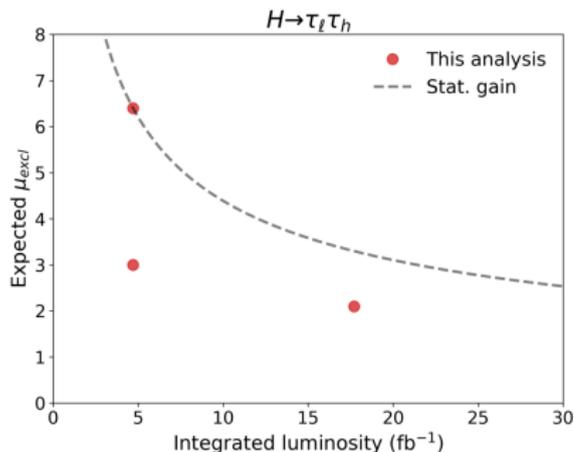
Deuxième phase d'optimisations

- motivation : **CB1** avec les données 2011-2012 $\rightarrow p_0 \sim 2\sigma$
- approche *multivariée* basée sur l'expérience acquise : analyse **MVA**
- *vérifications détaillées* : (1) corrélations (2) biais de $m_{\tau\tau}$

Les deux phases d'optimisation

- Analyse *cut-based 0* (CB0) : avant mon arrivée dans le projet
- Optimisations 1 : analyse *cut-based 1* (CB1)
- Optimisations 2 : analyse *multivariée* (MVA)

Sensibilité finale : $p_0 = 3.4 \sigma$



Résultat : $p_0 = 4.5\sigma$ et un $\mu \equiv \sigma/\sigma_{SM}$ mesuré de

JHEP 04 (2015) 117

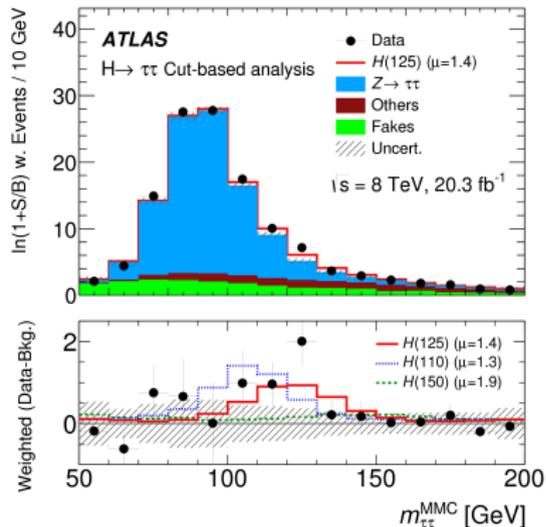
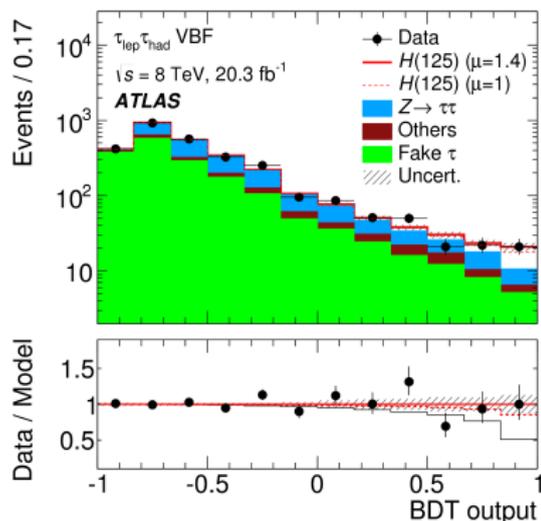
$$\mu = 1.43^{+0.27}_{-0.26} (\text{stat.})^{+0.32}_{-0.25} (\text{syst.}) \pm 0.09 (\text{theo.})$$

Première mise en évidence de $H \rightarrow \tau\tau$

Résultat : $p_0 = 4.5\sigma$ et un $\mu \equiv \sigma/\sigma_{SM}$ mesuré de

JHEP 04 (2015) 117

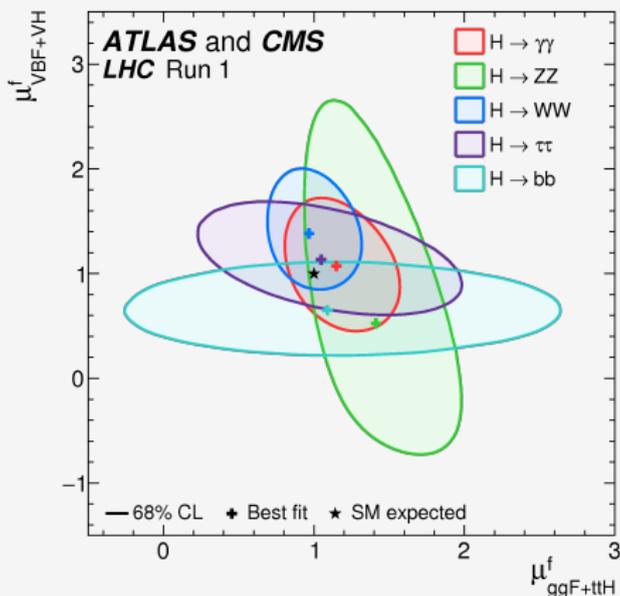
$$\mu = 1.43^{+0.27}_{-0.26} \text{ (stat.) } ^{+0.32}_{-0.25} \text{ (syst.) } \pm 0.09 \text{ (theo.)}$$



Deux conséquences essentielles

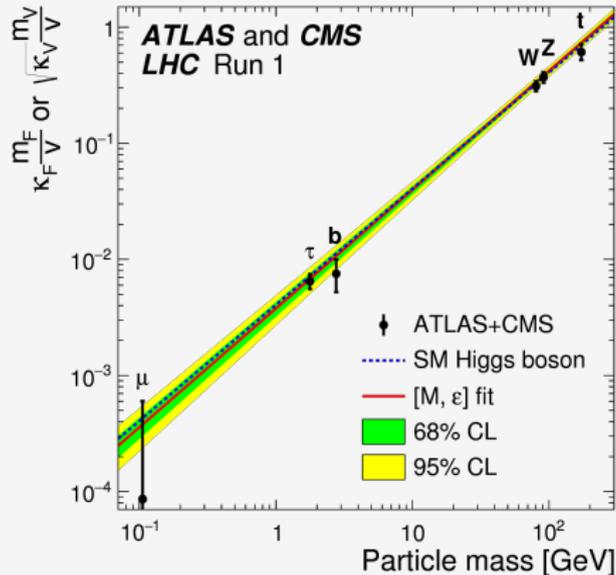
Deux conséquences essentielles

1. une des meilleures contraintes sur VBF (lié aux limites du MS)



Deux conséquences essentielles

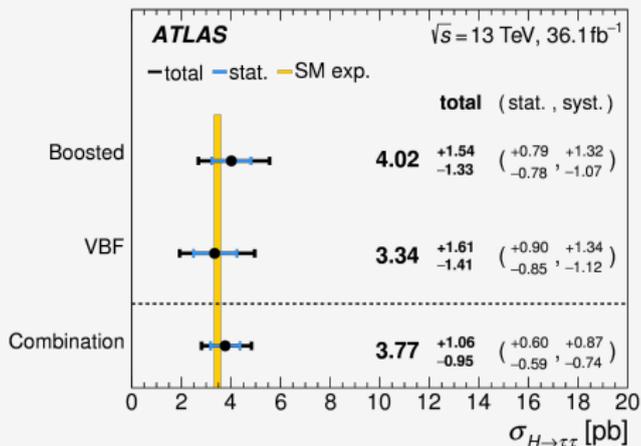
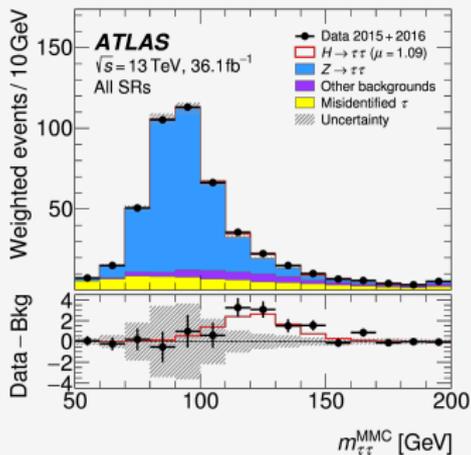
1. une des meilleures **contraintes sur VBF** (lié aux limites du MS)
2. teste la **proportionalité entre masse et couplage** pour les **fermions**



Études de $H \rightarrow \tau\tau$ dans les collisions à 13 TeV

Dernier résultat PRD 99 (2019) 072001

- exploitant 36 fb^{-1} de données (2015+2016)
- catégorisation basée sur les topologies boostée et VBF
- $p_0 = 4.4 \sigma$ (6.4σ combiné à l'analyse Run 1)



Lepton tau et boson de Higgs

– quelques remarques de conclusion –

Quark top et phénomènes nouveaux

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

Notion de masse en théorie quantique des champs

- masse = inertie = propagation : $\mathcal{G}(p)^{-1} \propto p - (m_0 + \Sigma(p))$
- énergie propre $\Sigma(p)$: infinie
- renormalisation : $\tilde{m}_0(\Lambda_{\max}) + \Sigma(p, \Lambda_{\max})$ finie pour $\Lambda_{\max} \rightarrow \infty$

Notion de masse en théorie quantique des champs

- masse = inertie = propagation : $\mathcal{G}(p)^{-1} \propto p - (m_0 + \Sigma(p))$
- énergie propre $\Sigma(p)$: infinie
- renormalisation : $\tilde{m}_0(\Lambda_{\max}) + \Sigma(p, \Lambda_{\max})$ finie pour $\Lambda_{\max} \rightarrow \infty$

Masse du boson de Higgs dans le MS

$$(m_H^{\text{obs}})^2 = (m_H^0)^2 + \Delta_{\text{SM}}^2(\Lambda) \quad \text{avec} \quad \Delta_{\text{SM}}^2 \propto \Lambda^2$$

Si $\Lambda \gg m_H^{\text{obs}}$: ajustement de $(m_H^0)^2$ à une précision de $(m_H^{\text{obs}}/\Lambda)^2$

Notion de masse en théorie quantique des champs

- masse = inertie = propagation : $\mathcal{G}(p)^{-1} \propto p - (m_0 + \Sigma(p))$
- énergie propre $\Sigma(p)$: infinie
- renormalisation : $\tilde{m}_0(\Lambda_{\max}) + \Sigma(p, \Lambda_{\max})$ finie pour $\Lambda_{\max} \rightarrow \infty$

Masse du boson de Higgs dans le MS

$$(m_H^{\text{obs}})^2 = (m_H^0)^2 + \Delta_{\text{SM}}^2(\Lambda) \quad \text{avec} \quad \Delta_{\text{SM}}^2 \propto \Lambda^2$$

Si $\Lambda \gg m_H^{\text{obs}}$: ajustement de $(m_H^0)^2$ à une précision de $(m_H^{\text{obs}}/\Lambda)^2$

→ Quelle importance donner à m_H^0 ?

Notion de masse en théorie quantique des champs

- masse = inertie = propagation : $\mathcal{G}(p)^{-1} \propto p - (m_0 + \Sigma(p))$
- énergie propre $\Sigma(p)$: infinie
- renormalisation : $\tilde{m}_0(\Lambda_{\max}) + \Sigma(p, \Lambda_{\max})$ finie pour $\Lambda_{\max} \rightarrow \infty$

Masse du boson de Higgs dans le MS

$$(m_H^{\text{obs}})^2 = (m_H^0)^2 + \Delta_{\text{SM}}^2(\Lambda) \quad \text{avec} \quad \Delta_{\text{SM}}^2 \propto \Lambda^2$$

Si $\Lambda \gg m_H^{\text{obs}}$: ajustement de $(m_H^0)^2$ à une précision de $(m_H^{\text{obs}}/\Lambda)^2$

→ Quelle importance donner à m_H^0 ?

- si $\Lambda \equiv \Lambda_{\max}$: aucune, $(m_H^0)^2$ diverge (tout comme Δ_{SM}^2)

Notion de masse en théorie quantique des champs

- masse = inertie = propagation : $\mathcal{G}(p)^{-1} \propto p - (m_0 + \Sigma(p))$
- énergie propre $\Sigma(p)$: **infinie**
- **renormalisation** : $\tilde{m}_0(\Lambda_{\max}) + \Sigma(p, \Lambda_{\max})$ finie pour $\Lambda_{\max} \rightarrow \infty$

Masse du boson de Higgs dans le MS

$$(m_H^{\text{obs}})^2 = (m_H^0)^2 + \Delta_{\text{SM}}^2(\Lambda) \quad \text{avec} \quad \Delta_{\text{SM}}^2 \propto \Lambda^2$$

Si $\Lambda \gg m_H^{\text{obs}}$: ajustement de $(m_H^0)^2$ à une précision de $(m_H^{\text{obs}}/\Lambda)^2$

→ Quelle importance donner à m_H^0 ?

- si $\Lambda \equiv \Lambda_{\max}$: *aucune*, $(m_H^0)^2$ diverge (tout comme Δ_{SM}^2)
- si $\Lambda \equiv \Lambda_{\text{NP}}$: *substantielle*, **si on postule une théorie** qui prédit m_H^{obs}

Naturalité (ou ajustement fin) : discussion

Notion de masse en théorie quantique des champs

- masse = inertie = propagation : $\mathcal{G}(p)^{-1} \propto p - (m_0 + \Sigma(p))$
- énergie propre $\Sigma(p)$: infinie

Le principe de naturalité : un guide discutable

- plus une **interprétation** qu'une limitation avérée du MS
- **mais** un argument théorique **effectif**

(...H) (...H) -SM() ... -SM()

Si $\Lambda \gg m_H^{\text{obs}}$: ajustement de $(m_H^0)^2$ à une précision de $(m_H^{\text{obs}}/\Lambda)^2$

→ Quelle importance donner à m_H^0 ?

- si $\Lambda \equiv \Lambda_{\text{max}}$: *aucune*, $(m_H^0)^2$ diverge (tout comme Δ_{SM}^2)
- si $\Lambda \equiv \Lambda_{\text{NP}}$: *substantielle*, **si** on postule une théorie qui *prédit* m_H^{obs}

Les grands concepts

1. ajout de **symétrie(s)** - boson/fermion, boson de goldstone, ...
2. **non-élémentarité** - nouvelle dynamique à haute énergie
3. **dimensions supplémentaires** - émergence naturelle de hiérarchie

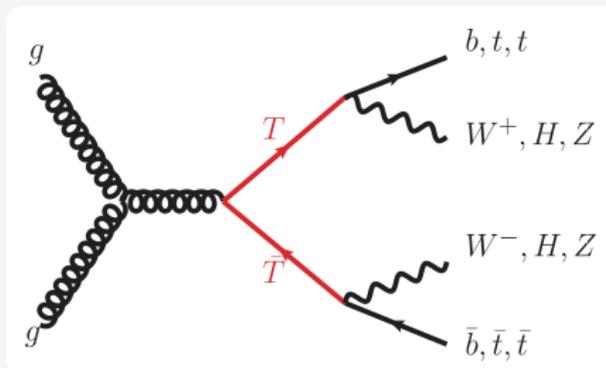
Résoudre le “problème” de naturalité

Les grands concepts

1. ajout de **symétrie(s)** - boson/fermion, boson de goldstone, ...
2. **non-élémentarité** - nouvelle dynamique à haute énergie
3. **dimensions supplémentaires** - émergence naturelle de hiérarchie

Les Vector-Like Quarks (VLQs) : un dénominateur commun

- Q_R et Q_L : même comportement vis-à-vis des **interactions faibles**



1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

Présentation de l'analyse

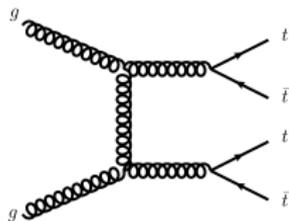
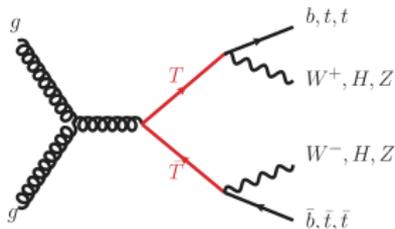
Événements : ≥ 2 leptons (e, μ) de même charge et des jets de quarks b

Avantages : sensible à un large spectre de signaux, peu de fond du MS

Difficulté : les fonds restants sont mal connus et/ou modélisés

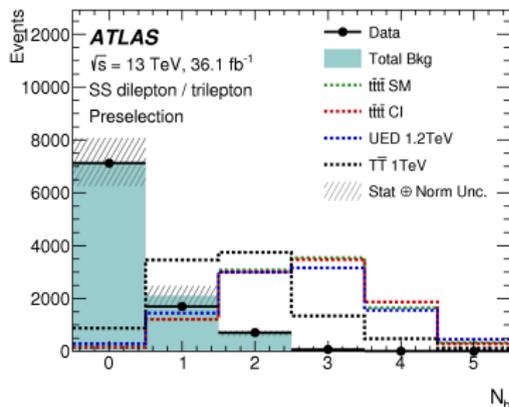
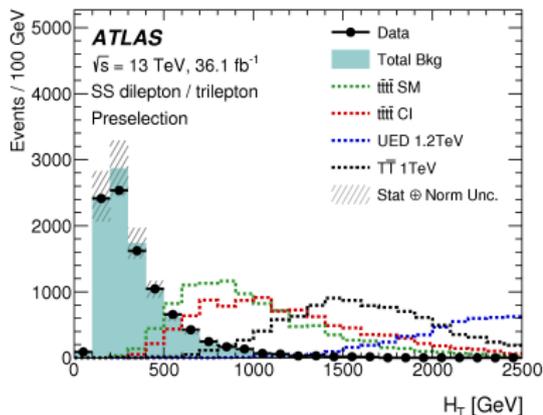
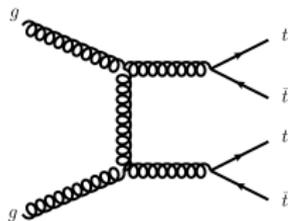
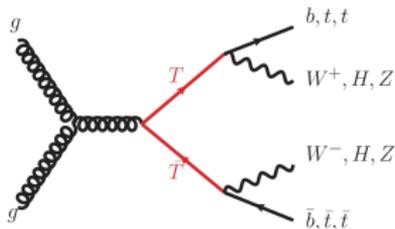
Événements : ≥ 2 leptons (e, μ) de même charge et des jets de quarks b

Topologie des signaux VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$



Événements : ≥ 2 leptons (e, μ) de même charge et des jets de quarks b

Topologie des signaux VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$



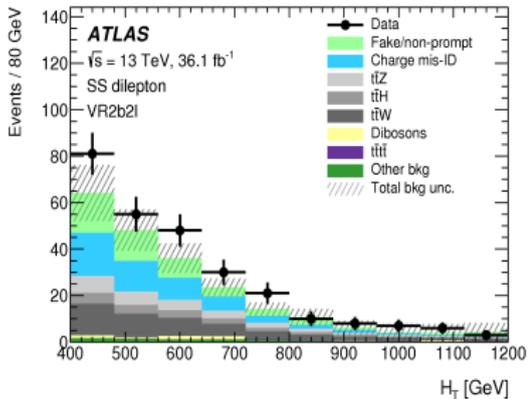
Présentation de l'analyse

Événements : ≥ 2 leptons (e, μ) de même charge et des jets de quarks b

Avantages : sensible à un large spectre de signaux, peu de fond du MS

Difficulté : les fonds restants sont mal connus et/ou modélisés

$$H_T \equiv \sum_{\ell, j} |\vec{p}_T|$$



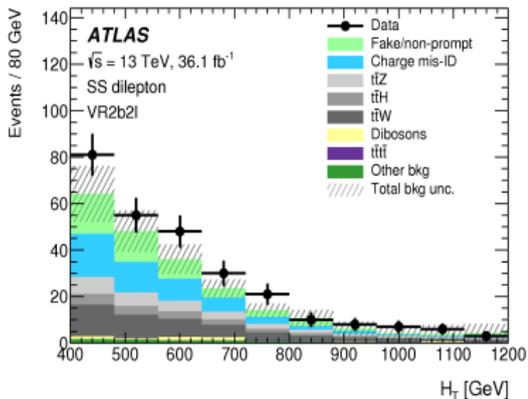
Présentation de l'analyse

Événements : ≥ 2 leptons (e, μ) de même charge et des jets de quarks b

Avantages : sensible à un large spectre de signaux, peu de fond du MS

Difficulté : les fonds restants sont mal connus et/ou modélisés

$$H_T \equiv \sum_{\ell, j} |\vec{p}_T|$$



Bruits de fonds

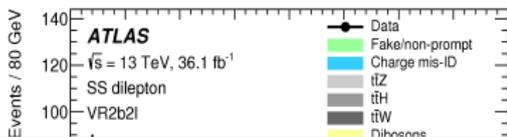
- *non-prompt* (quark b , $\gamma \rightarrow \ell^\pm \ell^\mp$)
- *fake* ($j \rightarrow \ell$)
- mauvaise identification de charge

Événements : ≥ 2 leptons (e, μ) de même charge et des jets de quarks b

Avantages : sensible à un large spectre de signaux, peu de fond du MS

Difficulté : les fonds restants sont mal connus et/ou modélisés

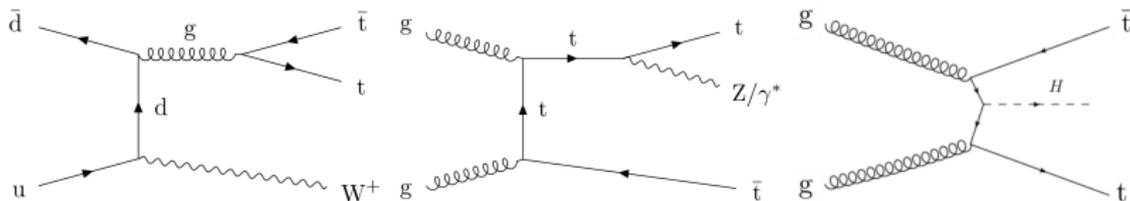
$$H_T \equiv \sum_{\ell, j} |\vec{p}_T|$$



Bruits de fonds

- *non-prompt* (quark $b, \gamma \rightarrow \ell^\pm \ell^\mp$)
- *fake* ($j \rightarrow \ell$)
- mauvaise identification de charge
- $t\bar{t} + W/Z/H$ (+ radiations)

Bruits de fond physiques



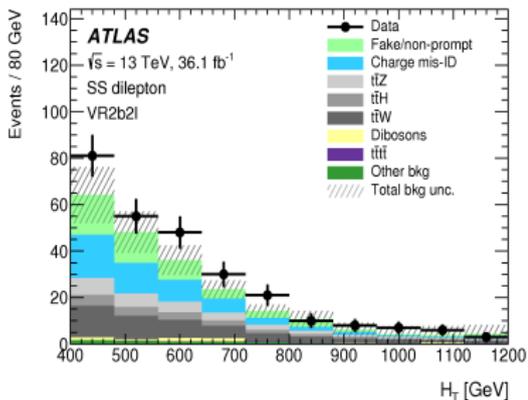
Présentation de l'analyse

Événements : ≥ 2 leptons (e, μ) de même charge et des jets de quarks b

Avantages : sensible à un large spectre de signaux, peu de fond du MS

Difficulté : les fonds restants sont mal connus et/ou modélisés

$$H_T \equiv \sum_{\ell, j} |\vec{p}_T|$$



Bruits de fonds

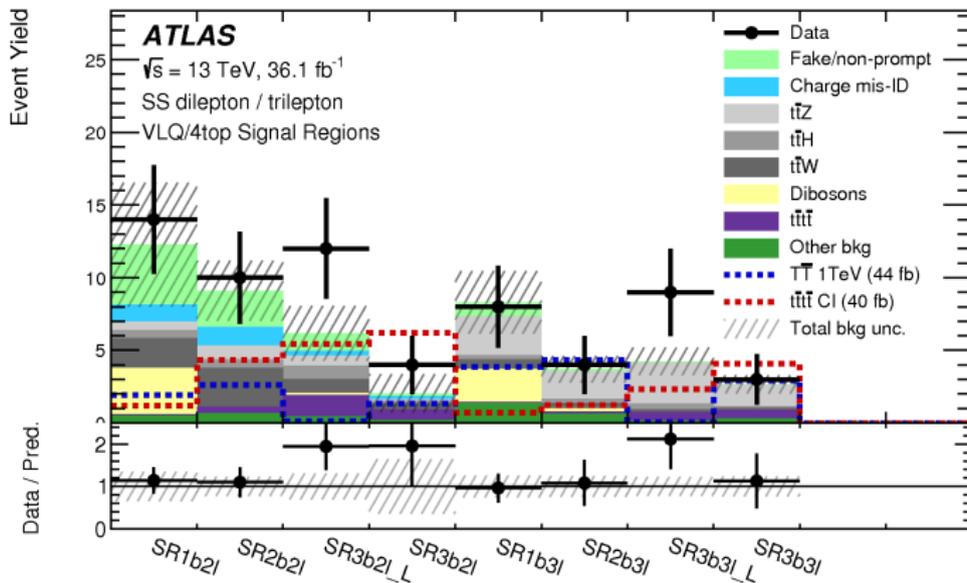
- *non-prompt* (quark $b, \gamma \rightarrow \ell^\pm \ell^\mp$)
- *fake* ($j \rightarrow \ell$)
- mauvaise identification de charge
- $t\bar{t} + W/Z/H$ (+ radiations)

Extraction du signal

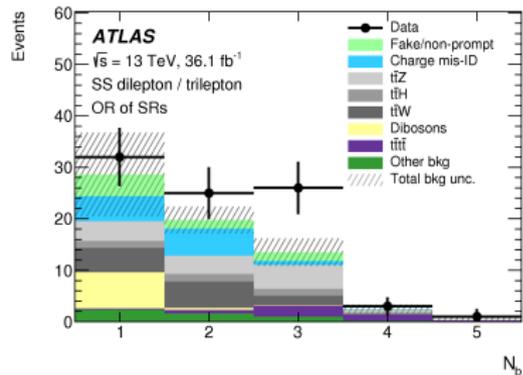
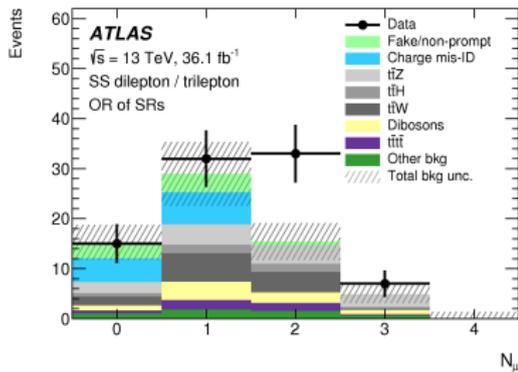
- approche "cut & count"
- variables principales : N_b, H_T
- compromis sensibilité/généralité

Régions de signal

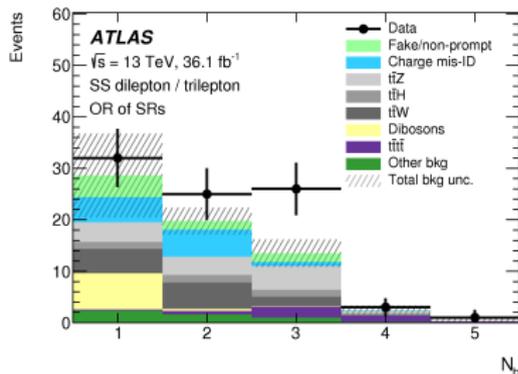
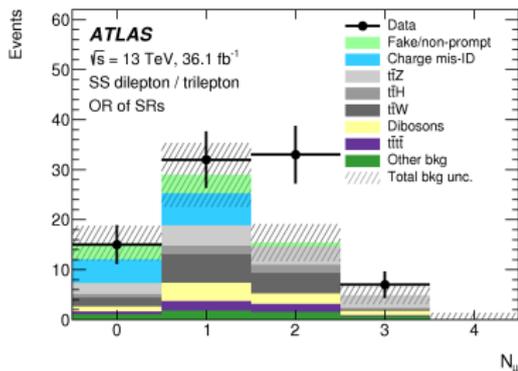
excès de $1.8 - 3.0 \sigma$ selon les régions/signaux



Topologie de l'excès



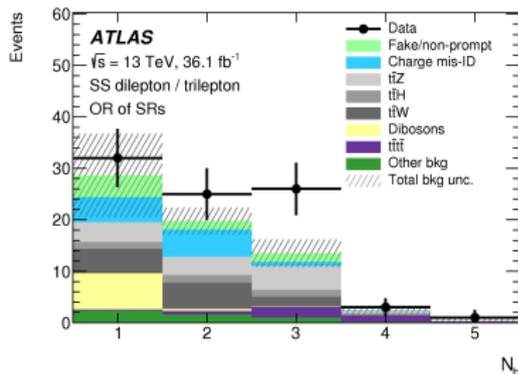
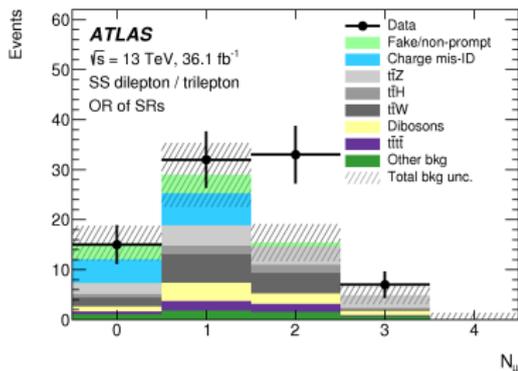
Topologie de l'excès



Vérification de ~ 15 points (reconstruction, $t\bar{t}V$, fonds instrumentaux)

Excès similaires observés dans plusieurs autres analyses

Topologie de l'excès



Vérification de ~ 15 points (reconstruction, $t\bar{t}V$, fonds instrumentaux)

Excès similaires observés dans plusieurs autres analyses

Contraintes obtenues :

- VLQ : $m_T \geq 1.1 \text{ TeV}$; combinaison ATLAS : $m_T \geq 1.3 \text{ TeV}$
- $t\bar{t}\bar{t}$: exclusion (attendue) de $\sim 6(3) \times \sigma_{\text{SM}}$

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm\ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

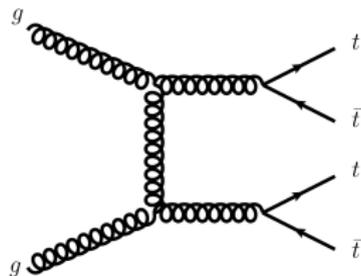
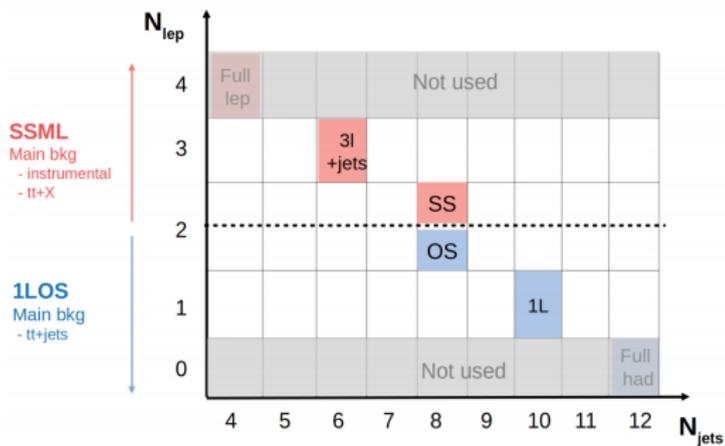
3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

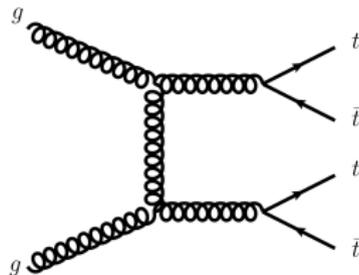
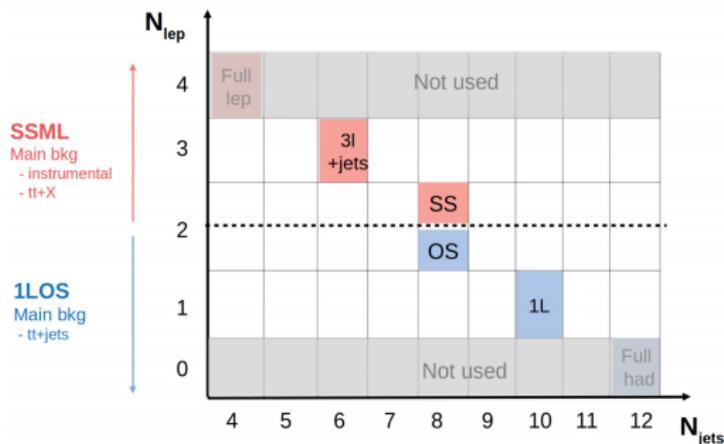
Stratégie générale de recherche

Minimal tttt partonic signature and channel definition



Stratégie générale de recherche

Minimal tttt partonic signature and channel definition

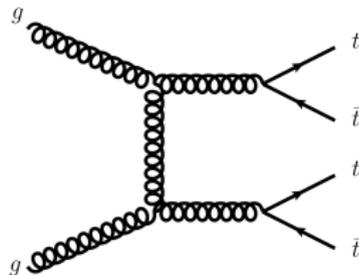
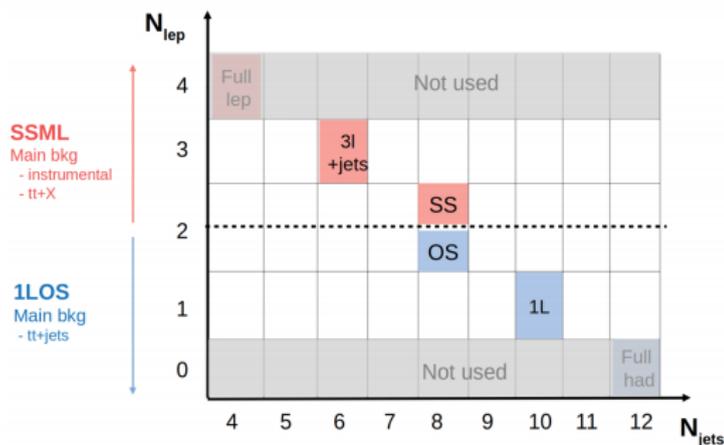


Analyses actuelles

- SS+ML : sous-optimale
- 1L+OS : optimale
- comb : $p_0 = 2.8(1.0)\sigma$

Stratégie générale de recherche

Minimal tttt partonic signature and channel definition



Analyses actuelles

- SS+ML : sous-optimale
- 1L+OS : optimale
- comb : $p_0 = 2.8(1.0)\sigma$

Analyse du Run 2 (en cours)

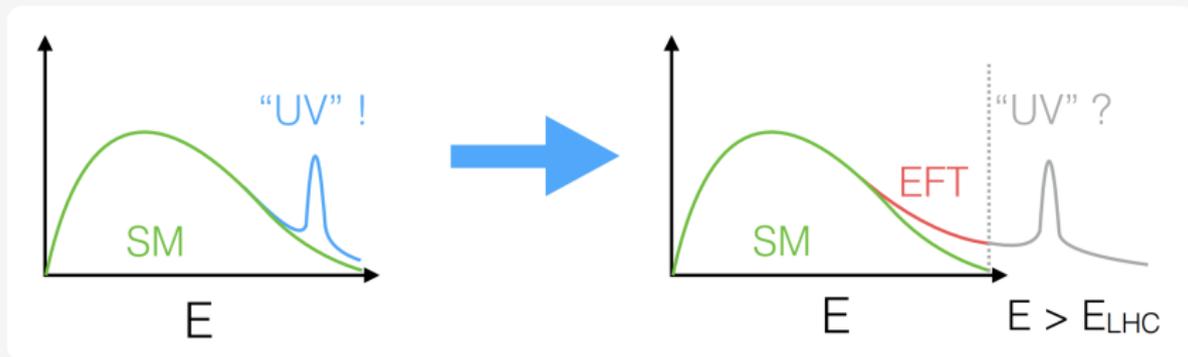
- projection naïve 135 fb^{-1} : $p_0 \sim 2\sigma$
- optimisation/consolidation
- objectif : 3σ

Quark top et phénomènes nouveaux

– quelques remarques et perspectives –

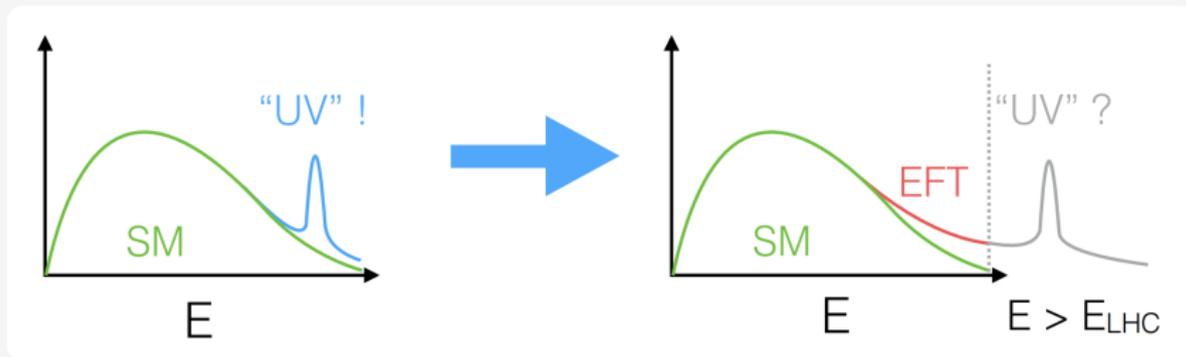
Perspective : recherche d'anomalies indirecte

Illustration de K. Mimasu (IRN Terascale 2018)



Perspective : recherche d'anomalies indirecte

Illustration de K. Mimasu (IRN Terascale 2018)



Programme de recherche mesure de précision

- corrélation de spin dans $pp \rightarrow t\bar{t}$ Run 1 : JHEP 03 (2017) 113
- contraintes génériques dans le contexte d'une théorie effective du MS

Calorimétrie à tuiles scintillantes

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

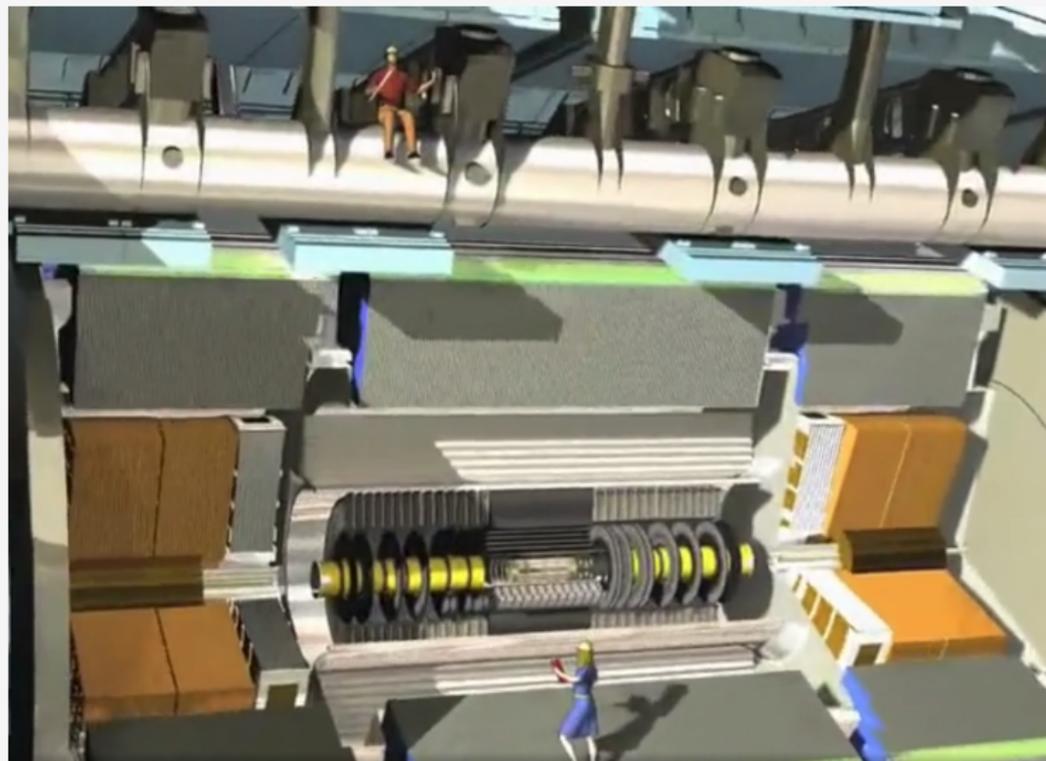
- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm \ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

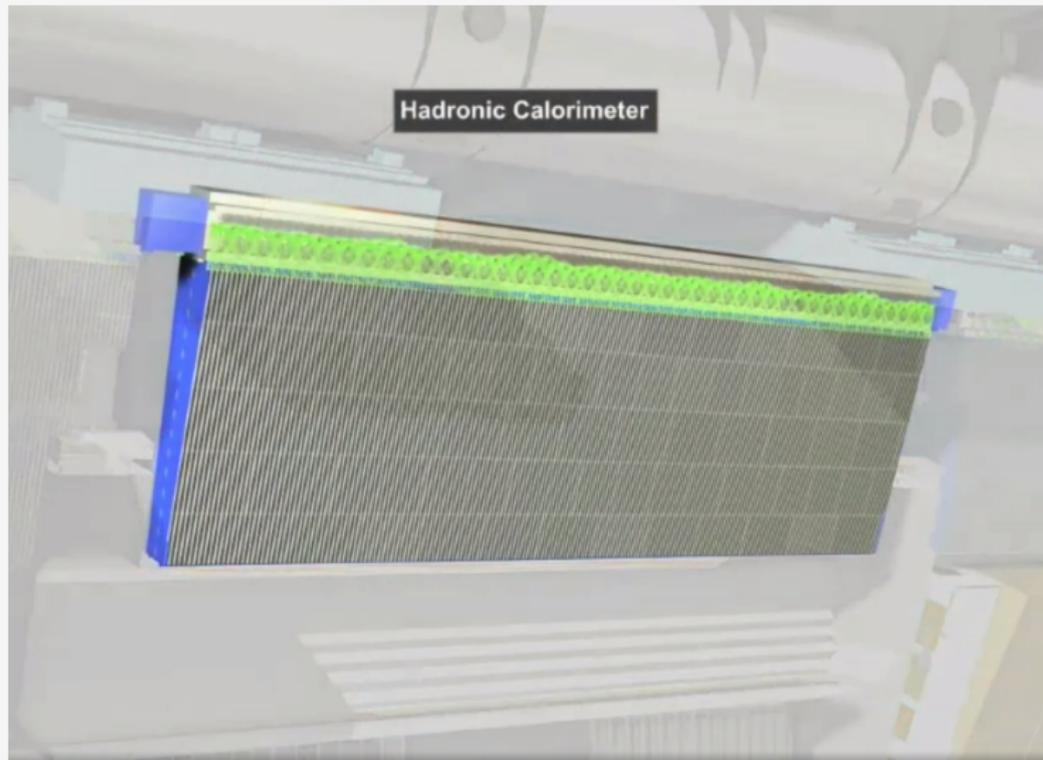
- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

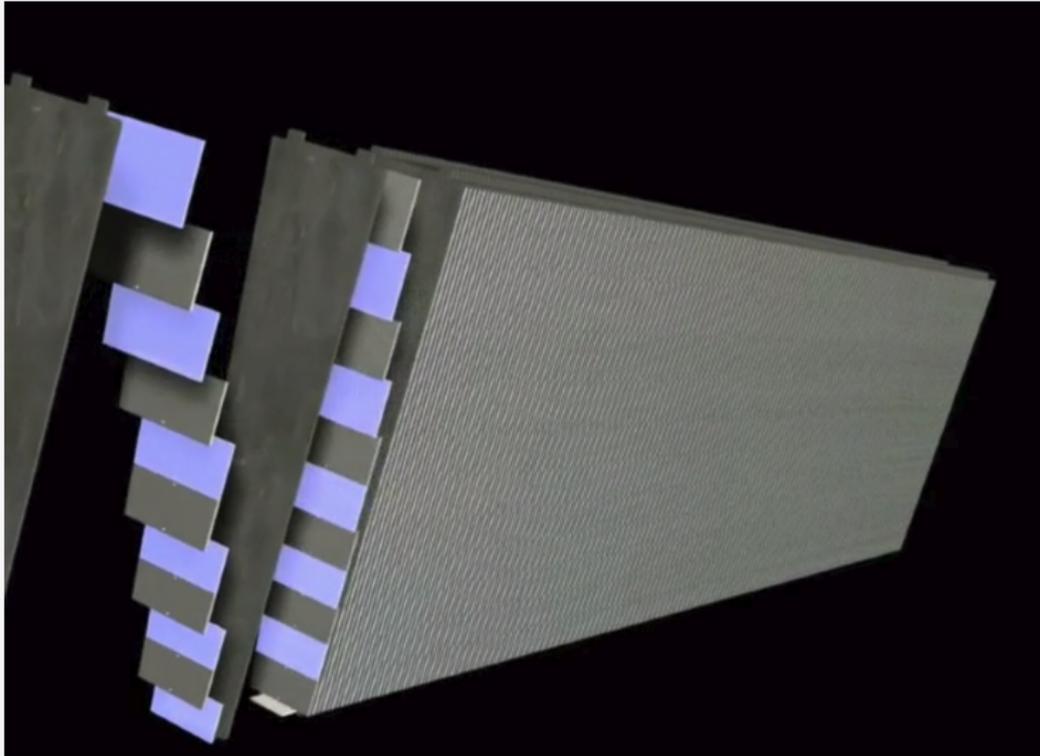
Le calorimètre à tuiles



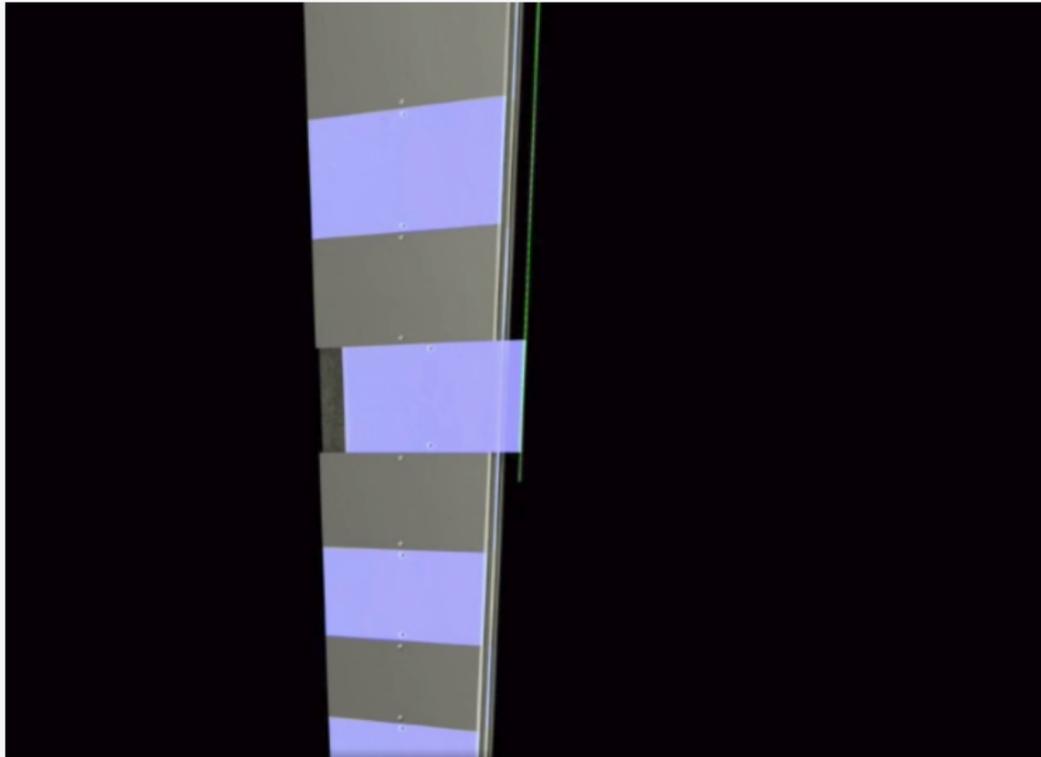
Le calorimètre à tuiles



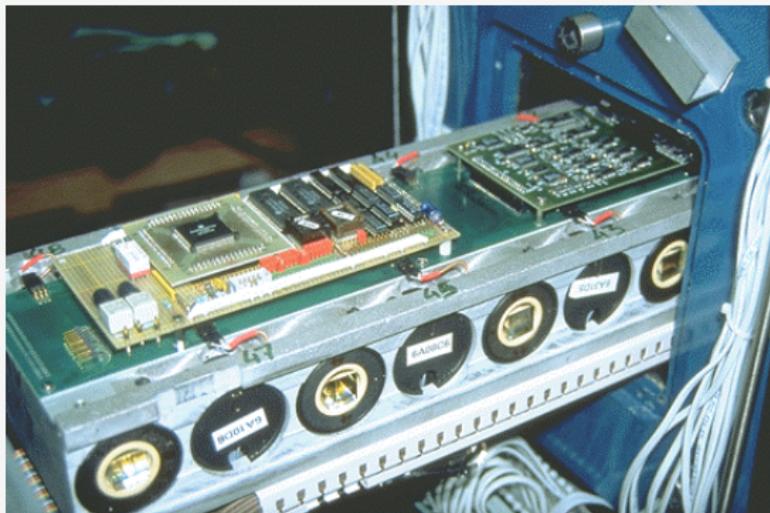
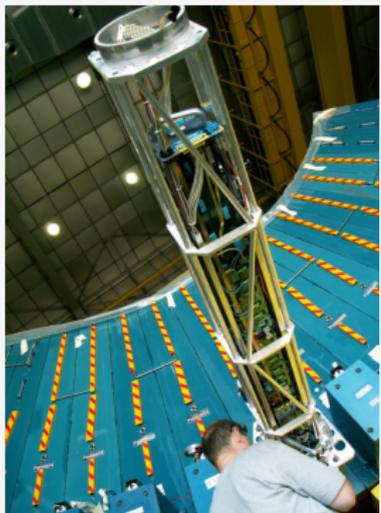
Le calorimètre à tuiles



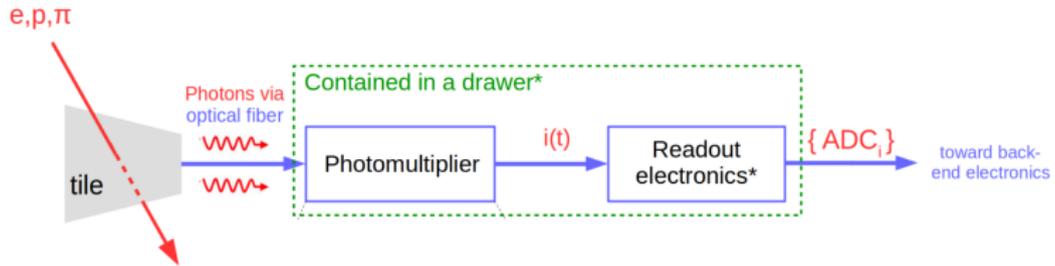
Le calorimètre à tuiles



Le calorimètre à tuiles



Chaîne de mesure

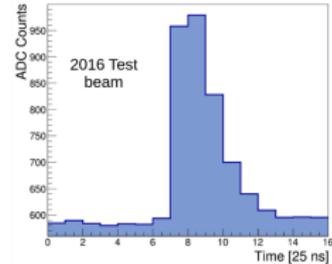
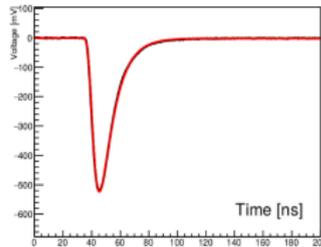
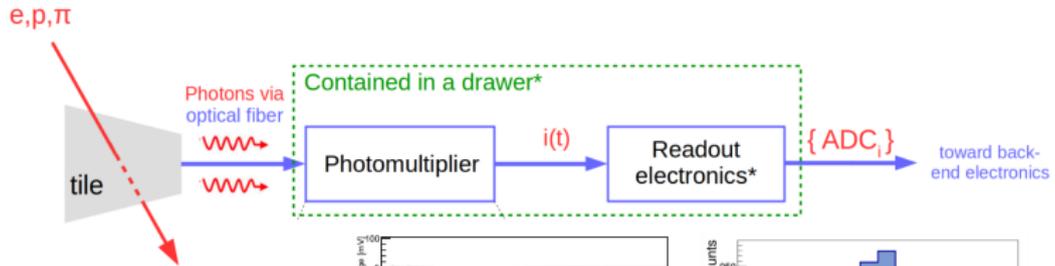


Les étapes clés :

1. lecture et traitement du signal électrique

Du signal calorimétrique aux objets physiques

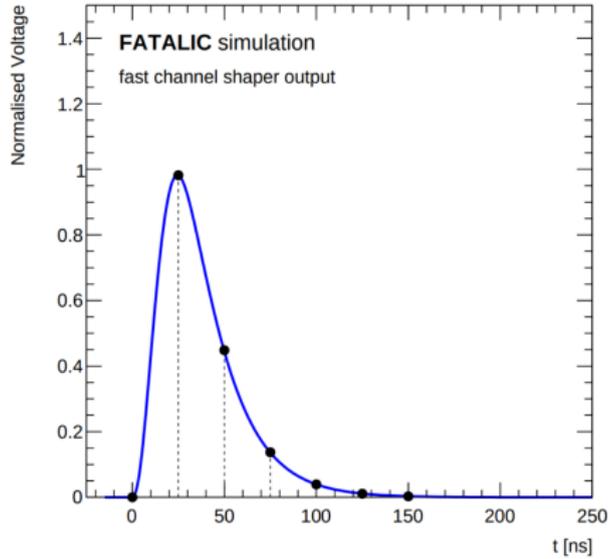
Chaîne de mesure



Les étapes clés :

1. lecture et traitement du signal électrique

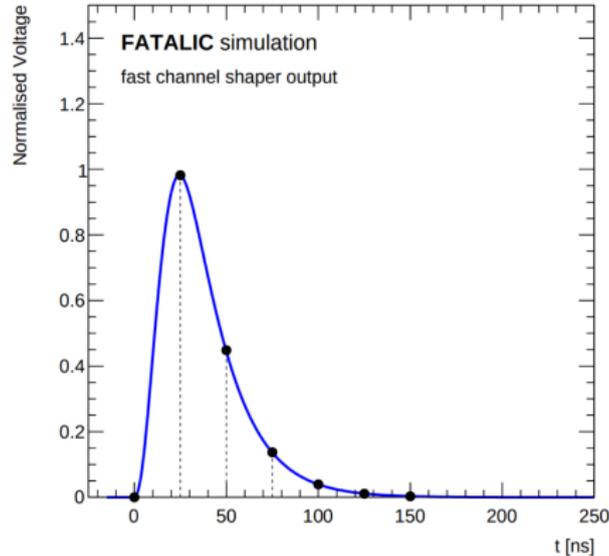
Du signal calorimétrique aux objets physiques



Les étapes clés :

1. lecture et traitement du signal électrique
2. reconstruction de l'énergie de la cellule

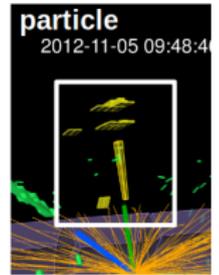
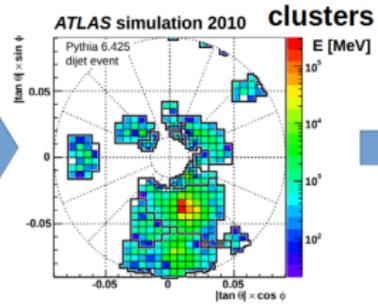
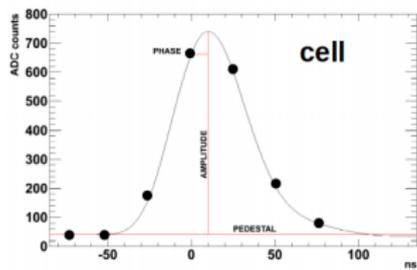
Du signal calorimétrique aux objets physiques



Les étapes clés :

1. lecture et traitement du signal électrique
2. reconstruction de l'énergie de la cellule → effet des collisions adjacentes !

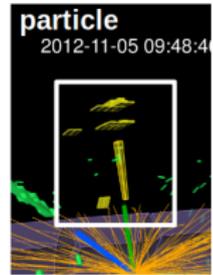
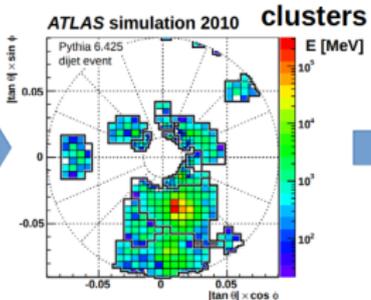
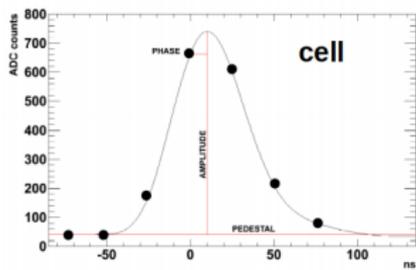
Du signal calorimétrique aux objets physiques



Les étapes clés :

1. lecture et traitement du signal électrique
2. reconstruction de l'énergie de la cellule → effet des collisions adjacentes !
3. cellules → *topo-clusters* → objets physiques

Du signal calorimétrique aux objets physiques



Les étapes clés :

1. lecture et traitement du signal électrique
2. reconstruction de l'énergie de la cellule
3. cellules \rightarrow *topo-clusters* \rightarrow objets physiques

- 1 PhD, 2 post-doc
- 1 PhD
- 1 PhD, COFECUB

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

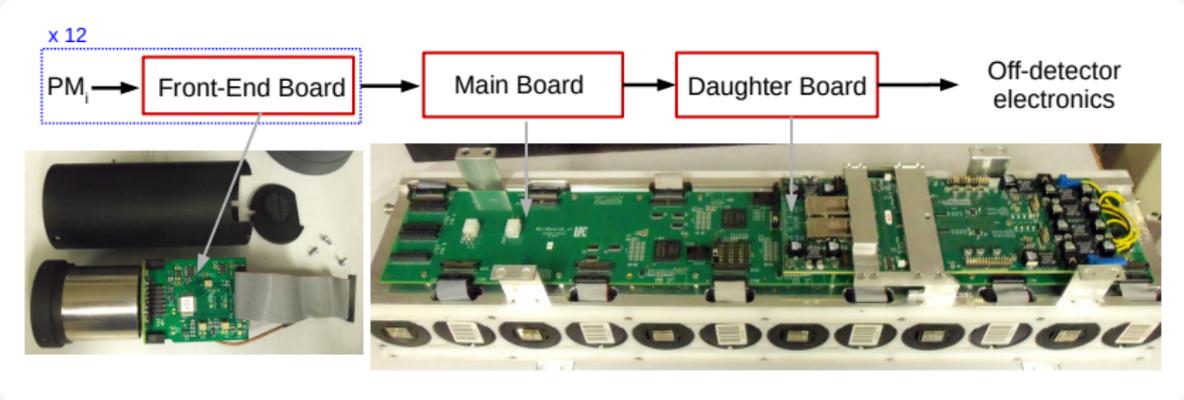
- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm \ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

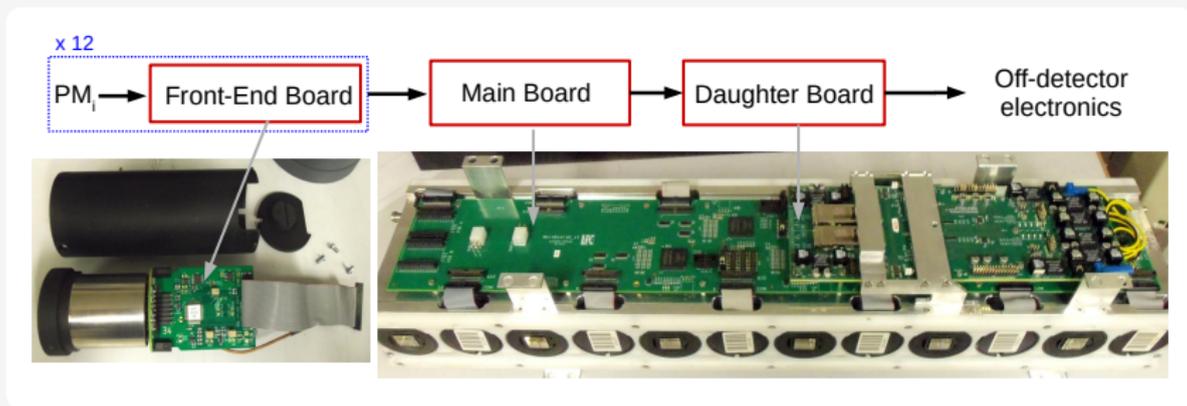
3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

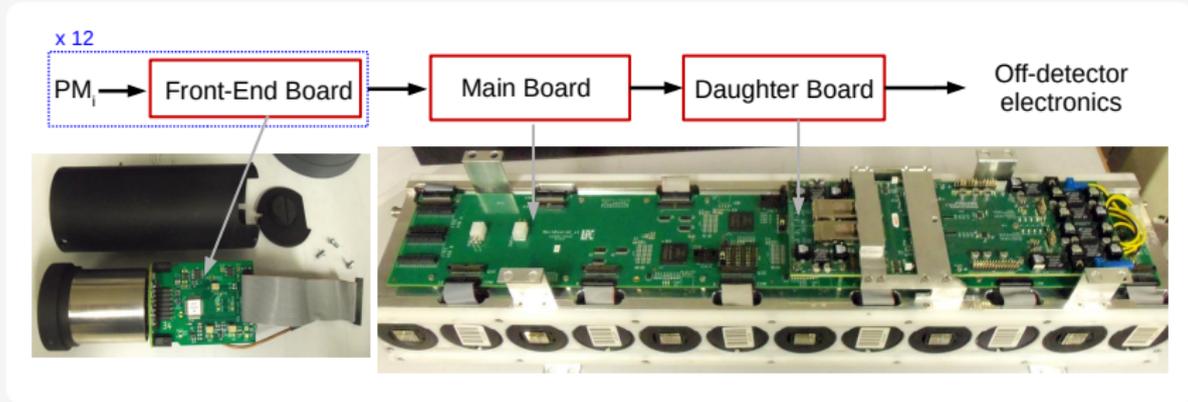
Le contexte





Rôles principaux

1. voie rapide ($\Delta t \sim 25$ ns) : charge (25 fC – 1 nC), linéarité $\leq 1\%$
2. voie lente ($\Delta t \sim 10$ ms) : courant (1 – 150 nA), précision ~ 0.5 nA
3. système d'étalonnage des deux voies



Rôles principaux

1. voie rapide ($\Delta t \sim 25$ ns) : charge (25 fC – 1 nC), linéarité $\leq 1\%$
2. voie lente ($\Delta t \sim 10$ ms) : courant (1 – 150 nA), précision ~ 0.5 nA
3. système d'étalonnage des deux voies

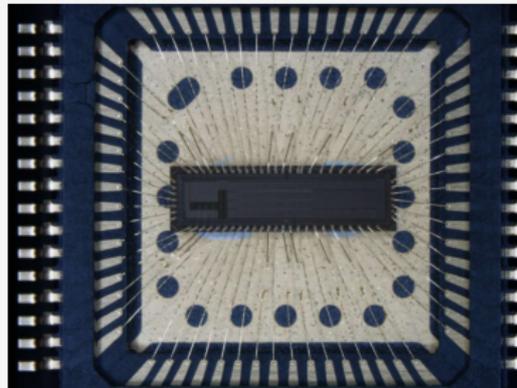
Trois options concurrentes :

→ *3in1* (Chicago), *QIE* (Argonne), *FATALIC* (Clermont)

FATALIC, une vue d'ensemble

FATALIC : ASIC faisant mise en forme et numérisation du signal

JINST 13 P12013

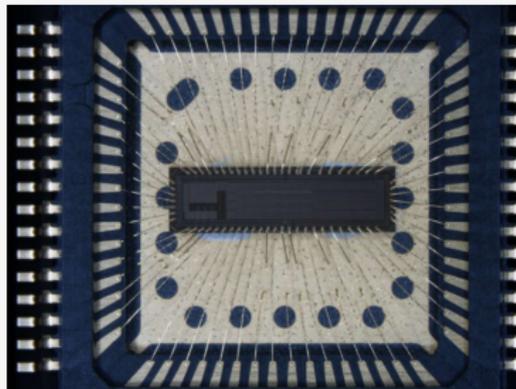


- principe : 3 gains avec sélection *dynamique* (juste 2 sorties possibles)

FATALIC, une vue d'ensemble

FATALIC : ASIC faisant mise en forme et numérisation du signal

JINST 13 P12013

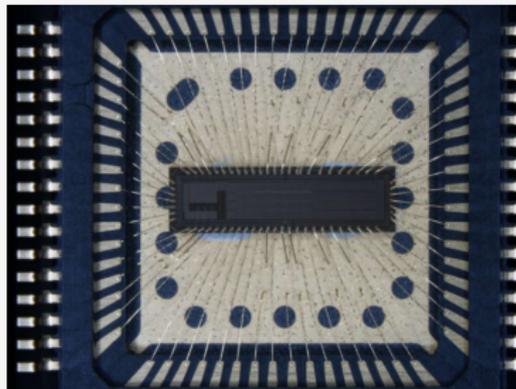


- **principe** : 3 gains avec *sélection dynamique* (juste 2 sorties possibles)
- **voie rapide** : faible bruit (~ 6 fC) et bonne linéarité ✓
- **voie lente** : précision de 6.6 nA, pour une spécification de 0.5 nA ✗

FATALIC, une vue d'ensemble

FATALIC : ASIC faisant mise en forme et numérisation du signal

JINST 13 P12013



- **principe** : 3 gains avec *sélection dynamique* (juste 2 sorties possibles)
- **voie rapide** : faible bruit (~ 6 fC) et bonne linéarité ✓
- **voie lente** : précision de 6.6 nA, pour une spécification de 0.5 nA ✗

Option **non sélectionnée** par la collaboration

1. Lepton tau et boson de Higgs

- 1.1 Motivations et enjeux expérimentaux
- 1.2 Couplage aux bosons de jauge : $H \rightarrow WW^* \rightarrow \tau\nu_\tau \mu\nu_\mu$ au Tevatron
- 1.3 Couplage aux fermions : $H \rightarrow \tau\tau$ au LHC

2. Quark top et recherche de phénomènes nouveaux

- 2.1 Stratégie de recherche
- 2.2 Analyse $\ell^\pm \ell^\pm$: VLQs et $t\bar{t}\bar{t}$
- 2.3 Vers la première mise en évidence de $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

3. Calorimétrie à tuiles scintillantes pour le HL-LHC

- 3.1 Présentation du calorimètre
- 3.2 Électronique de lecture embarquée
- 3.3 Le projet FATALIC

4. Résumé et perspectives

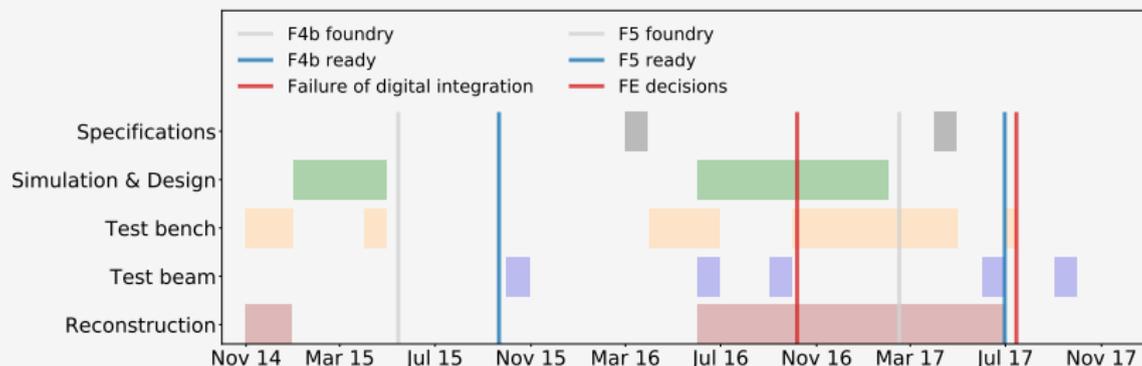
Quelques chiffres clés

- dates : début en **2008**, arrivée fin 2014, **coordination de 2015 à 2018**
- production : **4** notes internes (revues), **4** conférences, **1** article
- encadrement : **2** doctorants, **2** post-doctorants
- **5** tests en faisceaux au CERN

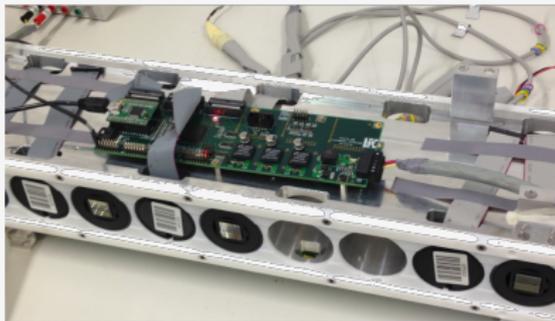
Quelques chiffres clés

- dates : début en **2008**, arrivée fin 2014, **coordination de 2015 à 2018**
- production : **4** notes internes (revues), **4** conférences, **1** article
- encadrement : **2** doctorants, **2** post-doctorants
- **5** tests en faisceaux au CERN

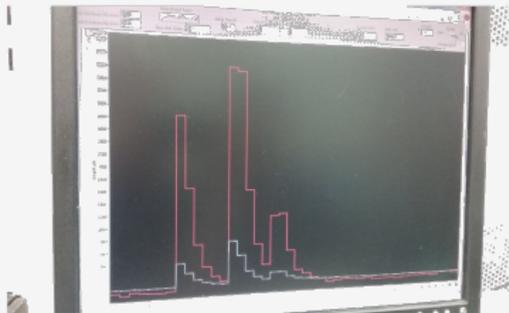
Chronologie depuis mon arrivée - premier prototype FATALIC4 (F4)





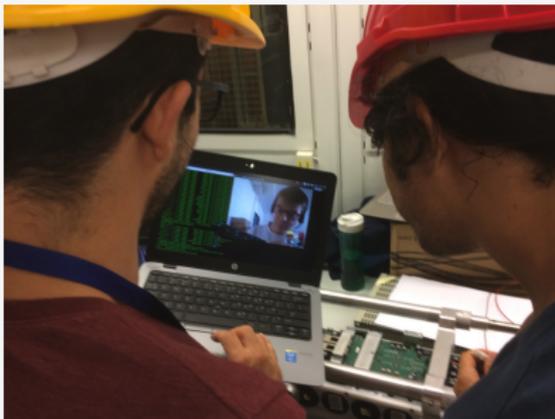


(a) Carte mère simplifiée (*Proto Main-Board*)

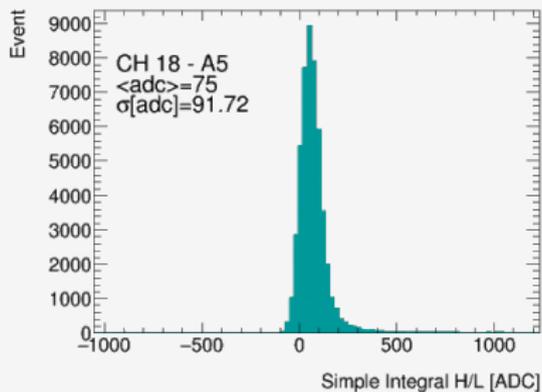


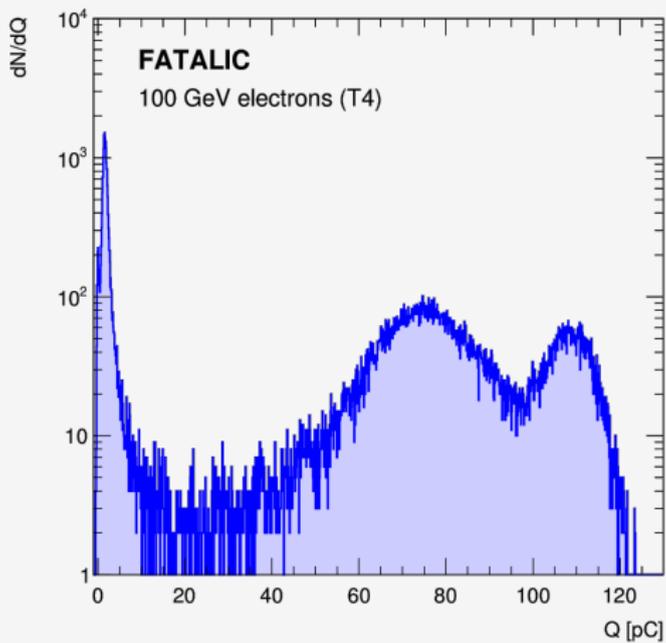
(b) Premières impulsions numériques

Tests en faisceaux – Juin & Septembre 2016



Tests en faisceaux – Juin & Septembre 2016





Calorimétrie à tuiles scintillantes

– quelques enseignements –

LPC responsable de production/qualification de l'option adoptée *3in1*

- prise en main du design, modifications mineures, tests
- impliqué de 2018 à 2019

À partir de 2020 : implication dans *High-Granularity Timing Detector*

- développements et tests de l'électronique
- impact de possibles imperfections sur les objets
- étalonnage de la référence de temps

Résumé et perspectives

2008-2011 : Thèse - CEA - DØ (Tevatron)

$H \rightarrow WW^*$

2011-2014 : Post-doctorat - Freiburg - ATLAS (LHC)

$H \rightarrow \tau\tau$

2014-auj : Chercheur CNRS - LPC - ATLAS (LHC)

Top, Calo

2008-2011 : Thèse - CEA - DØ (Tevatron)

$H \rightarrow WW^*$

2011-2014 : Post-doctorat - Freiburg - ATLAS (LHC)

$H \rightarrow \tau\tau$

2014-auj : Chercheur CNRS - LPC - ATLAS (LHC)

Top, Calo

Autres activités

- Enseignement (2008 \rightarrow 2014, reprise 2019) :
 - classes prépa, école d'ingénieur, université
 - L1 \rightarrow M2
 - TP, TD, cours
- Communication (2015 - auj) :
 - co-écriture d'un livre sur le boson de Higgs
 - séminaire associé (classes prépa, labos, universités)

Le constat : le Modèle Standard est

- théoriquement cohérent et prédictif - bien au-delà de nos moyens expérimentaux
- pourtant *incomplet*

Perspective : vers une théorie au-delà du MS ?

Le constat : le Modèle Standard est

- théoriquement cohérent et prédictif - bien au-delà de nos moyens expérimentaux
- pourtant *incomplet*

Structure des révolutions scientifiques (Kuhn, 1962)

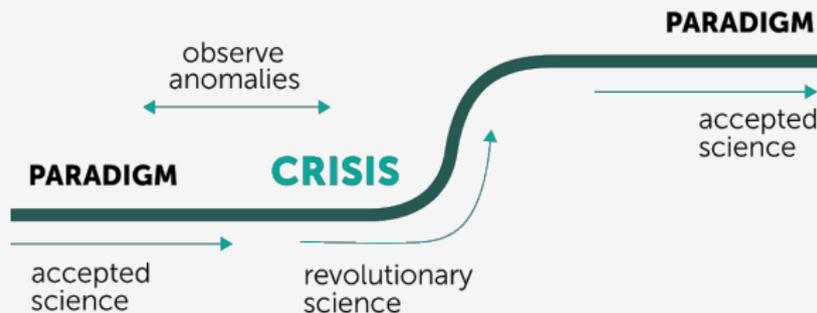


Illustration de edtosavetheworld.com

Perspective : vers une théorie au-delà du MS ?

Le constat : le Modèle Standard est

- théoriquement cohérent et prédictif - bien au-delà de nos moyens expérimentaux
- pourtant *incomplet*

Structure des révolutions scientifiques (Kuhn, 1962)

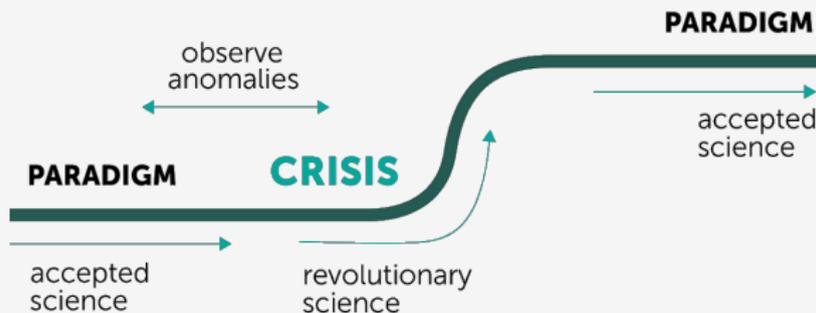


Illustration de edtosavetheworld.com

À moyen terme : tester des effets de plus en plus fins de la théorie

1. mesures de précision dans le secteur du quark top
2. améliorer le détecteur pour HL-LHC

Perspective : vers une théorie au-delà du MS ?

Le constat : le Modèle Standard est

- théoriquement cohérent et prédictif - bien au-delà de nos moyens expérimentaux
- pourtant *incomplet*

Structure des révolutions scientifiques (Kuhn, 1962)

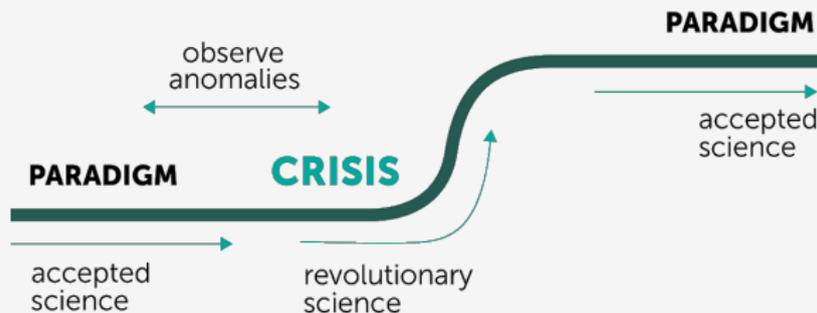


Illustration de edtosavetheworld.com

À long terme : pertinence de l'approche "montée en énergie"?

- projets d'envergure croissante : jusqu'où ?
- nouvelles approches et méthodes nécessaires

Merci pour votre attention !

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$
2. test statistique : $q(d) \sim \mathcal{L}(d|m_1)/\mathcal{L}(d|m_2)$
3. niveaux de confiance : $PDF(q|hyp)$ (pseudo-expériences)

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$
2. test statistique : $q(d) \sim \mathcal{L}(d|m_1)/\mathcal{L}(d|m_2)$
3. niveaux de confiance : $PDF(q|hyp)$ (pseudo-expériences)

L'approche hybride (LEP et Tevatron) avec ou sans profilage

$$\mathcal{L}(d | \mu, \theta) = \mathcal{L}_{\text{Poisson}}(d | \mu s + b) \times \pi_{\text{prior}}(\theta)$$

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$
2. test statistique : $q(d) \sim \mathcal{L}(d|m_1)/\mathcal{L}(d|m_2)$
3. niveaux de confiance : $PDF(q|hyp)$ (pseudo-expériences)

L'approche hybride (LEP et Tevatron) avec ou sans profilage

$$\mathcal{L}(d | \mu, \theta) = \mathcal{L}_{\text{Poisson}}(d | \mu s + b) \times \pi_{\text{prior}}(\theta)$$

L'approche purement fréquentiste (LHC)

$$\mathcal{L}(d, \mathcal{O} | \mu, \theta) = \mathcal{L}_{\text{Poisson}}(d | \mu s + b) \times \mathcal{L}_{\text{aux}}(\mathcal{O}|\theta)$$

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$
2. test statistique : $q(d) \sim \mathcal{L}(d|m_1)/\mathcal{L}(d|m_2)$
3. niveaux de confiance : $PDF(q|hyp)$ (pseudo-expériences)

L'approche hybride (LEP et Tevatron) avec ou sans profilage

$$\mathcal{L}(d | \mu, \theta) = \mathcal{L}_{\text{Poisson}}(d | \mu s + b) \times \pi_{\text{prior}}(\theta)$$

L'approche purement fréquentiste (LHC)

$$\mathcal{L}(d, \mathcal{O} | \mu, \theta) = \mathcal{L}_{\text{Poisson}}(d | \mu s + b) \times \mathcal{L}_{\text{aux}}(\mathcal{O} | \theta)$$

$$\mathcal{L}_{\text{aux}}(\mathcal{O} | \theta) \longrightarrow \mathcal{L}_{\text{aux}}(\theta_{\text{meas}} | \theta) \propto \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - \theta_{\text{meas}}}{\sigma} \right)^2 \right]$$

La méthode purement fréquentiste

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$

Mise en pratique : approximation asymptotique

$PDF(q|hyp) \equiv$ fonction analytique

La méthode purement fréquentiste

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$

Mise en pratique : approximation asymptotique

$PDF(q|hyp) \equiv$ fonction analytique

- ne dépend que de $q(d_{asimov})$: jeu de *données représentatif* (fictif)

La méthode purement fréquentiste

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$

Mise en pratique : approximation asymptotique

$PDF(q|hyp) \equiv$ fonction analytique

- ne dépend que de $q(d_{asimov})$: jeu de *données représentatif* (fictif)
- s'obtient en déterminant θ_{truth} : $d_{asimov} = \mu s(\theta_{truth}) + b(\theta_{truth})$

La méthode purement fréquentiste

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$

Mise en pratique : approximation asymptotique

$PDF(q|hyp) \equiv$ fonction analytique

- ne dépend que de $q(d_{asimov})$: jeu de *données représentatif* (fictif)
- s'obtient en déterminant θ_{truth} : $d_{asimov} = \mu s(\theta_{truth}) + b(\theta_{truth})$
- en pratique : un certain arbitraire (paramètres post-ajustement notés $\hat{\theta}$)
 - $\theta_{truth} = \hat{\theta} \leftarrow \max[\mathcal{L}(d_{obs}|\mu, \theta)]$
 - $\theta_{truth} = \theta_{nominal}$
 - ...

La méthode purement fréquentiste

Les 3 ingrédients du test d'hypothèse

1. fonction de vraisemblance : $\mathcal{L}(data|model)$

Mise en pratique : approximation asymptotique

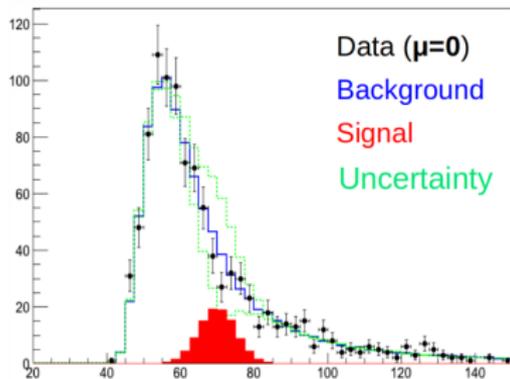
$PDF(q|hyp) \equiv$ fonction analytique

- ne dépend que de $q(d_{asimov})$: jeu de *données représentatif* (fictif)
- s'obtient en déterminant θ_{truth} : $d_{asimov} = \mu s(\theta_{truth}) + b(\theta_{truth})$
- en pratique : un certain arbitraire (paramètres post-ajustement notés $\hat{\theta}$)
 - $\theta_{truth} = \hat{\theta} \leftarrow \max [\mathcal{L}(d_{obs}|\mu, \theta)]$
 - $\theta_{truth} = \theta_{nominal}$
 - ...

Les *données observées* sont utilisées pour dériver les *sensibilités attendues* et observées

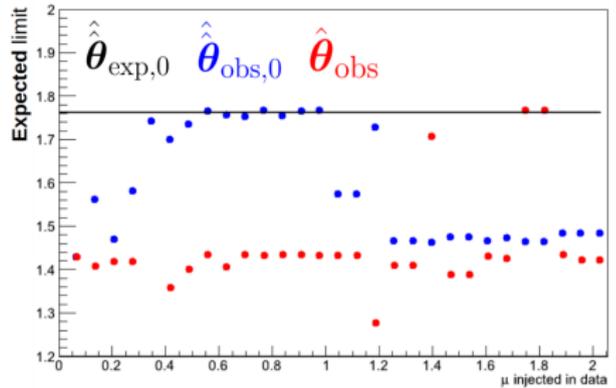
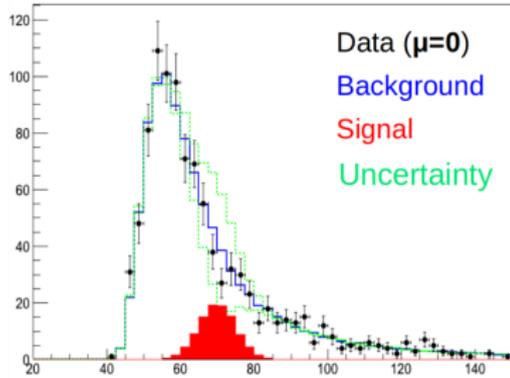
Quelques exemples

Un cas d'école



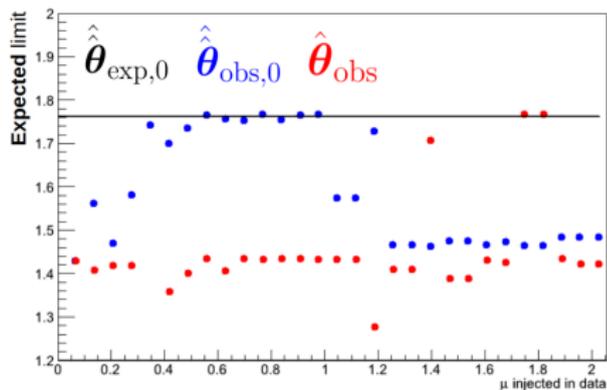
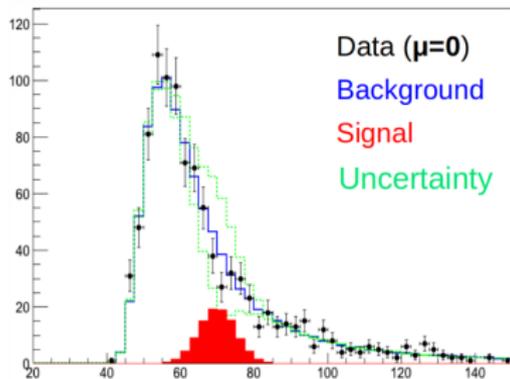
Quelques exemples

Un cas d'école



Quelques exemples

Un cas d'école

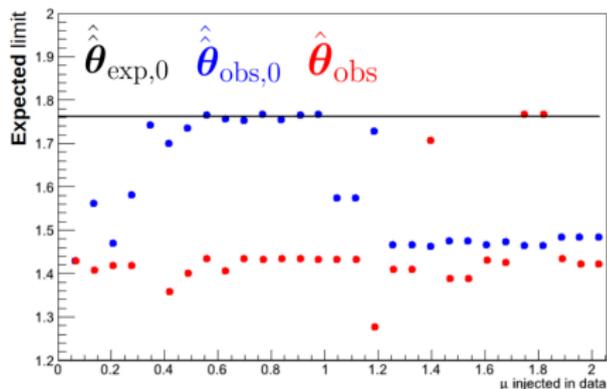
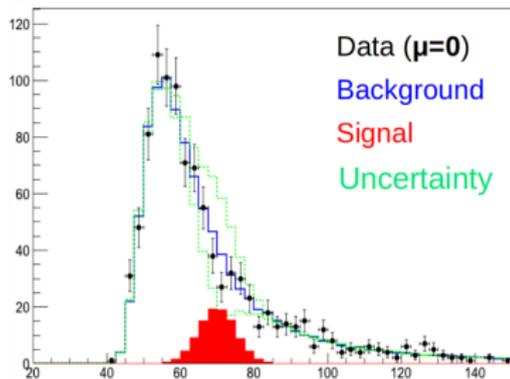


Deux cas réels

- gain apporté par la catégorie boostée : $1.8 (\hat{\theta}_{\text{nom}}) \rightarrow 1.4 (\hat{\theta}_{\text{obs}})$

Quelques exemples

Un cas d'école

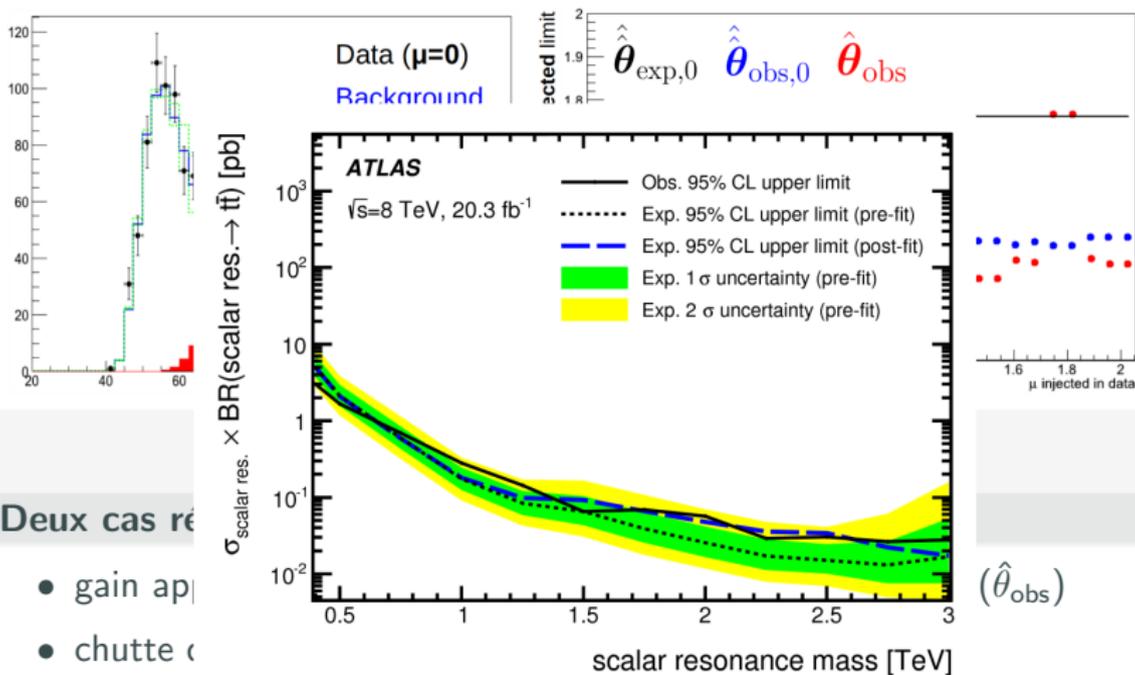


Deux cas réels

- gain apporté par la catégorie boostée : $1.8 (\hat{\theta}_{\text{nom}}) \rightarrow 1.4 (\hat{\theta}_{\text{obs}})$
- chute de sensibilité *attendue* de $X \rightarrow t\bar{t}$ JHEP 08 (2015) 148

Quelques exemples

Un cas d'école

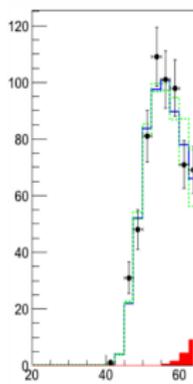


Deux cas ré

- gain ap
- chute c

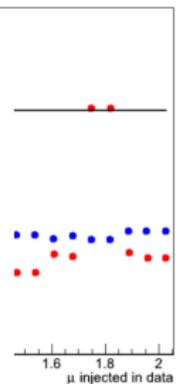
Quelques exemples

Un cas d'école



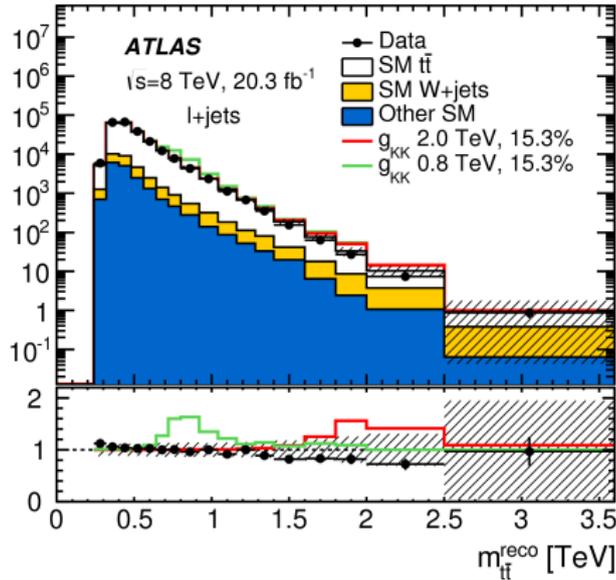
Data ($\mu=0$)
Background

selected limit
 $\hat{\theta}_{\text{exp},0}$ $\hat{\theta}_{\text{obs},0}$ $\hat{\theta}_{\text{obs}}$



Events/0.08 TeV

Data/BG



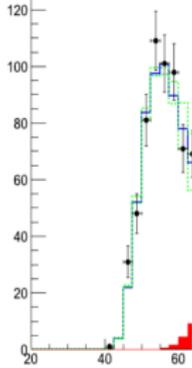
($\hat{\theta}_{\text{obs}}$)

Deux cas ré

- gain ap
- chute c

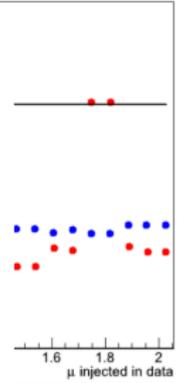
Quelques exemples

Un cas d'école



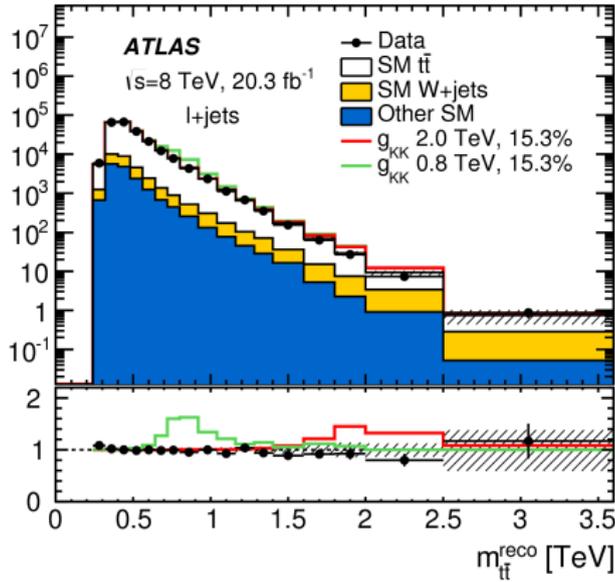
Data ($\mu=0$)
Background

selected limit
 $\hat{\theta}_{\text{exp},0}$ $\hat{\theta}_{\text{obs},0}$ $\hat{\theta}_{\text{obs}}$



Events/0.08 TeV

Data/BG



($\hat{\theta}_{\text{obs}}$)

Deux cas ré

- gain ap
- chute c

Un cas d'école



Un exemple dans le Higgs

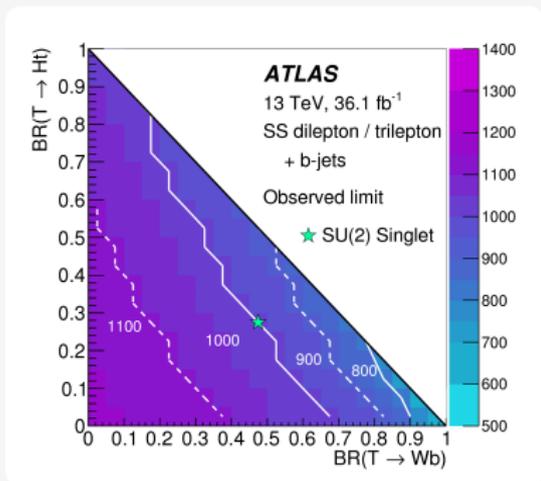
Ajout d'un paragraphe dans la publication de la *combinaison Higgs 7 TeV*

PRD 86 (2012) 032003 (section 5.D)

Here, the expected upper limit is defined as the median of the distribution $f(\mu_{\text{up}}|0, m_H, \hat{\theta}(\mu = 0, \text{obs}))$ and the expected significance is based on the median of the distribution $f(p_0|1, m_H, \hat{\theta}(\mu = 1, \text{obs}))$. The expected limit and significance thus have a small residual dependence on the observed data through $\hat{\theta}(\mu, \text{obs})$.

Contraintes sur de nouveaux phénomènes/modèles

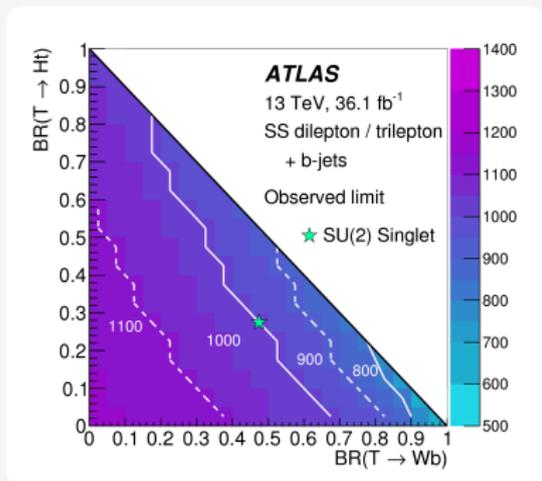
JHEP 12 (2018) 039



$$\begin{aligned} BR(T \rightarrow Zt) &+ \\ BR(T \rightarrow Ht) &+ \\ BR(T \rightarrow Wb) &= 1 \end{aligned}$$

Contraintes sur de nouveaux phénomènes/modèles

JHEP 12 (2018) 039

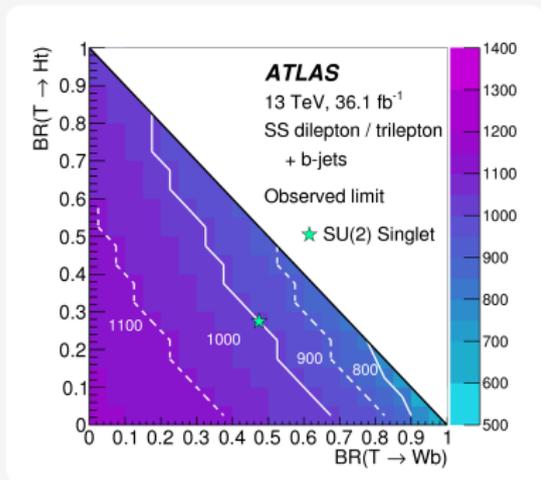


$$\begin{aligned} BR(T \rightarrow Zt) &+ \\ BR(T \rightarrow Ht) &+ \\ BR(T \rightarrow Wb) &= 1 \end{aligned}$$

Combinaison ATLAS :

$m_T \geq 1.3 \text{ TeV}$ quelque soit leur BRs

PRL 121 211801 (2018)



$$\begin{aligned} BR(T \rightarrow Zt) &+ \\ BR(T \rightarrow Ht) &+ \\ BR(T \rightarrow Wb) &= 1 \end{aligned}$$

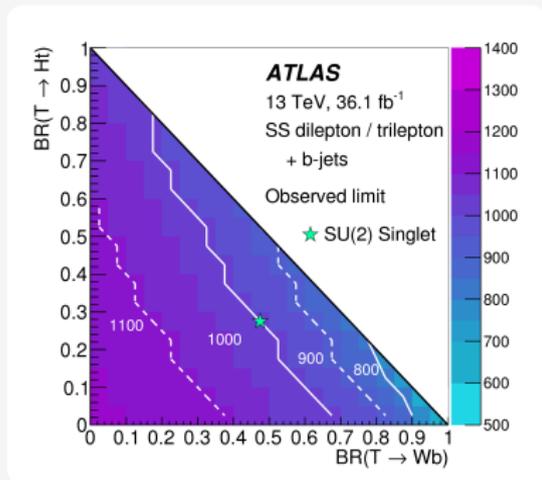
Combinaison ATLAS :

$m_T \geq 1.3 \text{ TeV}$ quelque soit leur BRs

PRL 121 211801 (2018)

Sensibilité à la production standard $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

- exclusion observée (attendue) : $\sim 6(3) \times \sigma_{\text{SM}}$
- découverte observée (attendue) : $3.0(0.8) \sigma$



$$\begin{aligned} BR(T \rightarrow Zt) &+ \\ BR(T \rightarrow Ht) &+ \\ BR(T \rightarrow Wb) &= 1 \end{aligned}$$

Combinaison ATLAS :

$m_T \geq 1.3 \text{ TeV}$ quelque soit leur BRs

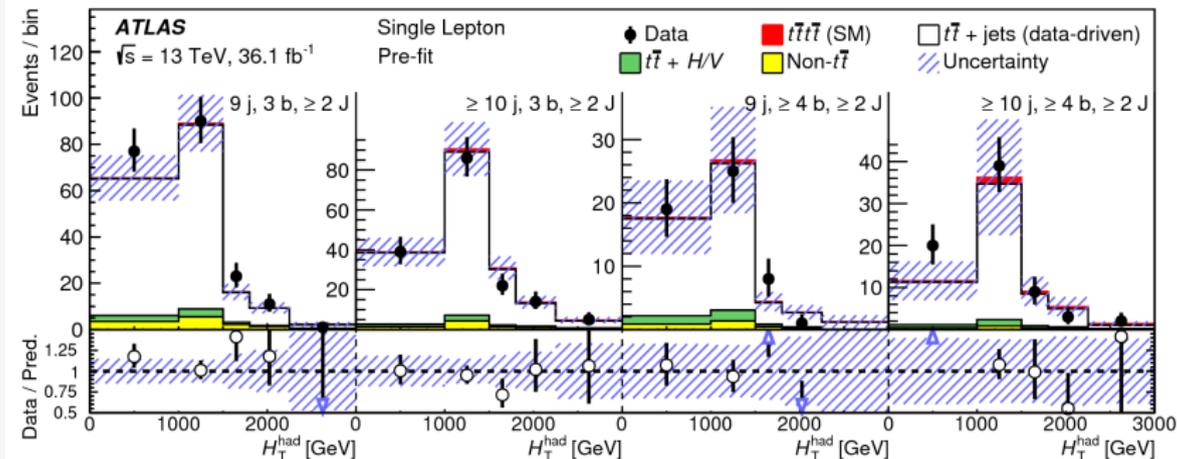
PRL 121 211801 (2018)

Sensibilité à la production standard $pp \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$

- exclusion observée (attendue) : $\sim 6(3) \times \sigma_{\text{SM}}$
- découverte observée (attendue) : $3.0(0.8) \sigma$

Contraintes sur d'autres modèles (non présentées ici)

Analyse des collisions $l+\text{jets}$ et $l^\pm l^\mp + \text{jets}$



Difficultés expérimentales et stratégie

- fond : $pp \rightarrow t\bar{t}$ avec *beaucoup* de (b -)jets supplémentaires

Dernière mesure de $pp \rightarrow t\bar{t}+jets$

arXiv:1908.07305

ATLAS

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 36.1 \text{ fb}^{-1}$

Resolved

Fiducial phase-space

Normalised cross-section

— PWG+PY8

— Stat Only

- - - PWG+PY8 Rad. Up

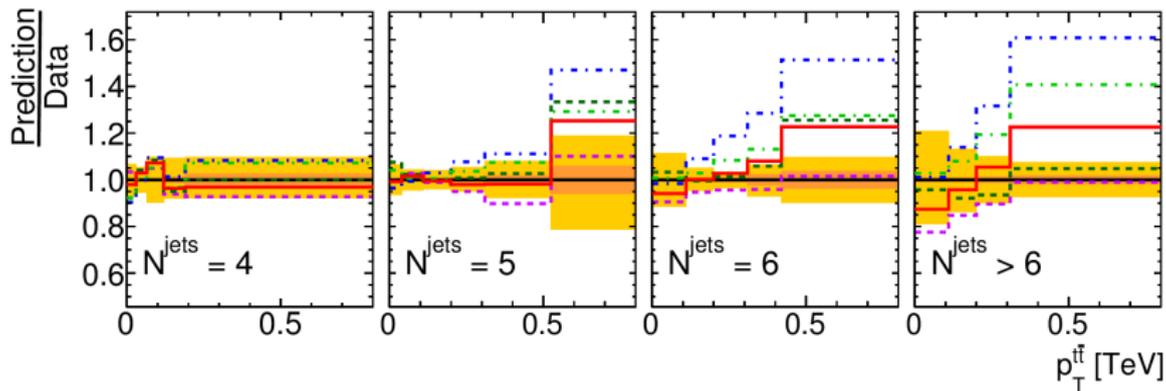
- - - PWG+H7

■ Stat + Syst

— Data

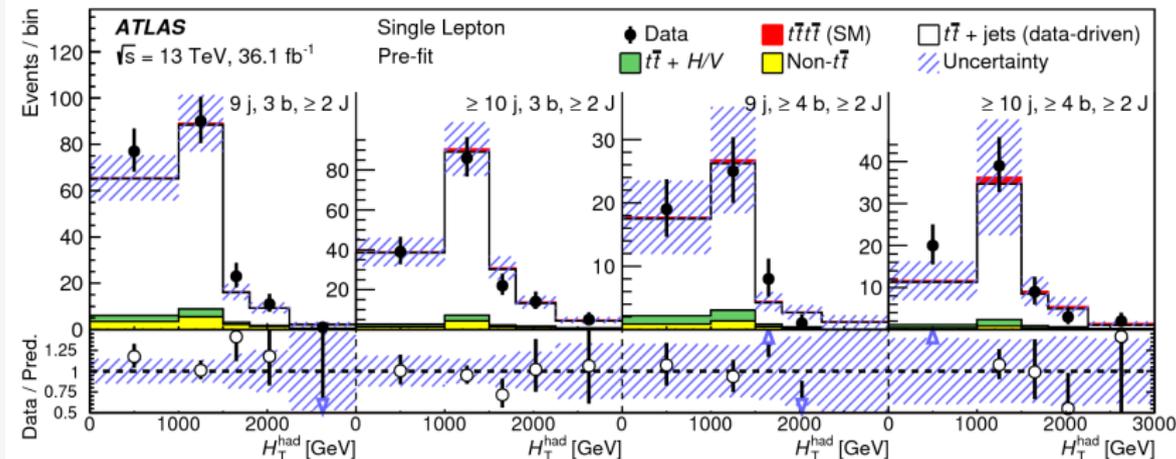
- - - PWG+PY8 Rad. Down

- - - Sherpa



- fond : $pp \rightarrow t\bar{t}$ avec *beaucoup* de (b -)jets supplémentaires

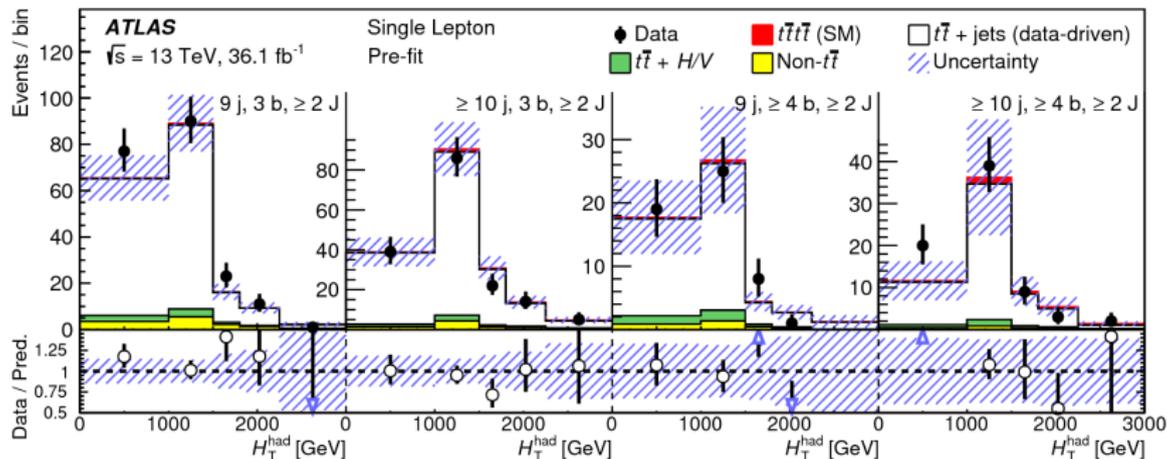
Analyse des collisions $l + \text{jets}$ et $l^\pm l^\mp + \text{jets}$



Difficultés expérimentales et stratégie

- fond : $pp \rightarrow t\bar{t}$ avec *beaucoup* de (*b*-)jets supplémentaires
- *prédiction* basée sur des *données* : incertitudes $\lesssim 50\%$

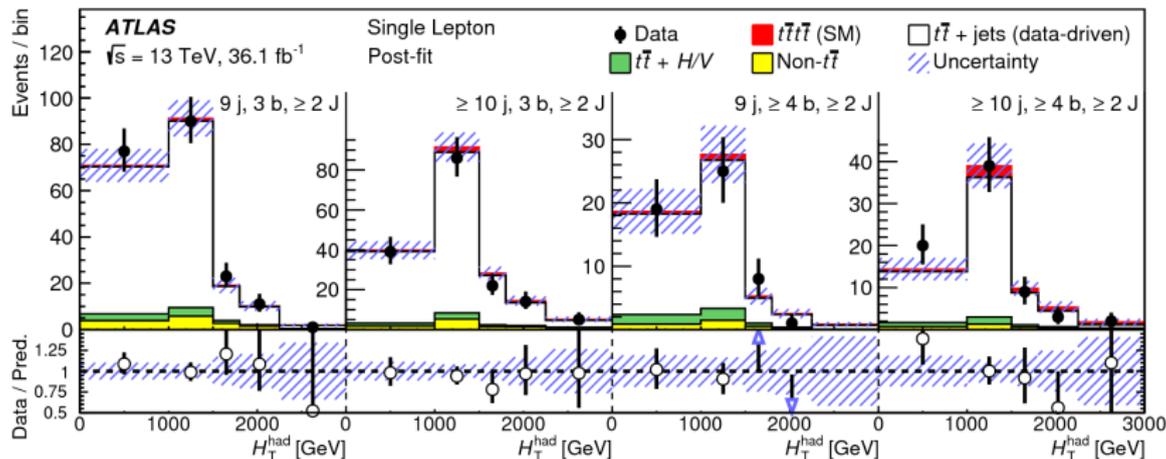
Analyse des collisions $l + \text{jets}$ et $l^\pm l^\mp + \text{jets}$



Difficultés expérimentales et stratégie

- fond : $pp \rightarrow t\bar{t}$ avec *beaucoup* de (*b*-)jets supplémentaires
- *prédiction* basée sur des *données* : incertitudes $\lesssim 50\%$
- ingrédient essentiel : *profilage* des incertitudes

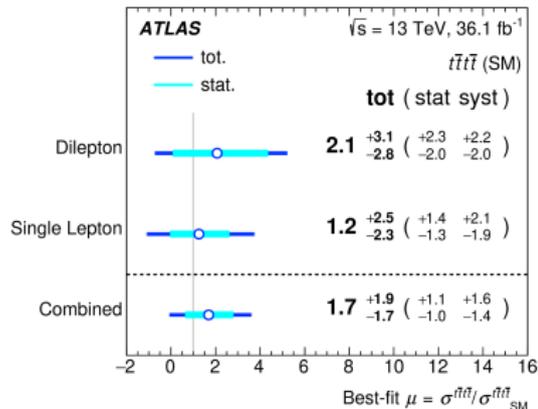
Analyse des collisions $l+\text{jets}$ et $l^\pm l^\mp + \text{jets}$



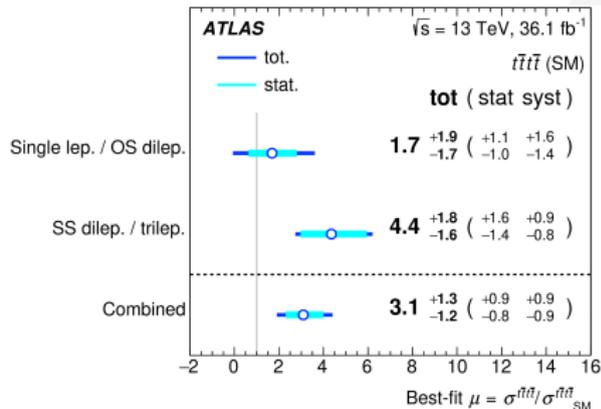
Difficultés expérimentales et stratégie

- fond : $pp \rightarrow t\bar{t}$ avec *beaucoup* de (b -)jets supplémentaires
- **prédiction** basée sur des **données** : incertitudes $\lesssim 50\%$
- ingrédient essentiel : **profilage** des incertitudes

1L + OS



1LOS + SSML



Résultats :

- 1L plus sensible que OS, malgré un plus faible S/B : **profilage!**
- $p_0 = 2.8(1.0)\sigma$ – attendue : 0.8σ (SSML) 0.6σ (1LOS)
- extrapolation (naïve) à 135 fb^{-1} : $p_0 \sim 2\sigma$

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
------	---------------	---------	---------	-------------

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1 / \sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1 / \sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$
03/2016	0.05 – 0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	inc. lumi → design F5

La saga de la voie lente

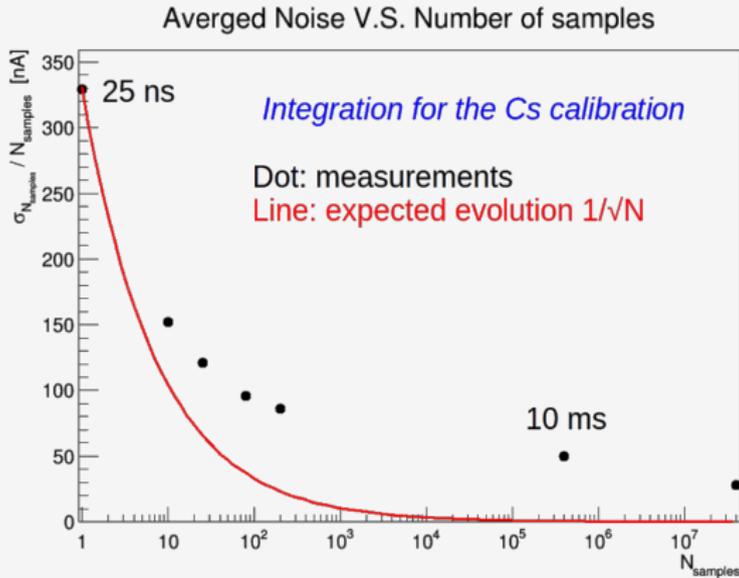
Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1 / \sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$
03/2016	0.05 – 0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	inc. lumi \rightarrow design F5
10/2016	0.05 – 0.5 nA	$\sim 50 \text{ nA}$	mesu.	$\sigma_{N_s} \gg \sigma_1 / \sqrt{N_s} \rightarrow$ bruit $1/f$

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Date	sp
début	
03/2016	0.0
10/2016	0.0



Commentaire
$\bar{I}_s, N_s = 400\,000$
mi \rightarrow design F5
$\sqrt{N_s} \rightarrow$ bruit $1/f$

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1 / \sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$
03/2016	0.05 – 0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	inc. lumi \rightarrow design F5
10/2016	0.05 – 0.5 nA	$\sim 50 \text{ nA}$	mesu.	$\sigma_{N_s} \gg \sigma_1 / \sqrt{N_s} \rightarrow$ bruit $1/f$
02/2017	0.05 – 0.5 nA	$\sim 0.3 \text{ nA}$	simu.	F5, bruit $1/f$ inclus

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10 \text{ ms}$

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1 / \sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$
03/2016	0.05 – 0.5 nA	$\leq 0.6 \text{ nA}$	simu.	inc. lumi \rightarrow design F5
10/2016	0.05 – 0.5 nA	$\sim 50 \text{ nA}$	mesu.	$\sigma_{N_s} \gg \sigma_1 / \sqrt{N_s} \rightarrow$ bruit $1/f$
02/2017	0.05 – 0.5 nA	$\sim 0.3 \text{ nA}$	simu.	F5, bruit $1/f$ inclus
07/2017	0.05 – 0.5 nA	$\sim 6.6 \text{ nA}$	mesu.	erreur dans la simu : $1/f_{\min} = 10 \text{ ms}$

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10$ ms

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	≤ 0.6 nA	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1/\sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$
03/2016	0.05 – 0.5 nA	≤ 0.6 nA	simu.	inc. lumi \rightarrow design F5
10/2016	0.05 – 0.5 nA	~ 50 nA	mesu.	$\sigma_{N_s} \gg \sigma_1/\sqrt{N_s} \rightarrow$ bruit $1/f$
02/2017	0.05 – 0.5 nA	~ 0.3 nA	simu.	F5, bruit $1/f$ inclus
07/2017	0.05 – 0.5 nA	~ 6.6 nA	mesu.	erreur dans la simu : $1/f_{\min} = 10$ ms

Les quatre dernières tentatives (sur ~ 10 jours)

1. moyenner $s_{i+1} - s_i$
2. moyenner $s_i - \langle s \rangle_n$

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10$ ms

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	≤ 0.6 nA	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1/\sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$
03/2016	0.05 – 0.5 nA	≤ 0.6 nA	simu.	inc. lumi \rightarrow design F5
10/2016	0.05 – 0.5 nA	~ 50 nA	mesu.	$\sigma_{N_s} \gg \sigma_1/\sqrt{N_s} \rightarrow$ bruit $1/f$
02/2017	0.05 – 0.5 nA	~ 0.3 nA	simu.	F5, bruit $1/f$ inclus
07/2017	0.05 – 0.5 nA	~ 6.6 nA	mesu.	erreur dans la simu : $1/f_{\min} = 10$ ms

Les quatre dernières tentatives (sur ~ 10 jours)

1. moyenner $s_{i+1} - s_i$
2. moyenner $s_i - \langle s \rangle_n$
3. analyse en composantes principales (PCA) : $\langle \sum \alpha_i s_i \rangle$ non corrélées

La saga de la voie lente

Spécification et stratégie : mesure de courant sur $\Delta t = 10$ ms

Date	spécification	FATALIC	méthode	Commentaire
début	0.5 nA	≤ 0.6 nA	simu.	$\sigma_{N_s} = \sigma_1/\sqrt{N_s}$, $N_s = 400\,000$
03/2016	0.05 – 0.5 nA	≤ 0.6 nA	simu.	inc. lumi \rightarrow design F5
10/2016	0.05 – 0.5 nA	~ 50 nA	mesu.	$\sigma_{N_s} \gg \sigma_1/\sqrt{N_s} \rightarrow$ bruit $1/f$
02/2017	0.05 – 0.5 nA	~ 0.3 nA	simu.	F5, bruit $1/f$ inclus
07/2017	0.05 – 0.5 nA	~ 6.6 nA	mesu.	erreur dans la simu : $1/f_{\min} = 10$ ms

Les quatre dernières tentatives (sur ~ 10 jours)

1. moyenner $s_{i+1} - s_i$
2. moyenner $s_i - \langle s \rangle_n$
3. analyse en composantes principales (PCA) : $\langle \sum \alpha_i s_i \rangle$ non corrélées
4. filtre de blanchiment du bruit (collègues brésiliens)

Analyse en composantes principales

<https://github.com/rmadar/ADCTimeSeriePCA>

