

# SFP 2015

## Recherche de nouvelle physique grâce à l'expérience CMS du LHC (illustrée par un exemple concret)

Vendredi 28 août 2015

Michaël Buttignol

# I. Contexte théorique

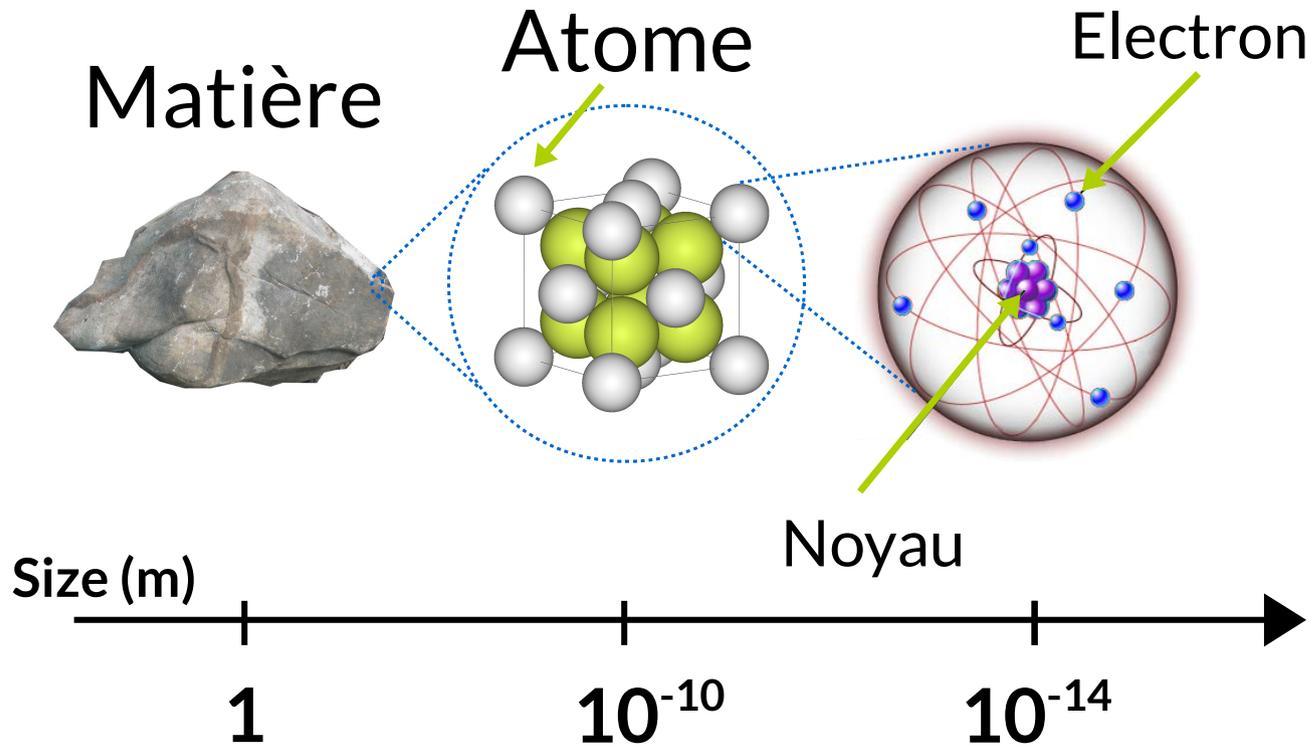
---

II. Construire un modèle de nouvelle physique

III. Un outil de détection : CMS

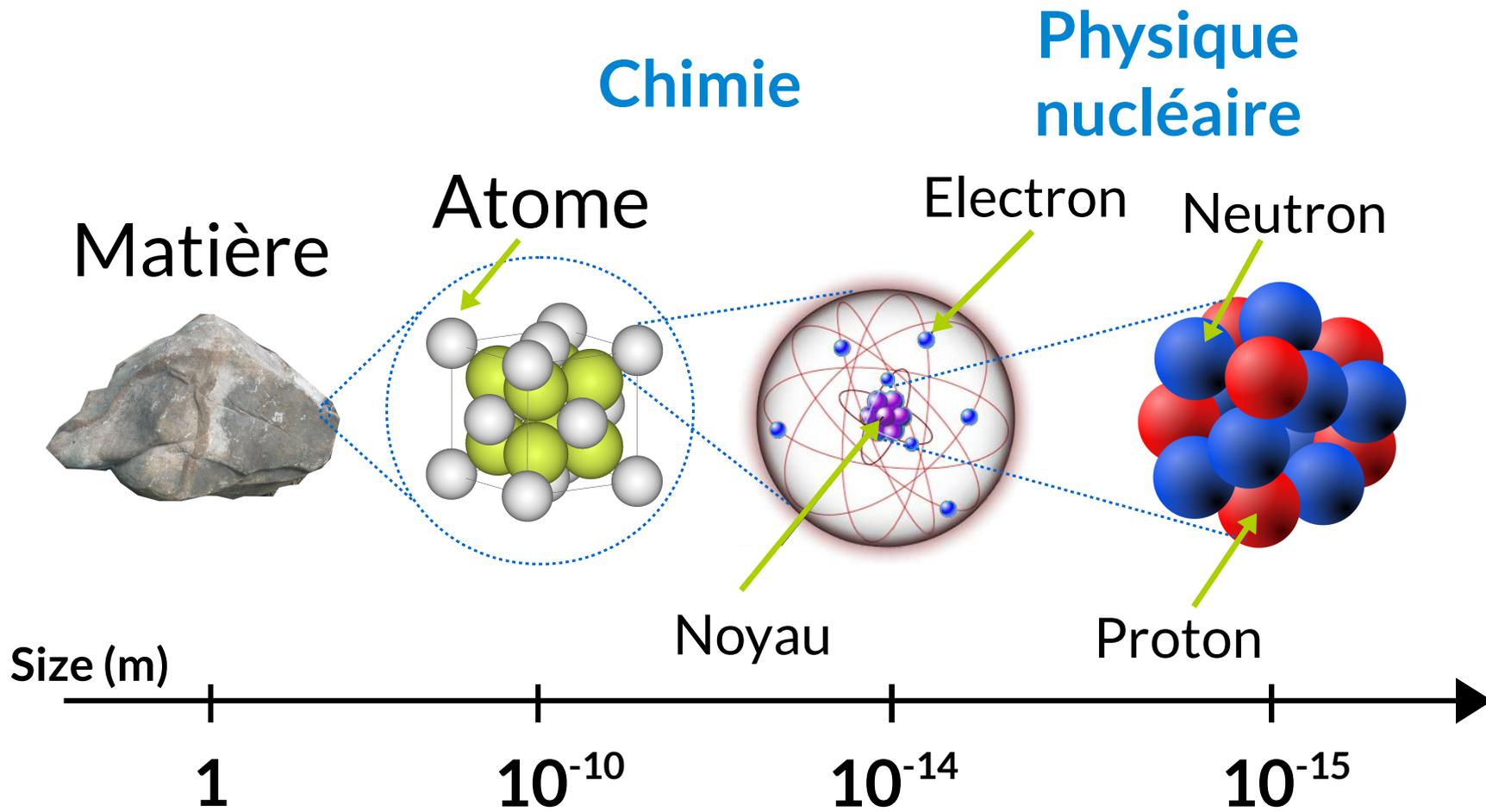
IV. Stratégie d'une analyse de données

## Chimie

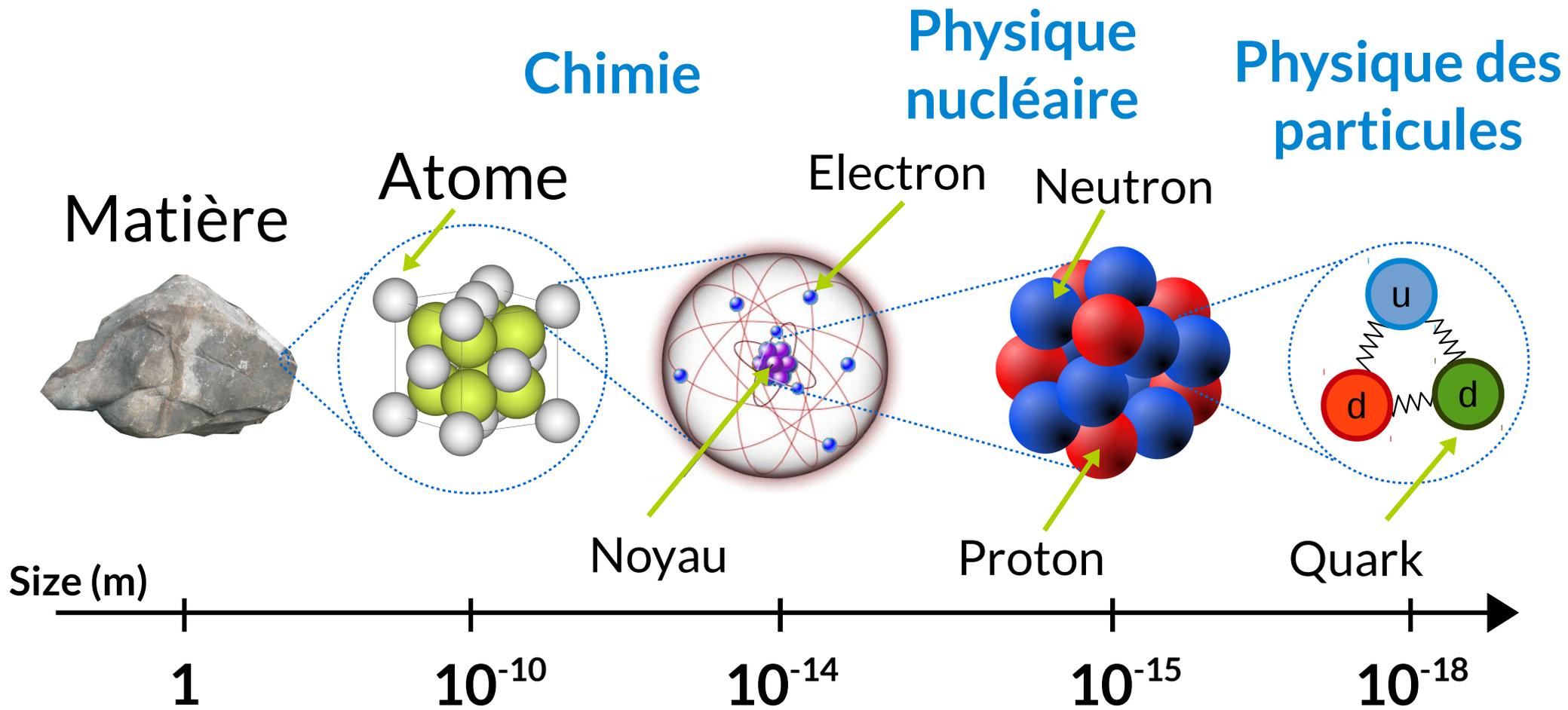


→ Une notion qui a évolué **au cours du temps** !

# Les particules élémentaires



→ Une notion qui a évolué **au cours du temps** !



→ Une notion qui a évolué **au cours du temps** !

# Les fermions



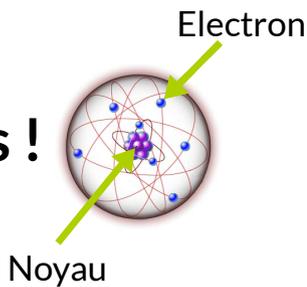
Constituants de la matière ordinaire

Matière instable

Proton = uud  
et

Neutron = udd

↑  
Atomes !



↓  
Electron

	I	II	III
Masse →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
Charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Nom →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau

Quarks

Leptons

Accessibles **uniquement** dans les **accélérateurs** de particules car très **instables** et se **désintègrent rapidement** en particules de 1<sup>ère</sup> génération.

Existe dans la nature (muons cosmiques).

# Les bosons



Interaction électromagnétique  
(lumière)

Interaction forte  
(cohésion des quarks)

Interaction faible  
(désintégration Beta)

Brisure de l'interaction électrofaible  
(confère une masse à  $W^{+/-}$ ,  $Z^0$ )

0  
0  
1  
**γ**  
photon

0  
0  
1  
**g**  
gluon

91.2 GeV  
0  
1  
**Z<sup>0</sup>**  
weak force

80.4 GeV  
±1  
1  
**W<sup>±</sup>**  
weak force

125,9 GeV  
0  
0  
**H**  
Higgs Boson

Bosons (Forces)

Interaction gravitationnelle ??  
(gravité)

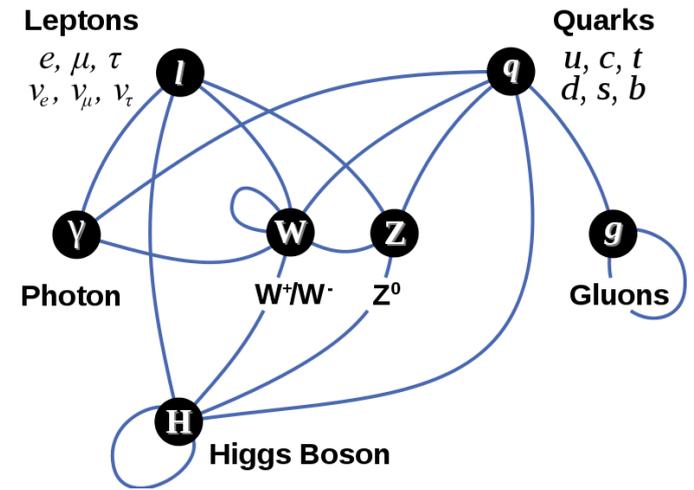
0 GeV  
0  
2  
**G**  
graviton

# Le modèle standard (SM)



La théorie la plus aboutie à ce jour : confirmée de façon très précise par l'expérience.

	I	II	III		
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	? GeV/c <sup>2</sup>
charge→	2/3	2/3	2/3	0	0
spin→	1/2	1/2	1/2	1	0
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
Quarks	4.8 MeV -1/3 1/2 <b>d</b> down	104 MeV -1/3 1/2 <b>s</b> strange	4.2 GeV -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon	
	<2.2 eV 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV 0 1 <b>Z</b> weak force	Bosons (Forces)
	0.511 MeV -1 1/2 <b>e</b> electron	105.7 MeV -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 1/2 <b>τ</b> tau	80.4 GeV ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> weak force	



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\
 & + i\bar{\Psi} \not{D} \Psi + \text{h.c.} \\
 & + \Psi_i y_{ij} \Psi_j \Phi + \text{h.c.} \\
 & + \|D_\mu \Phi\|^2 - V(\Phi)
 \end{aligned}$$

**Lagrangien du modèle standard :** fonction qui décrit les **particules** et leurs **interactions**.

Le modèle standard possède **plusieurs limitations**.

Parmi elles, il n'explique pas pourquoi:

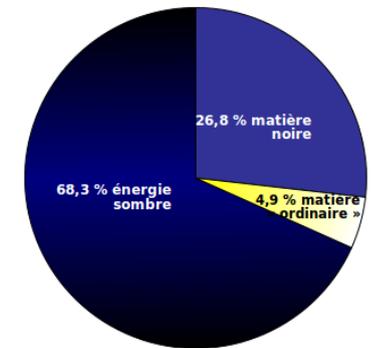
- il n'y a que 3 familles de fermions,
- la gravitation n'y est pas incluse,
- la matière noire et l'énergie sombre ne sont pas représentées,
- ...

## La matière noire

**Observation** : vitesse de rotation des galaxies trop élevée en périphérie.

**Interprétation** : matière « invisible » entraîne la galaxie → **matière noire**.

**Particularités** : massive, interagissant faiblement (pas neutrino).



→ contribution « **au-delà** » du modèle standard qui pourrait expliquer la matière noire : le **monotop**.

I. Contexte théorique

II. Construire un modèle de nouvelle physique

III. Un outil de détection : CMS

IV. Stratégie d'une analyse de données

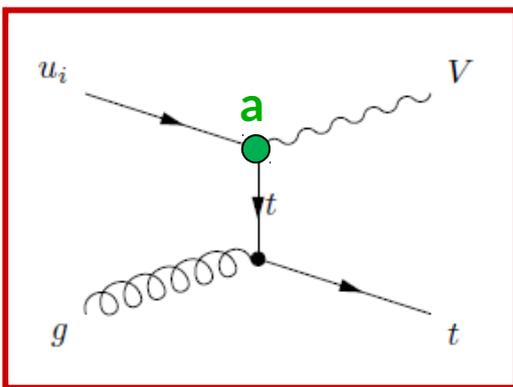
BSM : « au-delà » du modèle standard.

Exemple de théorie effective de nouvelle physique : **monotop**.

**Définition** : top + énergie manquante de nouvelle physique (possiblement candidate pour la **matière noire**).

**Motivations** : sonder le **secteur du top** (particule la plus massive du SM, possible couplage plus élevé aux particules BSM), sonder l'**existence de particules BSM**.

**Mise en œuvre (approche bottom-up)** : créer un **lagrangien de nouvelle physique** directement autour du **signal recherché** (= top + énergie manquante).



2 paramètres libres (**a**,  $m_V$ )

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_{\text{kin}} + \left[ \phi \bar{u} \left[ a_{FC}^0 + b_{FC}^0 \gamma_5 \right] u + V_\mu \bar{u} \gamma^\mu \left[ a_{FC}^1 + b_{FC}^1 \gamma_5 \right] u + \text{h.c.} \right].$$

## 2 canaux de désintégration du quark top

$$pp \rightarrow t + MET \rightarrow bW + MET \rightarrow lb + MET (\text{leptonique})$$

$$pp \rightarrow t + MET \rightarrow bW + MET \rightarrow bj\bar{j} + MET (\text{hadronique})$$

I. Contexte théorique

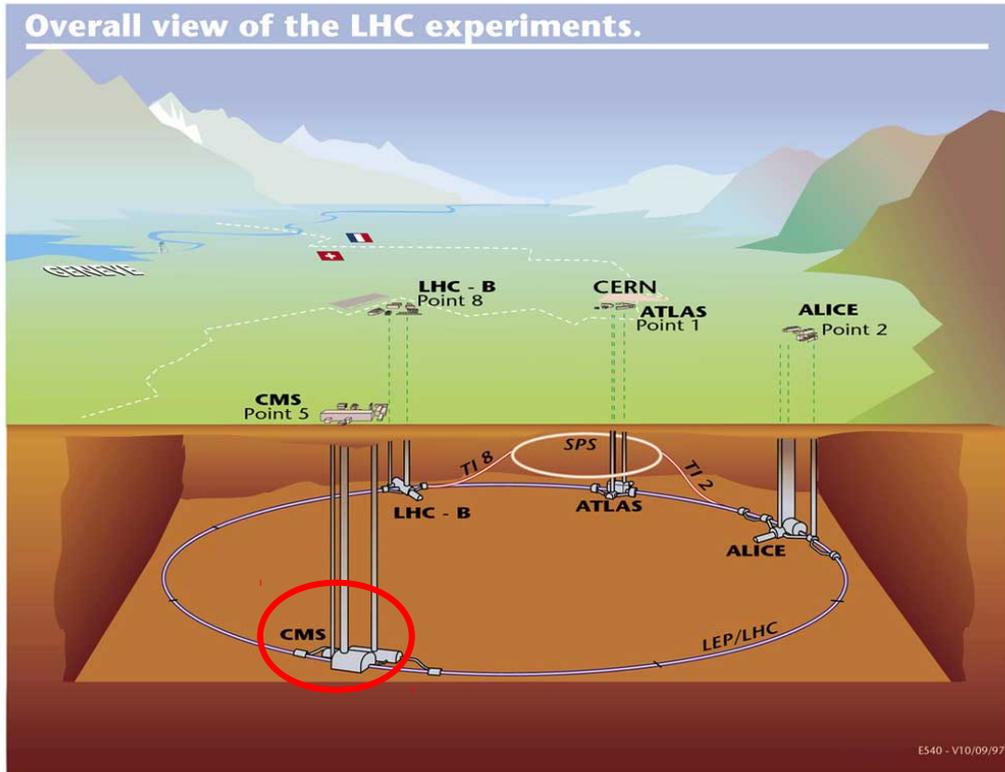
II. Construire un modèle de nouvelle physique

**III. Un outil de détection : CMS**

---

IV. Stratégie d'une analyse de données

# Large Hadron Collider



- Collisionneur **circulaire** de hadrons (**protons** ou ions lourds).
- **Accélère** les particules et réalise entre elles des **collisions** à très hautes énergies.

- **Luminosité (L) :  $N = L \cdot \sigma$**

Nombre d'événements attendus

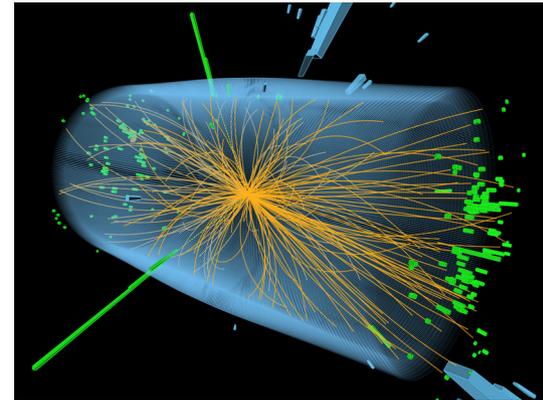
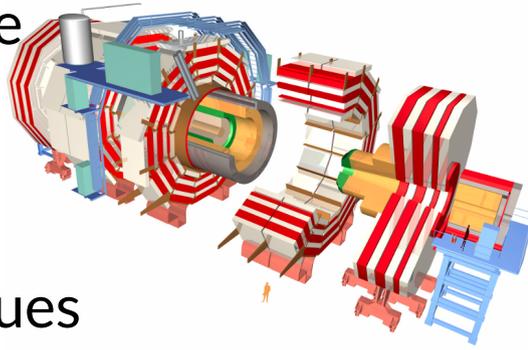
Découverte Higgs →

Début Run 2 →

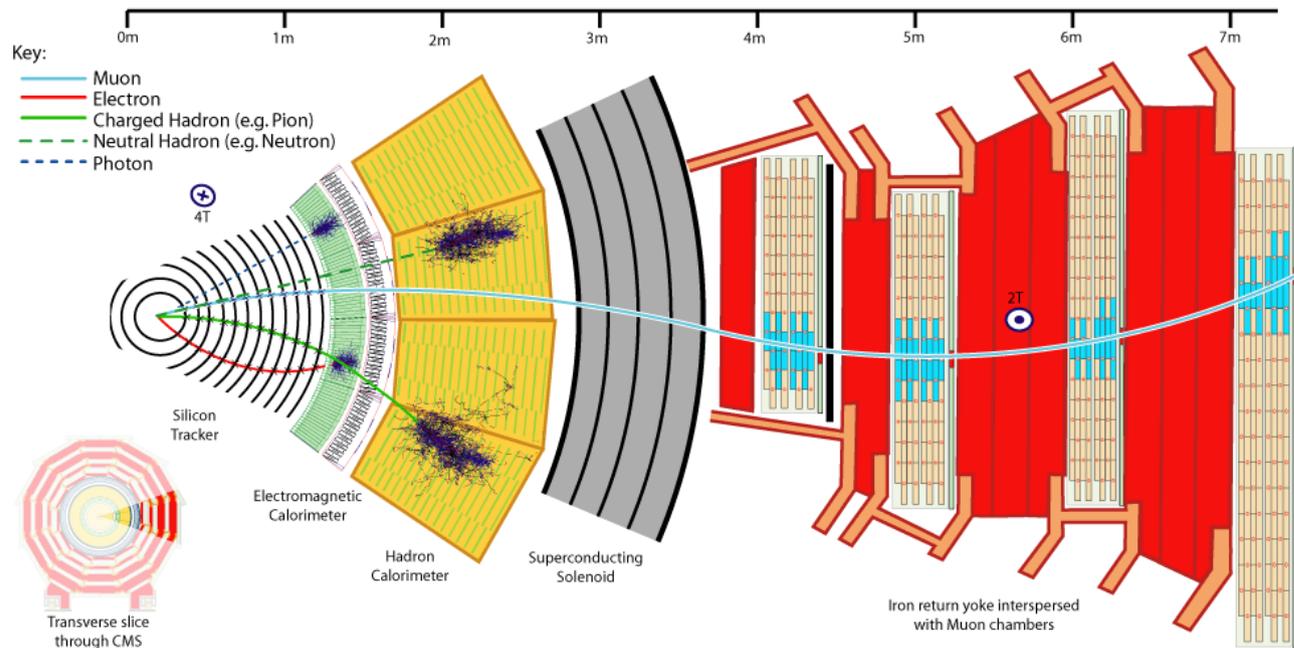
HL-LHC? →

Période	Énergie [TeV]	Luminosité [fb <sup>-1</sup> ]
2011	7	~5
2012	8	~20
2015-18	13-14	~100
2021-23	14	~300
2027-?	14	~3000

- 15 m de diamètre
- 22 m de long
- 12.500 tonnes
- 3.8 T
- ~3000 scientifiques



- Comment trouver de la **nouvelle physique** dans une telle densité de particule ?



- Prendre des photos des « événements ».
- Nécessite de **reconstruire proprement** chaque particule.
- Utilise des détecteurs et algorithmes **dédiés**.
- **MET** : énergie transverse manquante.

I. Contexte théorique

II. Construire un modèle de nouvelle physique

III. Un outil de détection : CMS

IV. Stratégie d'une analyse de données

# Étapes (1/3)



- Connaître exactement la **signature du signal** recherché :

$$pp \rightarrow t + MET \rightarrow bW + MET \rightarrow lb + MET \text{ (leptonique)}$$

$$pp \rightarrow t + MET \rightarrow bW + MET \rightarrow bjj + MET \text{ (hadronique)}$$

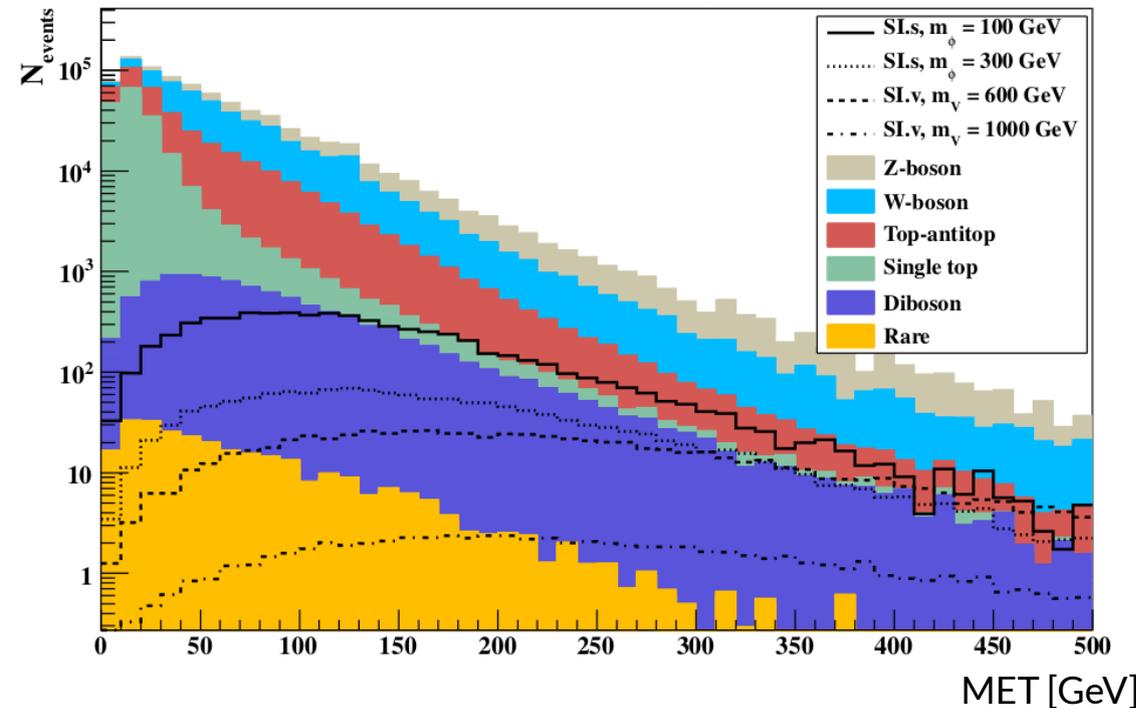
- **Bruits de fond dominants** (processus du SM qui possèdent la même signature que le signal) :
  - $t\bar{t}$ ,  $W(\rightarrow jj) + \text{jets}$ ,  $Z(\rightarrow \nu\nu) + \text{jets}$ , singletop.
- **Produire des échantillons MonteCarlo (processus SM + signal BSM):** processus dur, hadronisation, reconstruction par simulation des interactions particules-détecteur.
- **Sélection d'événements** : enrichir au maximum les échantillons en signal :
  - les événements avec aucun lepton chargé isolé,
  - les événements avec minimum 3 jets,
  - les événements avec exactement un jet étiqueté comme provenant de l'hadronisation d'un quark b.

# Étapes (2/3)



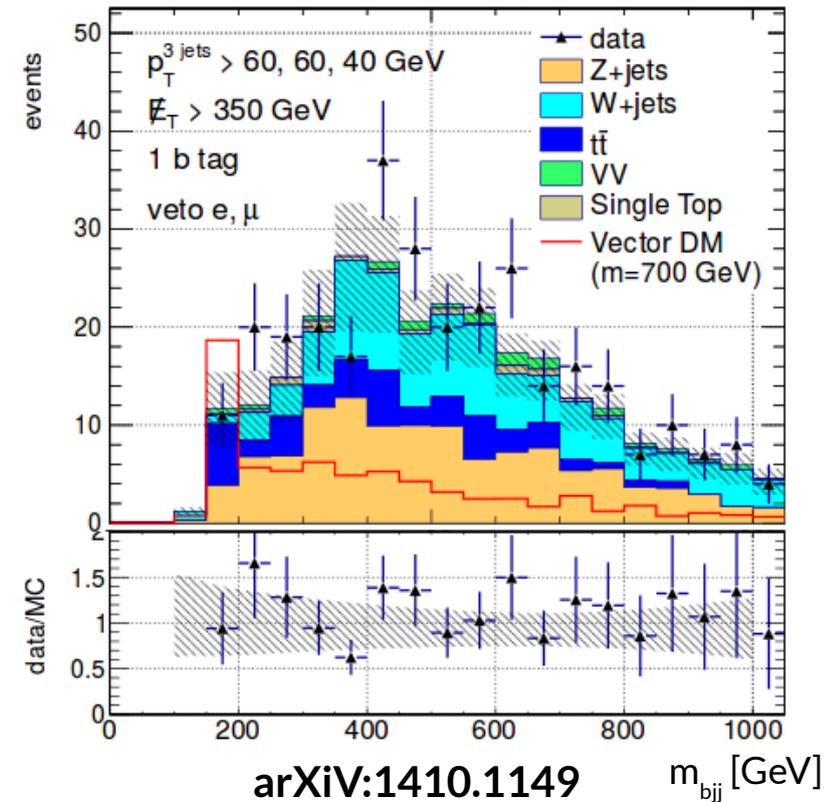
- **Discriminer un peu plus le signal** des principaux bruits de fond : excès de **MET**, reconstruction de la masse transverse du boson W ( $m_{jj}$ ) et du quark top ( $m_{bjj}$ ).
- **Optimiser** chacune de ces sélections séquentiellement (attention à leur corrélation).
- **Confronter** les événements restants (bruits de fond et signal) **aux données** qui ont subi la même sélection :

CMS Preliminary 19.7 pb<sup>-1</sup> at  $\sqrt{s}=8$  TeV



Phys. Rev. D 89 (2014) 014028

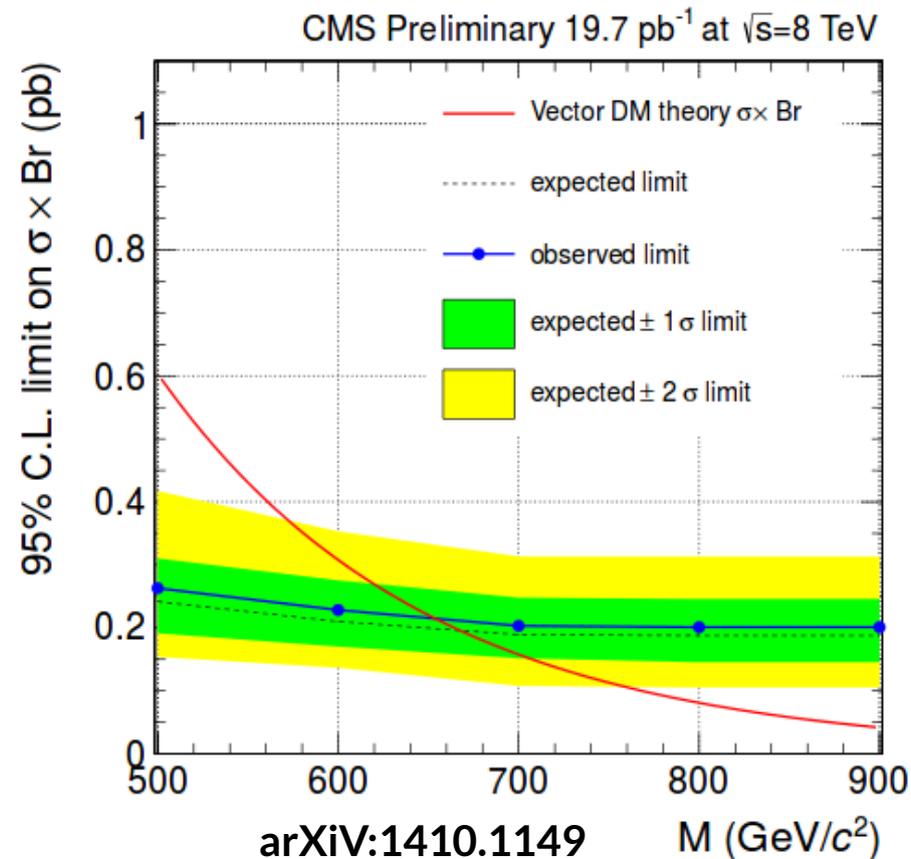
CMS Preliminary 19.7 pb<sup>-1</sup> at  $\sqrt{s}=8$  TeV



arXiv:1410.1149

$m_{bjj}$  [GeV]

- « Compter » les événements restants de **données** et les comparer au nombre d'événements **MC attendu** (bruits de fond + signal).
- Calculer les **limites d'exclusion** à 95 % du niveau de confiance en traitant les erreurs (systématiques et statistiques) comme des **paramètres de nuisance**.



# Conclusion



- Exemple d'une **théorie effective** de nouvelle physique proposant des candidats pour la matière noire.
- Avantage d'une théorie effective : pouvoir **réinterpréter les résultats** en termes de modèles théoriques (SUSY, leptoquark, ...)

# Back up

---

Some classes of models yielding monotop signatures:

- **R-parity-violating supersymmetry**  $pp \rightarrow \tilde{t} \rightarrow t + \tilde{\chi}^0$

(*E. Berger et al.* , Phys.Rev.Lett. 83, 4472-4475 (1999), Phys.Rev. D63, 115001 (2001)

*N. Desai et al.* , JHEP 1010, 060 (2010) )

- **Leptoquark theories**  $pp \rightarrow \text{leptoquark} \rightarrow t + \nu$

(*A. Kumar et al.* , Phys.Rev D88, 075012 (2013) )

- **Hylogenesi scenarios**  $pp \rightarrow t + \text{composite state of several } \chi$

(*H. Davoudiasl et al.* , Phys.Rev. D84, 096008 (2011) )

- **Z' model**  $pp \rightarrow t + Z' \rightarrow t + \chi\chi$

(*J. Kamenik et al.* , Phys.Rev. D84, 111502 (2011)

*E. Alvarez et al.* , arXiv:1310.7600 (2013) )

- **Etc...**

# Introduction to monotops

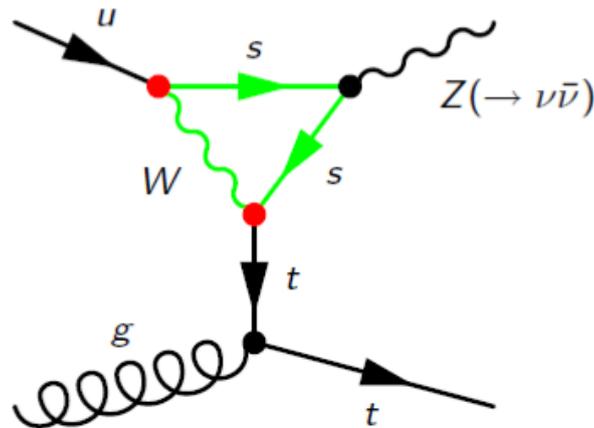


- **Monotop** : (leptonic) top quark decay together with a BSM source of missing transverse energy (MET) – possibly DM candidate :

$$pp \rightarrow t + \cancel{E}_T \rightarrow bW + \cancel{E}_T \rightarrow bl + \cancel{E}_T$$

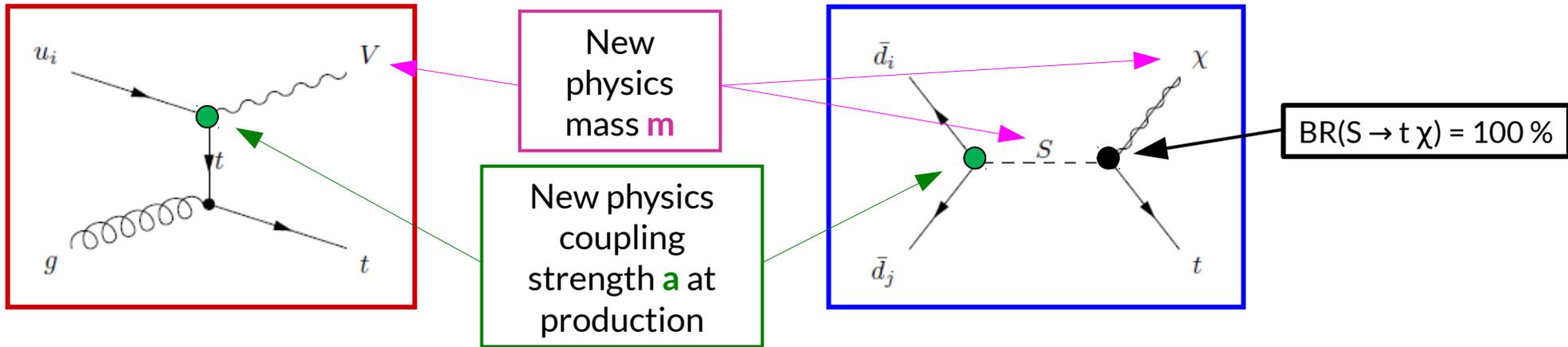
- **Effective theory approach** : all possible monotop production mechanisms in a single lagrangian  $\Leftrightarrow$  **model independent.**

- Monotop in the SM :



**Loop + GIM-suppressed** : **observing monotop at the LHC  $\Leftrightarrow$  BSM physics.**

# Au-delà du SM (BSM)



## FCNC

2 paramètres libres ( $a, m_V$ )

## Resonance

3 paramètres libres ( $a, m_S, m_\chi$ )

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}_{kin} + \phi \bar{u} \left[ a_{FC}^0 + b_{FC}^0 \gamma_5 \right] u + V_\mu \bar{u} \gamma^\mu \left[ a_{FC}^1 + b_{FC}^1 \gamma_5 \right] u$$

$$+ \varphi \bar{d}^c \left[ a_{SR}^q + b_{SR}^q \gamma_5 \right] d + \varphi \bar{u} \left[ a_{SR}^{1/2} + b_{SR}^{1/2} \gamma_5 \right] \chi$$

$$+ \left[ X_\mu \bar{d}^c \gamma^\mu \left[ a_{VR}^q + b_{VR}^q \gamma_5 \right] d + X_\mu \bar{u} \gamma^\mu \left[ a_{VR}^{1/2} + b_{VR}^{1/2} \gamma_5 \right] \chi + \text{h.c.} \right]$$

Production par changement de saveur par courant neutre.

Production par résonance.

- Various theoretical (pheno) papers :

*J. Andrea, B. Fuks, and F. Maltoni*, “**Monotops at the LHC**” Phys.Rev. D84, 074025 (2011), arXiv:1106.6199 [hep-ph].

*J. Wang et al.*, “**Search for the signal of monotop production at the early LHC**” Phys.Rev. D86, 034008 (2012), arXiv:1109.5963 [hep-ph]

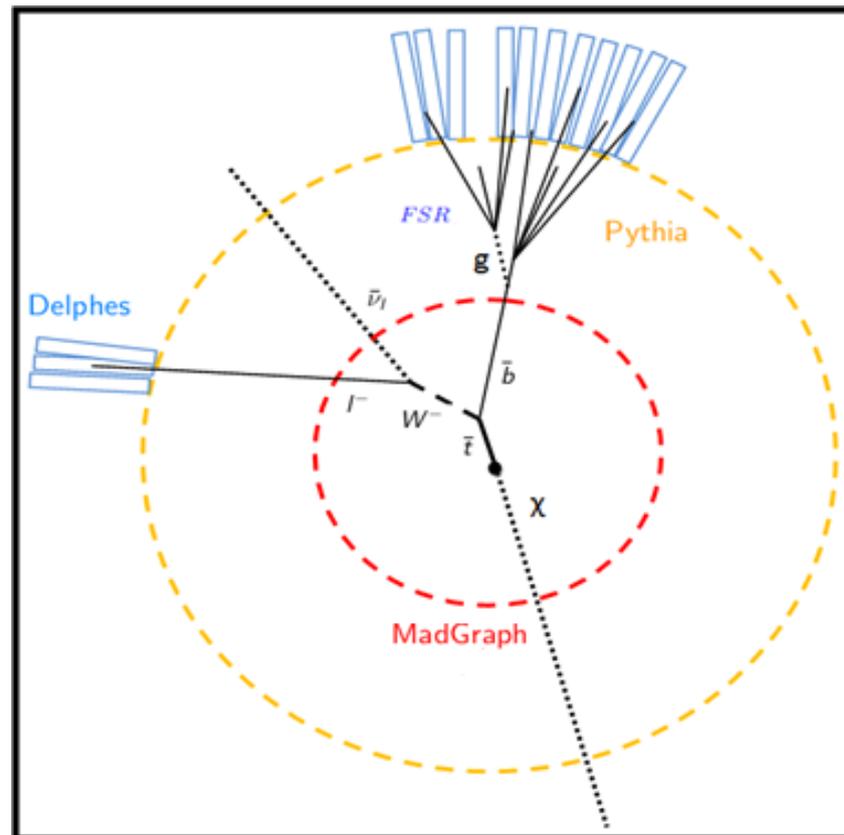
*B.Fuks*, “**Beyond the Minimal Supersymmetric Standard Model: from theory to phenomenology**”, Int. J. Mod. Phys. A 27 (2012) 1230007, arXiv:1202.4769 [hep-ph]

*E. Alvarez et al.*, “**Leptonic Monotops at LHC**”(2013), arXiv:1310.7600 [hep-ph].

*J-L Agram, J. Andrea, M. Buttignol, E. Conte, B. Fuks*, “**Monotop phenomenology at the LHC**” (2013), arXiv:1311.6478v1 [hep-ph], accepted by PRD.

*B.Fuks et al.*, “**Revisiting monotop production at the LHC**”, JHEP 1501 (2015) 017, arXiv:1407.7529 [hep-ph]

- **Goal of the pheno study** : what sensitivity can we expect for monotops with the 8 TeV data of the LHC?
- **Strategy of the pheno study** :
  - Generate MC events (signal + bkgd) with **MadGraph5** + **Pythia**.
  - Use FastSimulation (**Delphes**) of the detector.
  - Implement event selection to extract the signal from the main backgrounds (**MadAnalysis**).
  - Draw sensitivity plots for both **FCNC** and **resonant** cases.



Led to an article: *Phys. Rev. D* 89 (2014) 014028