



# LA PHYSIQUE au LHC

PASSE le run I  
PRESENT le run II  
FUTUR HL-LHC

XXIII<sup>ème</sup> congrès  
de le  
Société Française de Physique

Isabelle Wingerter-Seez  
LAPP - CNRS - Université Savoie Mont Blanc



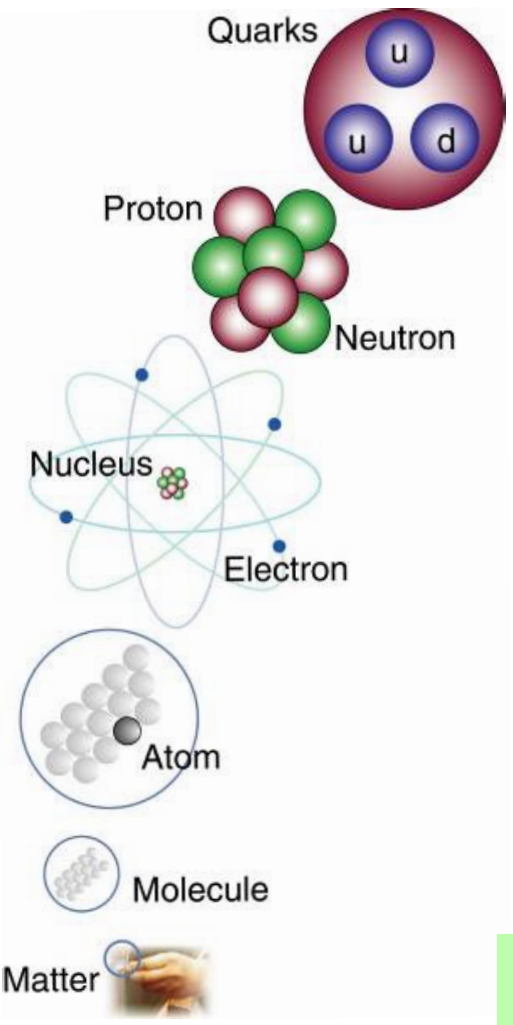
lundi 24 août 2015

HEURES	ÉVÉNEMENT
16:30 - 18:30	S1. SUBATOMIQUE et HAUTES ENERGIES - Le LHC (Le Bel - Amphi 1)
16:30 - 17:00	› <u>LHC commissioning and first operation at 6.5 TeV</u> - <i>Jorg Wenninger, CERN</i>
17:00 - 17:20	› <u>L'expérience ALICE au LHC: résultats et perspectives</u> - <i>Antoine Lardeux, IRFU/SPHN</i>
17:20 - 17:40	› <u>Physique des saveurs lourdes avec l'expérience LHCb : recherche de nouvelle physique et perspectives à 13 TeV.</u> - <i>Simon Akar, IN2P3/CPPM</i>
17:40 - 18:05	› <u>Le redémarrage de l'expérience ATLAS au Run II du LHC</u> - <i>Camilla Maiani, IRFU/SPP</i>
18:05 - 18:30	› <u>Nouvelles données et performances du détecteur CMS auprès du LHC à 13 TeV</u> - <i>Olivier Davignon, IN2P3/LLR</i>
18:30 - 18:30	› <u>Remise du prix Joliot Curie 2013 à Fabrice Hubaut</u> - <i>Jeremy Andrea, Nathalie Besson</i>

# La physique des particules

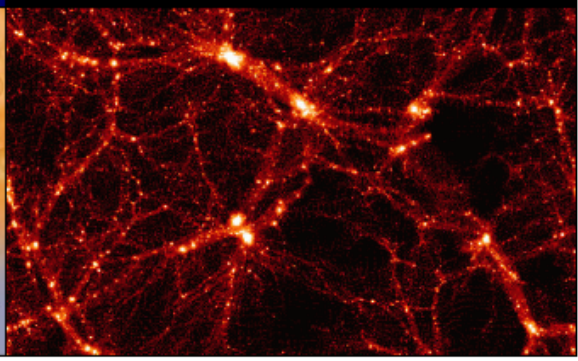
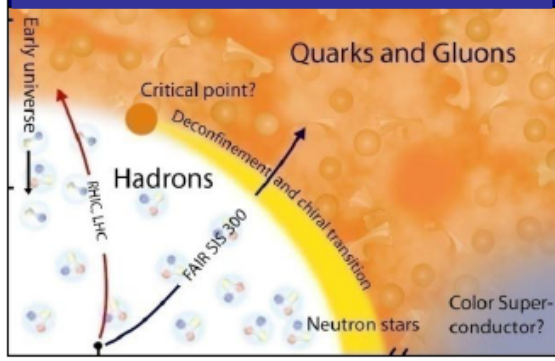
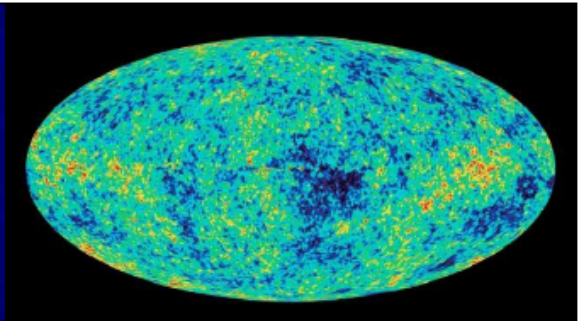
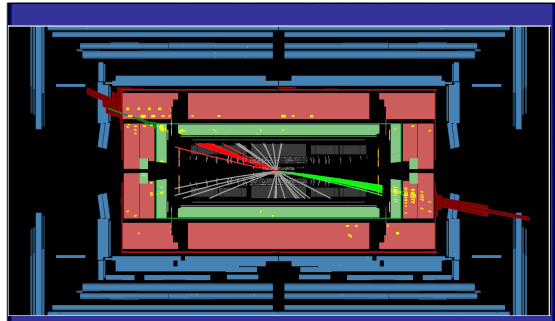
Quels sont les **constituants** ultimes/élémentaires de la matière ?  
 Quelles sont les forces **fondamentales** ?

Quel est le contenu en matière et en énergie de l'univers ?



*Infiniment petit* → *Infiniment grand*

*élémentaire*  
 ↓  
*Complexe*



Comment les particules, les noyaux, la matière se sont-ils formés ?

Comment l'univers s'est-il structuré ?

# FERMIONS

# BOSONS

Q  
U  
A  
R  
K  
S

I

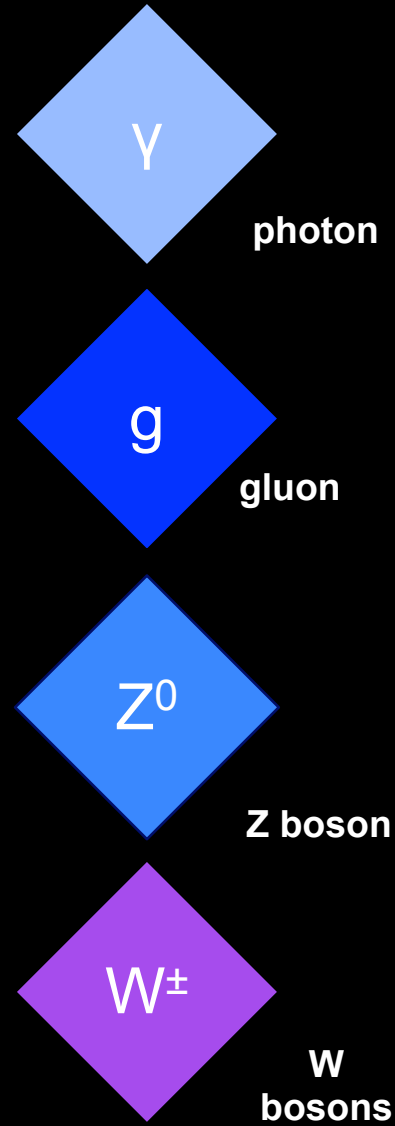
II

III

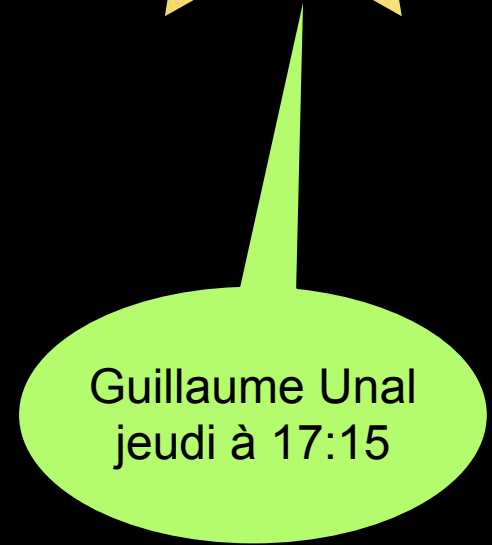
<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom

L  
E  
P  
T  
O  
N  
S

<b><math>\nu_e</math></b> neutrino e	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino $\mu$	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino $\tau$
<b><math>e^-</math></b> electron	<b><math>\mu^-</math></b> muon	<b><math>\tau^-</math></b> tau



F  
O  
R  
C  
E  
S  
  
M  
E  
D  
I  
A  
T  
O  
R  
S



# Physique des particules: le modèle standard

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}\vec{W}_{\mu\nu}\vec{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} \\ & + \bar{L}\gamma^\mu D_\mu L + \bar{R}\gamma^\mu D'_\mu R \\ & + (D_\mu\phi)^*(D^\mu\phi) - V(\phi) - (c_1\bar{L}\phi R - c_2\bar{L}\phi_c R + h.c.) \\ & + -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q}(\gamma^\mu D''_\mu - m)q \end{aligned}$$

Médiateurs de l'interaction électro-faible

Quarks et leptons

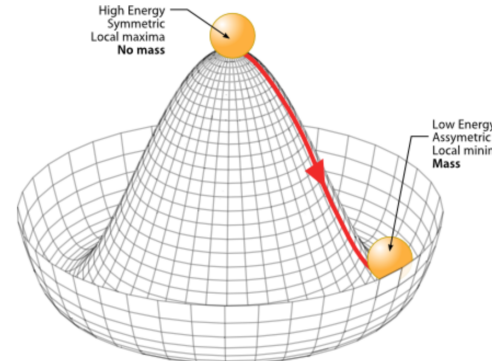
Potentiel et champs de Higgs

Interaction forte - QCD

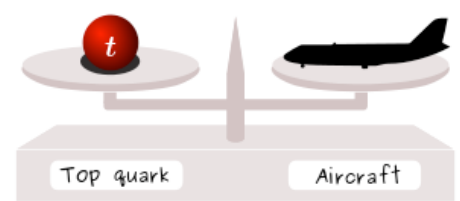
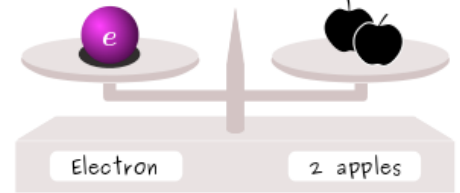
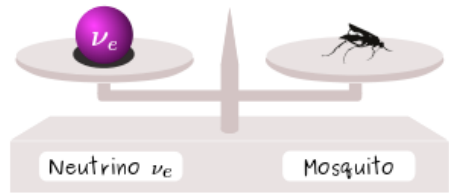
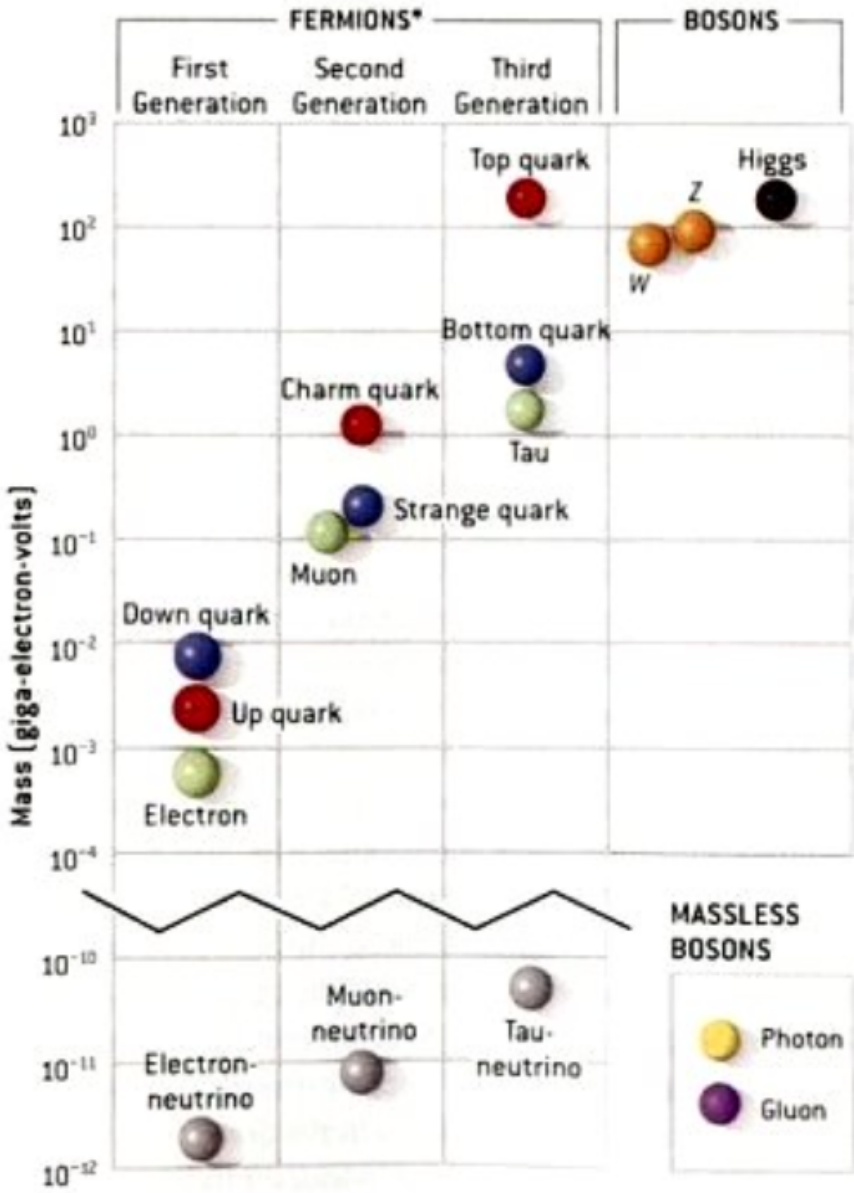
Le Lagrangien du modèle standard de la physique des particules décrit les interactions entre quarks, leptons, médiateurs et décrit le potentiel et le champs de Higgs.

Le Lagrangien est construit dans le cadre de la théorie quantique des champs: renormalisable et invariante par transformations de phase locale.

L'état de plus basse énergie, *le vide*, n'a pas cette invariance:  
**brisure spontanée de symétrie** → **boson de Higgs** → **masse**

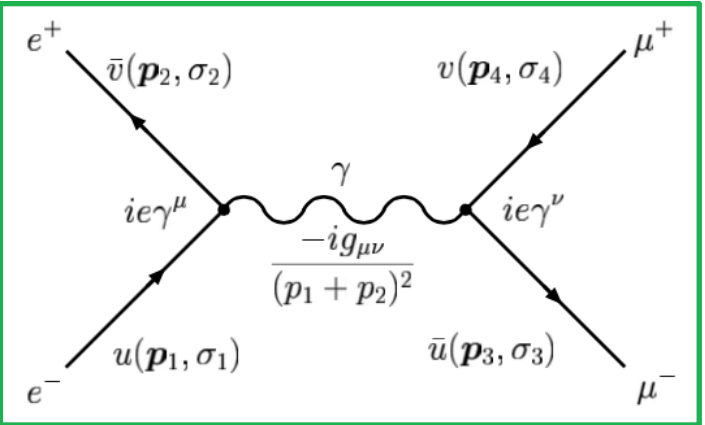


# Les masses des particules élémentaires



La masse des particules n'est pas prédite par le modèle standard de la physique des particules.

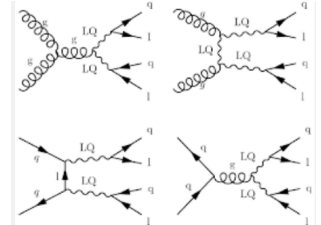
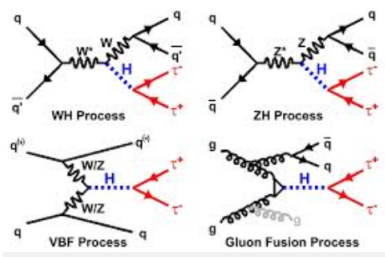
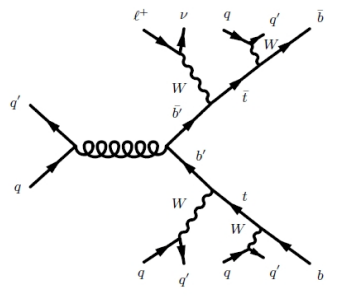
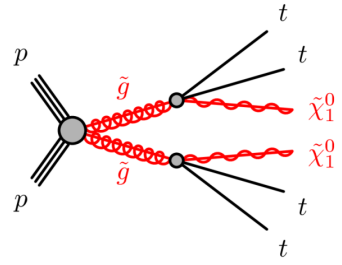
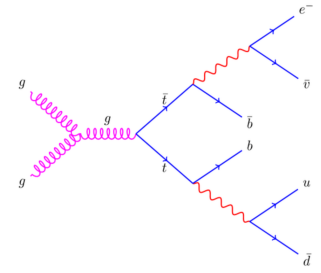
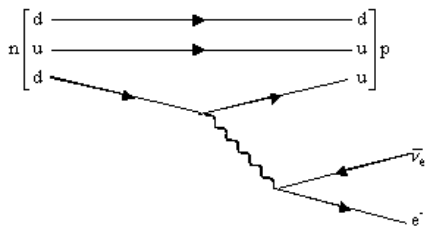
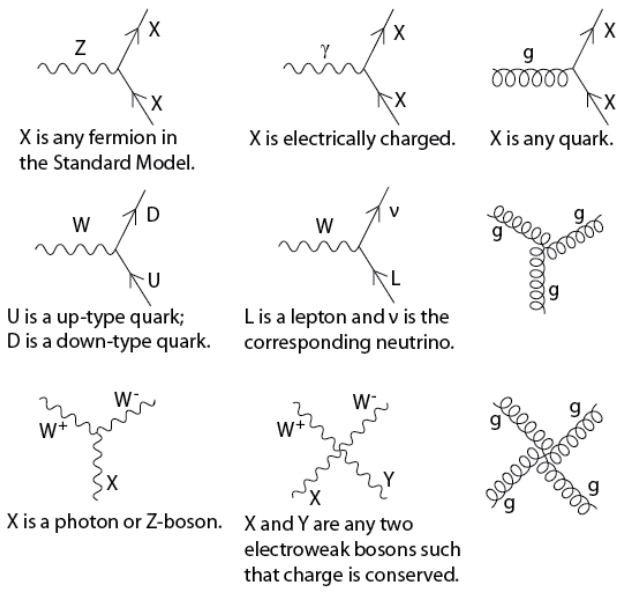
# Graphe de Feynman: représentation des interactions



Un exemple de l'interaction électromagnétique :  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

$$-i\mathcal{M} = [\bar{u}(\mathbf{p}_3, \sigma_3)(ie\gamma^\nu)v(\mathbf{p}_4, \sigma_4)] \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{v}(\mathbf{p}_2, \sigma_2)(ie\gamma^\mu)u(\mathbf{p}_1, \sigma_1)]$$

### Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



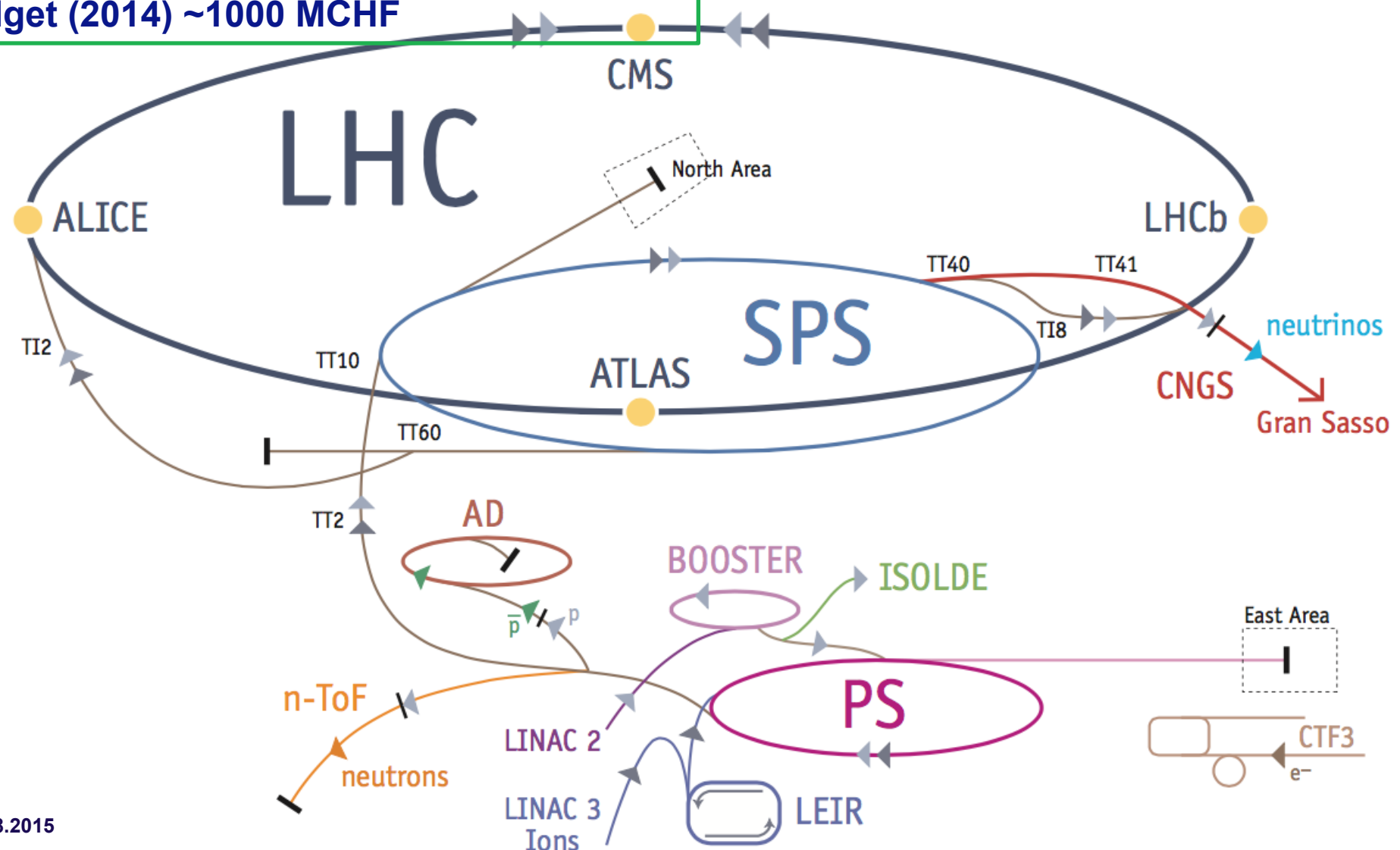
L'étude des processus élémentaires requiert une énergie d'interaction élevée:  
**collisions à très haute énergie** → **accélérateur** → **grandes infrastructures** → **le CERN**

# Le CERN

Le CERN, créé en 1954 par 12 états européens, est aujourd'hui composé de 21 états membres.



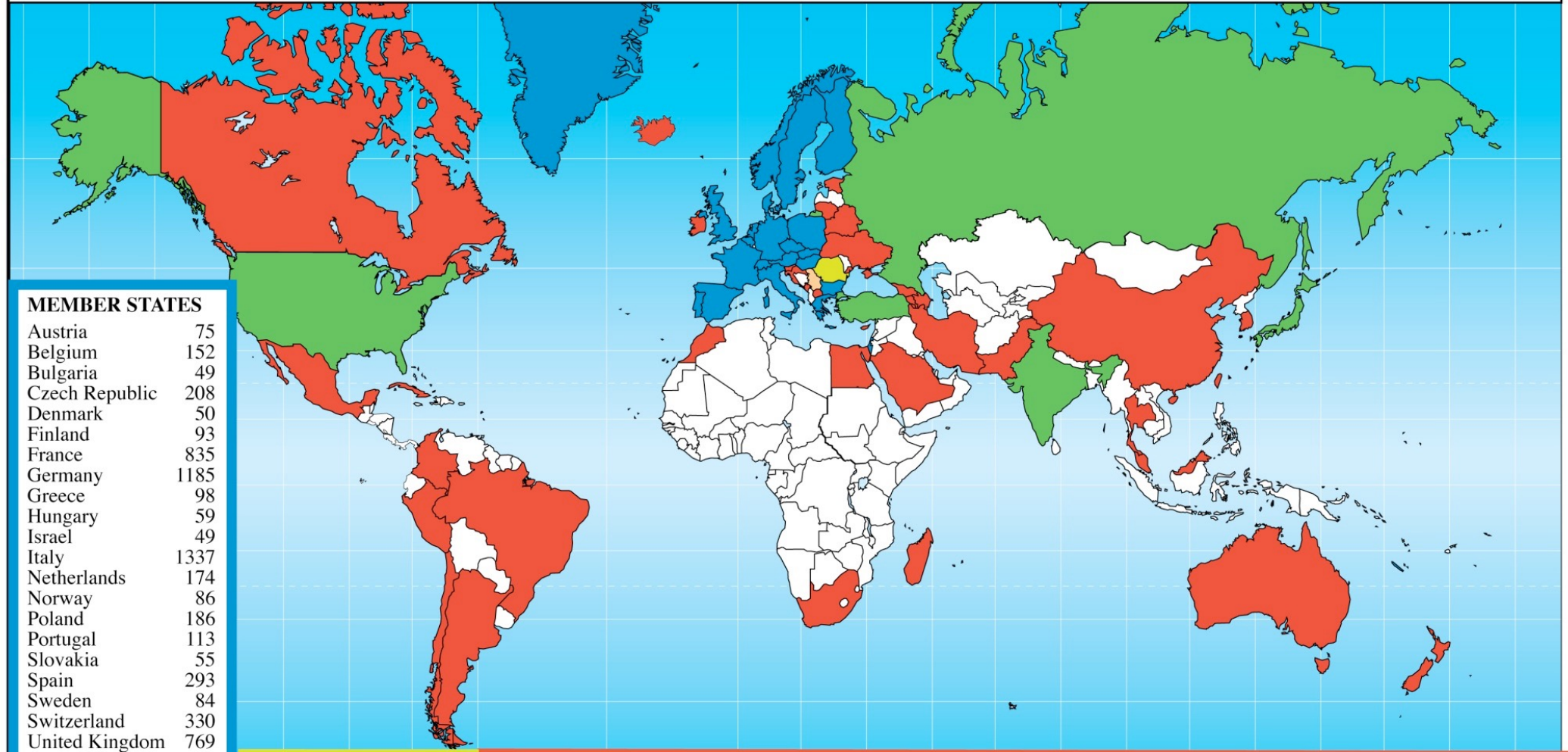
~2300 employés permanents  
~1600 employés sur contrats temporaires  
~10500 utilisateurs  
Budget (2014) ~1000 MCHF





# Le CERN

## Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 14 January 2014



**MEMBER STATES**

Austria	75
Belgium	152
Bulgaria	49
Czech Republic	208
Denmark	50
Finland	93
France	835
Germany	1185
Greece	98
Hungary	59
Israel	49
Italy	1337
Netherlands	174
Norway	86
Poland	186
Portugal	113
Slovakia	55
Spain	293
Sweden	84
Switzerland	330
United Kingdom	769

**6280**

**OBSERVERS**

India	153
Japan	217
Russia	890
Turkey	110
USA	1724

**3094**

**CANDIDATE FOR ACCESSION**

Romania	86
---------	----

**ASSOCIATE MEMBER IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP**

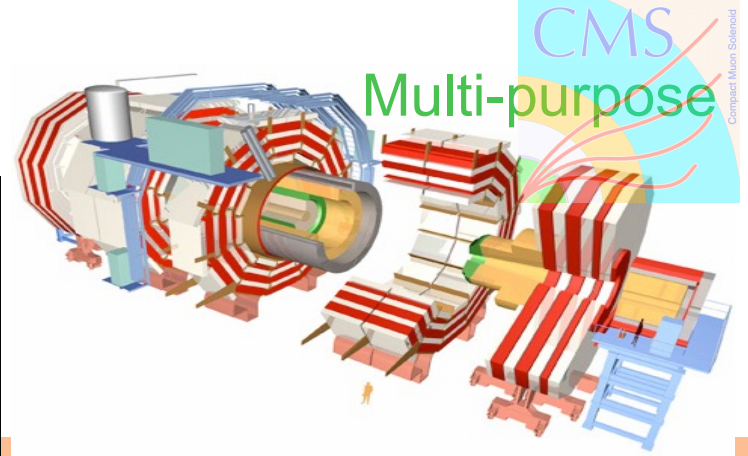
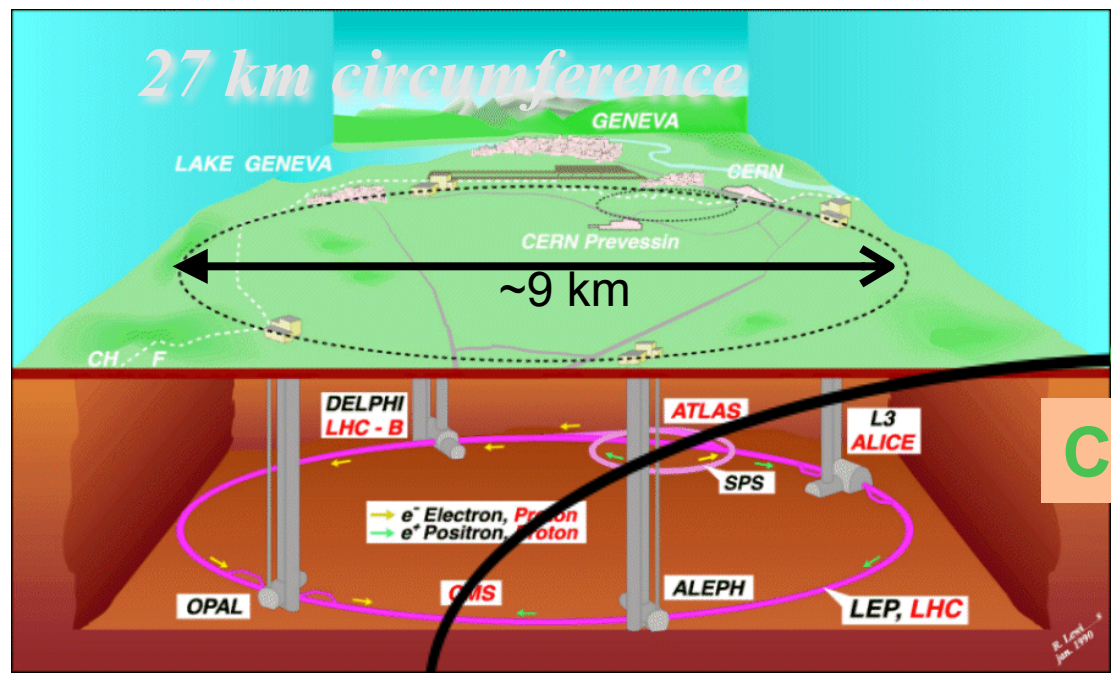
Serbia	30
--------	----

**OTHERS**

China	122	Iran	20	Pakistan	18
China (Taipei)	71	Ireland	5	Peru	2
Colombia	10	Korea	105	Saudi Arabia	3
Croatia	23	Lithuania	13	Slovenia	25
Cuba	3	Madagascar	3	South Africa	32
Azerbaijan	2	Malaysia	8	Thailand	8
Belarus	24	Mexico	46	T.F.Y.R.O.M.	1
Brazil	116	Montenegro	1	Ukraine	24
Canada	147	Morocco	6		
Chile	8	New Zealand	5		

**982**

# LHC et détecteurs

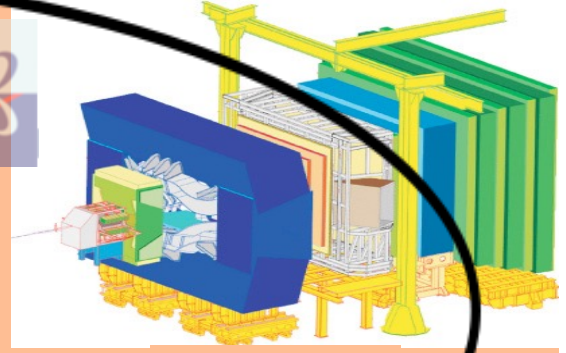


100 metres sous terre

CMS



CP violation



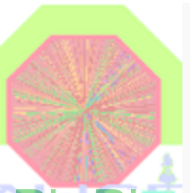
LHC

LHCb

ALICE

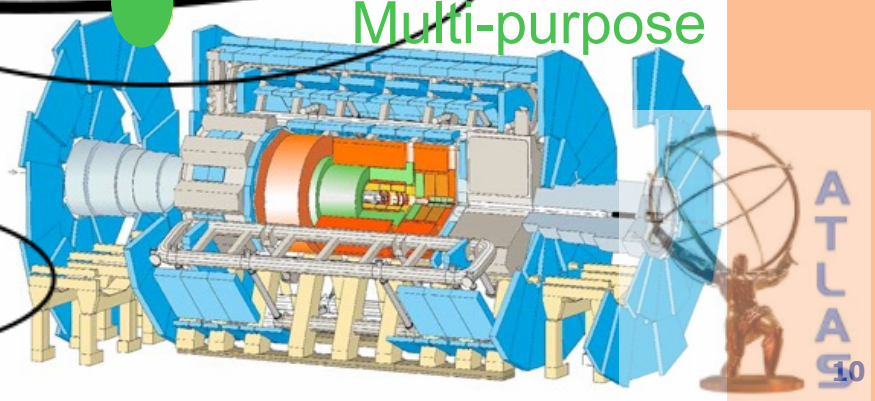
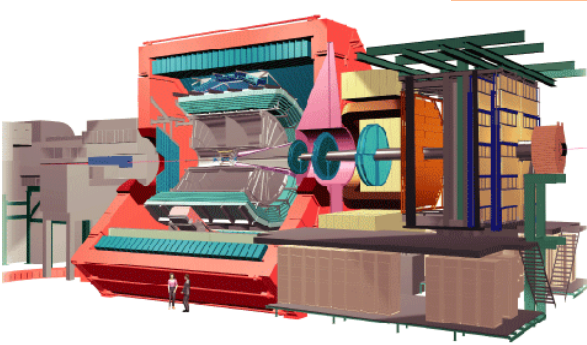
SPS

ATLAS



Pb Pb - Pb-p collisions

Multi-purpose



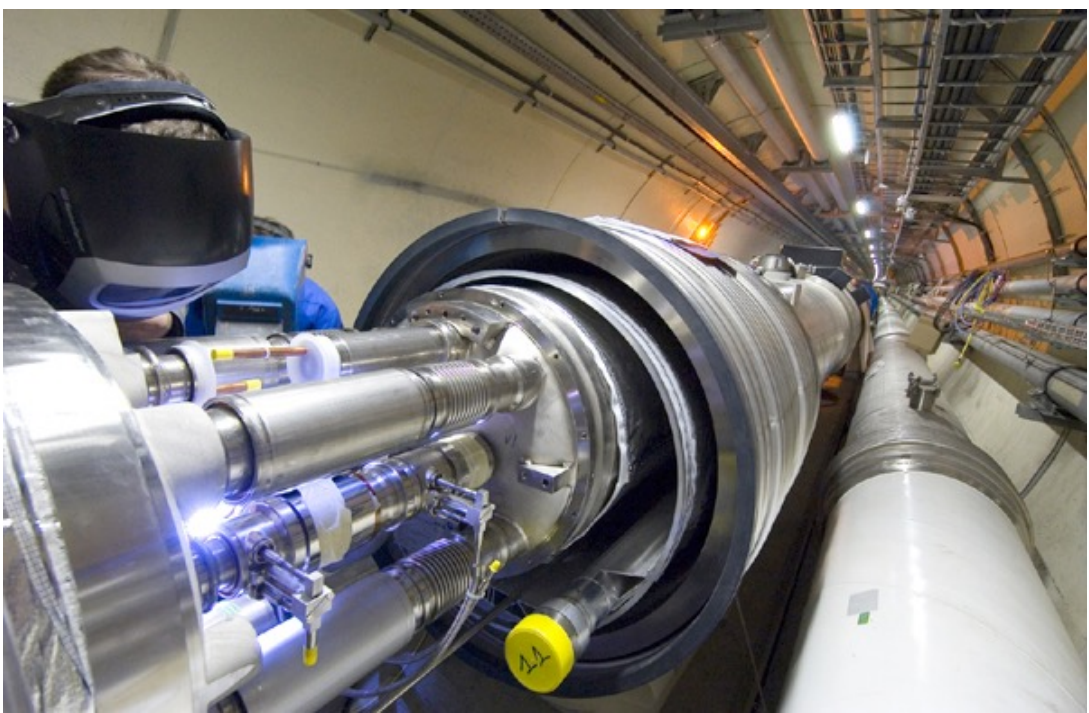
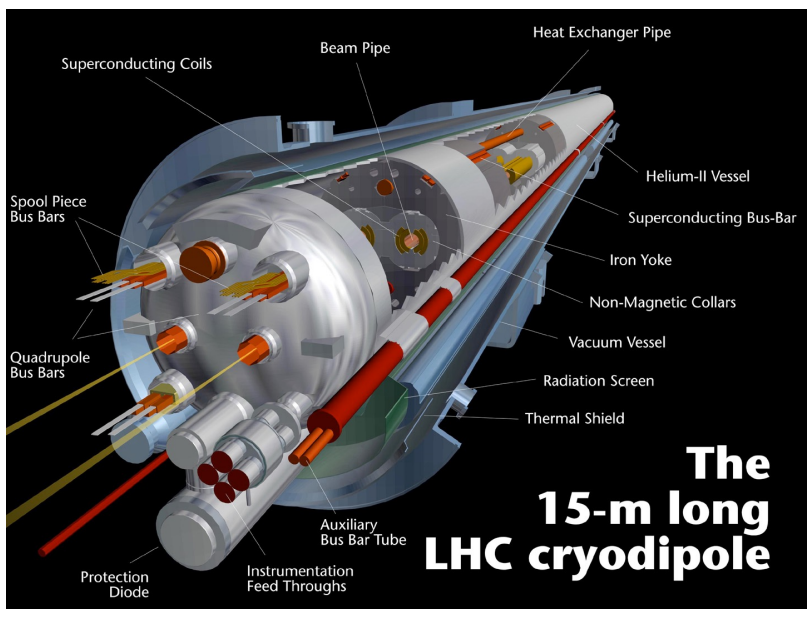
ATLAS

**LE PASSE  
CONSTRUCTION  
&  
RUN I**

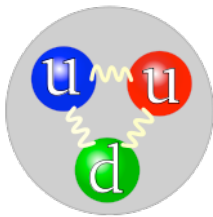
# Large Hadron Collider: collisions proton-proton à $\sqrt{s}=14$ TeV

Présentation Jorg Wenninger

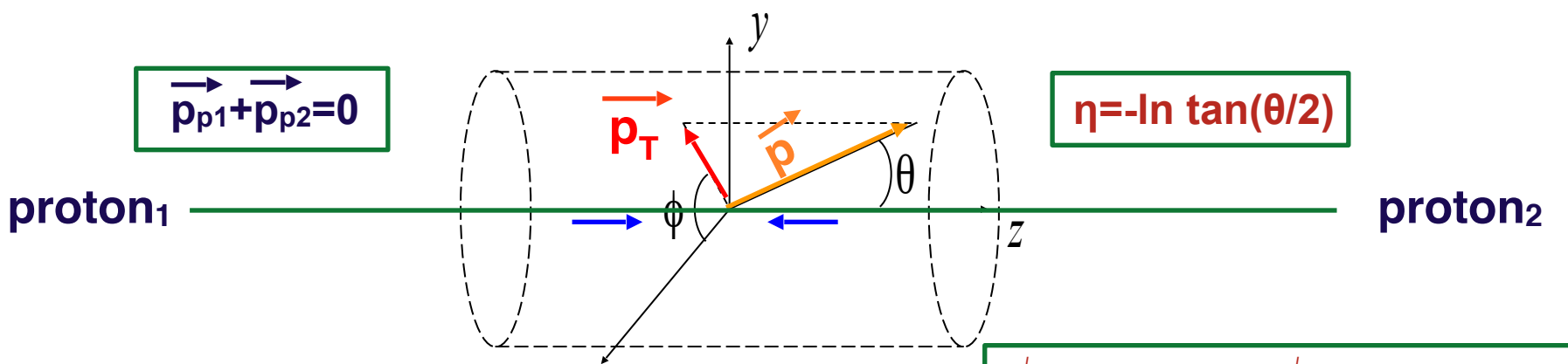
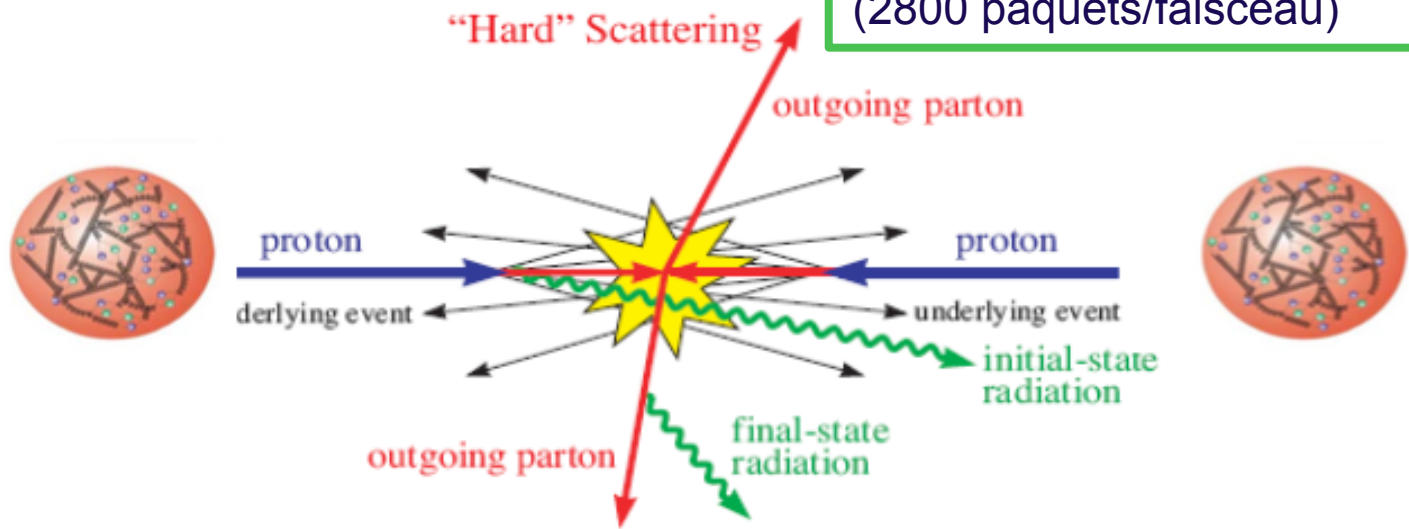
- $E_{\text{proton}} = 7$  TeV
- Circonférence: 27 km
- Champ magnétique à 7 TeV: 8.33 Tesla
- Helium super-fluide à  $\Theta = 1.9$  K
- 9300 aimants
  - 1232 dipôles
  - 858 quadropoles
  - 6208 aimants correcteurs
- Huit cavités radio-fréquence/faisceau
- Puissance électrique: 120 MW



# Interactions p-p et variables cinématiques



**Empilement**  
 1011 protons/paquet → multi-interactions  
 (2800 paquets/faisceau)



$$\vec{p}_{p1} + \vec{p}_{p2} = 0$$

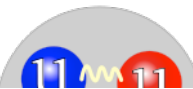
$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

**Balance en énergie dans le plan transverse →  
 détection d'énergie *transverse* manquante**

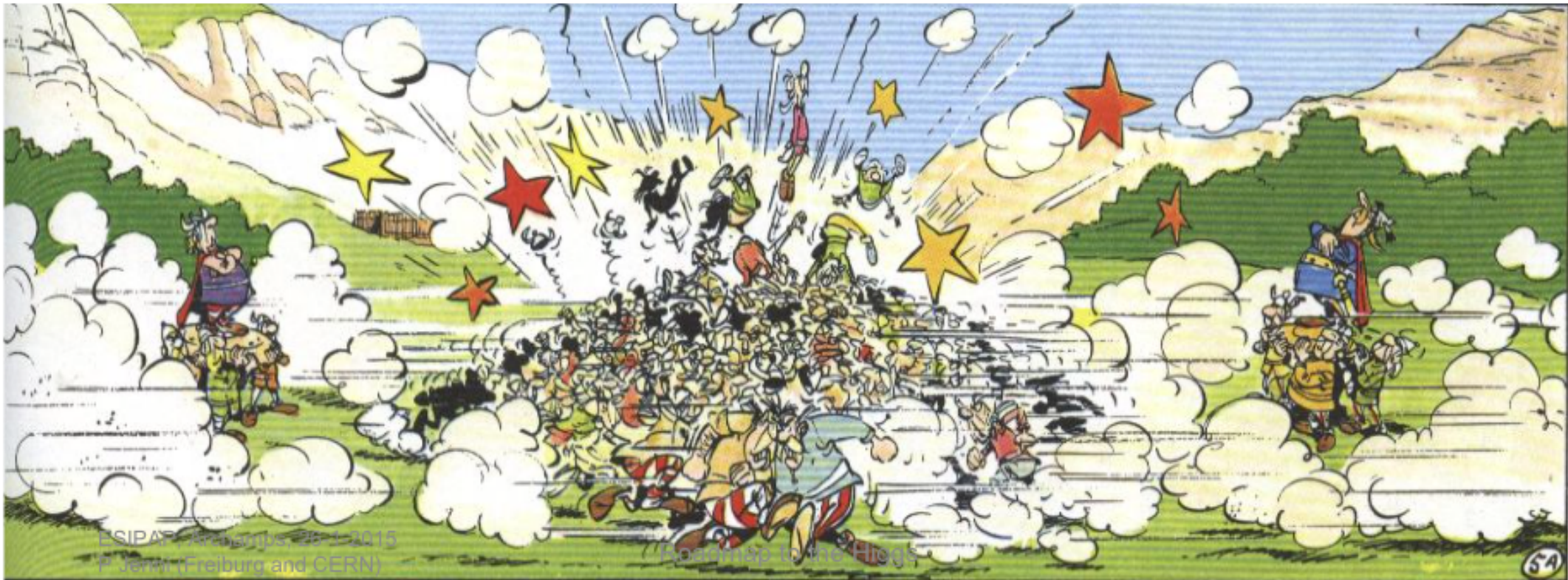
$$\sqrt{s} = E_{p1} + E_{p2} \rightarrow \sqrt{s_{dure}} = E_{parton1} + E_{parton2}$$

$$M_{12} = \sqrt{[2E_1 \cdot E_2 (1 - \cos \alpha_{12})]}$$

# Interactions p-p et variables cinématiques



## Empilement



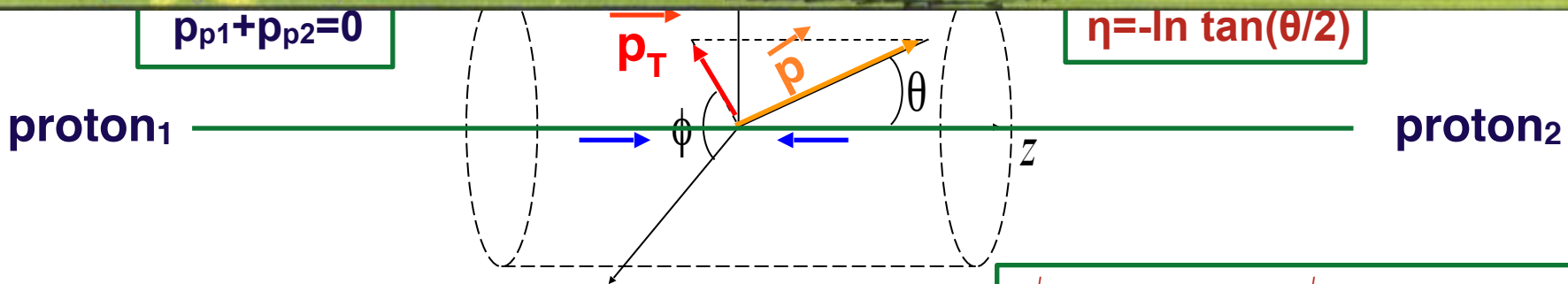
ESIPAF Arcamps, 25-1-2015  
P. Jenni (Freiburg and CERN)

Roadmap to the Higgs

54

$$\vec{p}_{p1} + \vec{p}_{p2} = 0$$

$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

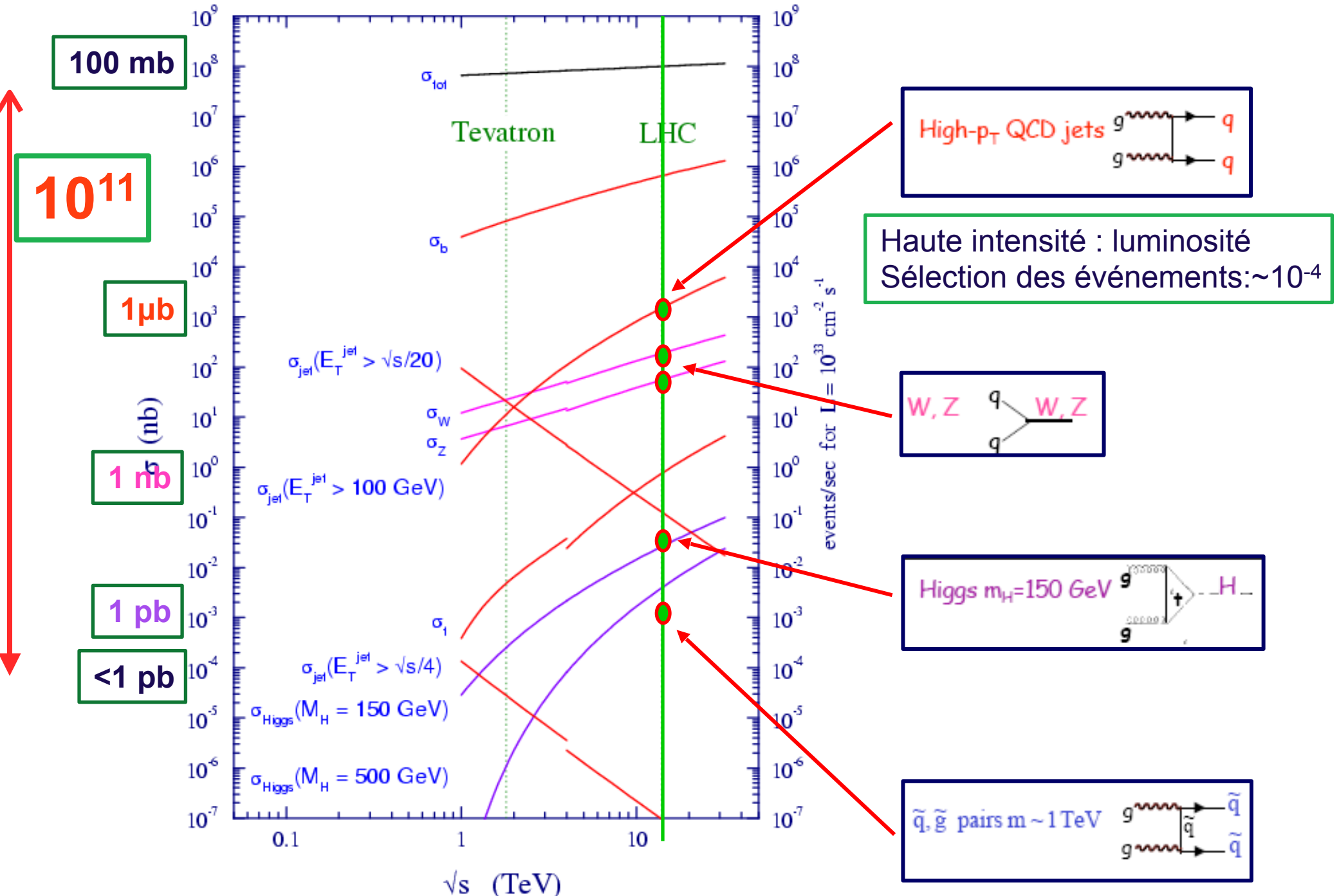


**Balance en énergie dans le plan transverse →  
détection d'énergie *transverse* manquante**

$$\sqrt{s} = E_{p1} + E_{p2} \rightarrow \sqrt{s_{dure}} = E_{parton1} + E_{parton2}$$

$$M_{12} = \sqrt{[2E_1 \cdot E_2 (1 - \cos \alpha_{12})]}$$

# Collisions proton-proton à $\sqrt{s}=14$ TeV



# Les caractéristiques du LHC

	Run I	Run II	HL-LHC
Energie [TeV]	3.5 - 4	6.5 (6.8 ?)	6.5 (7 ?)
$\beta^*$ [m]	1	0.4	0.4
Nbre de proton/bunch	$1.2 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	
Energie stockée [MJ/faisceau]	~200	~300	
Luminosité instantanée [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	$0.7 \cdot 10^{34}$	$2 \cdot 10^{34}$	$5 \cdot 10^{34}$
$\int L \cdot dt$ (1 an)	5-15 $\text{fb}^{-1}$	30 $\text{fb}^{-1}$	100 $\text{fb}^{-1}$

Un paramètre important: la luminosité  $L$

$$L \propto \frac{N_p N_p}{A_{xy}} [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$N_p$  = nombre de protons/faisceaux/s

$A_{xy}$  = surface transverse intersection des faisceaux

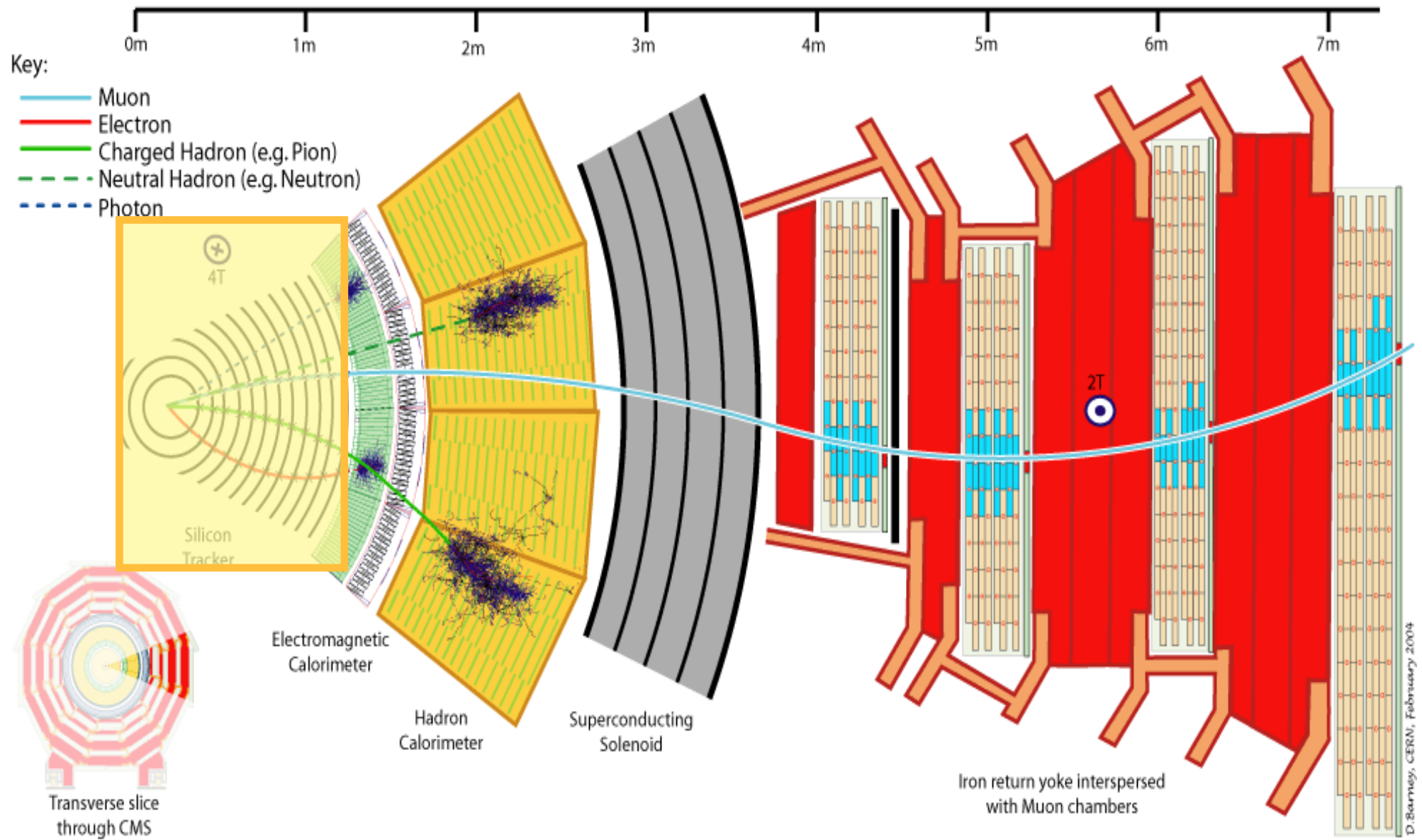
$\sigma$  = section efficace du processus concerné

Taux de production de (nouvelles) particules

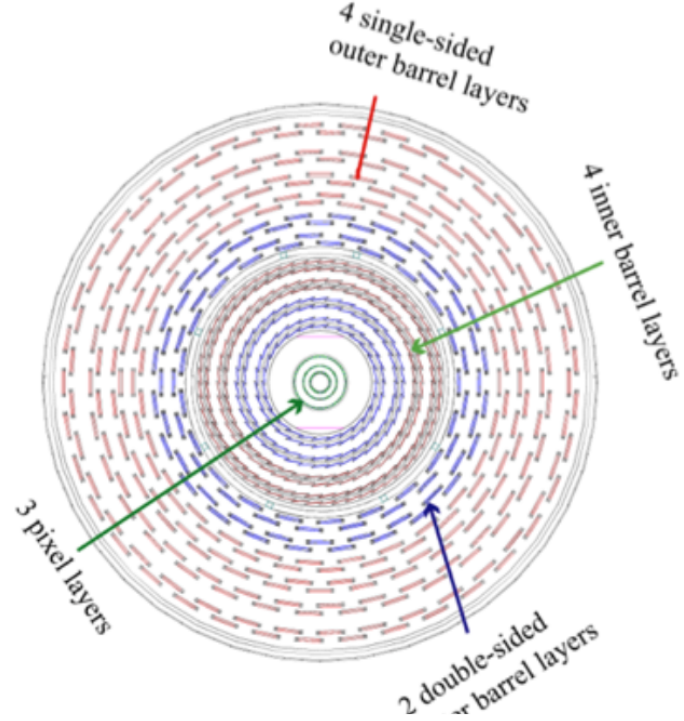
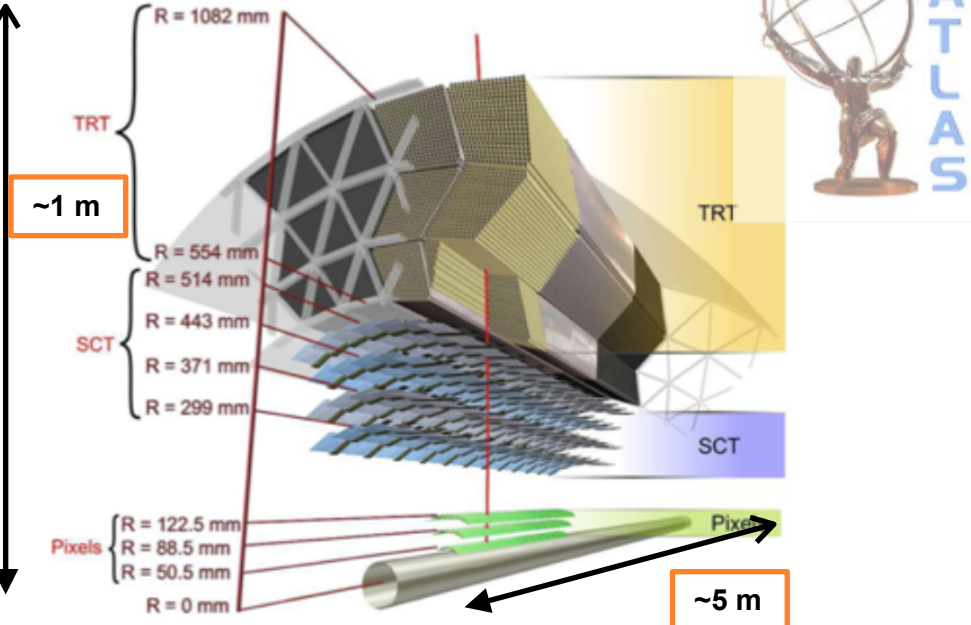
$$\frac{N}{\Delta t} = L [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot \sigma [\text{cm}^2]$$



# Détecteurs: principe

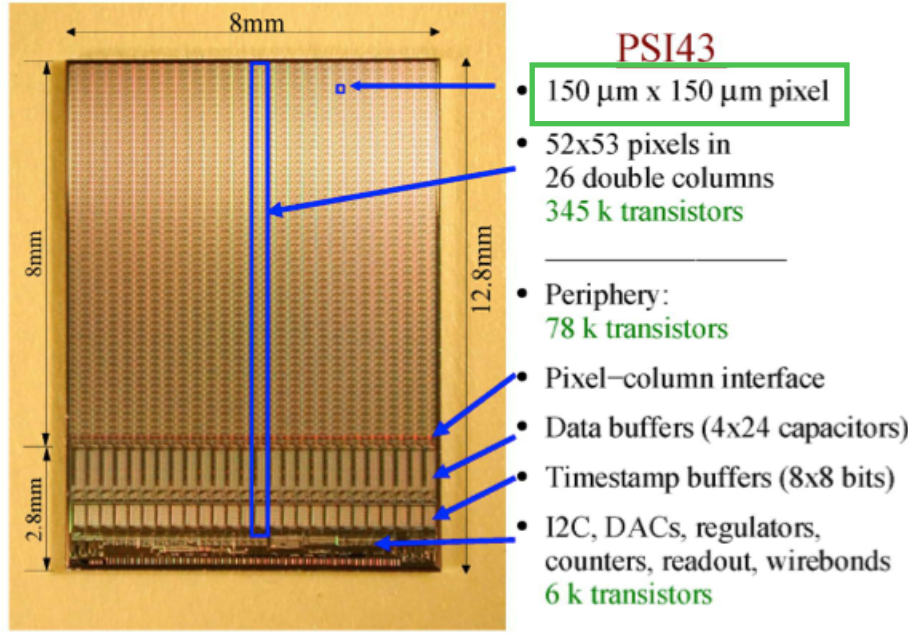
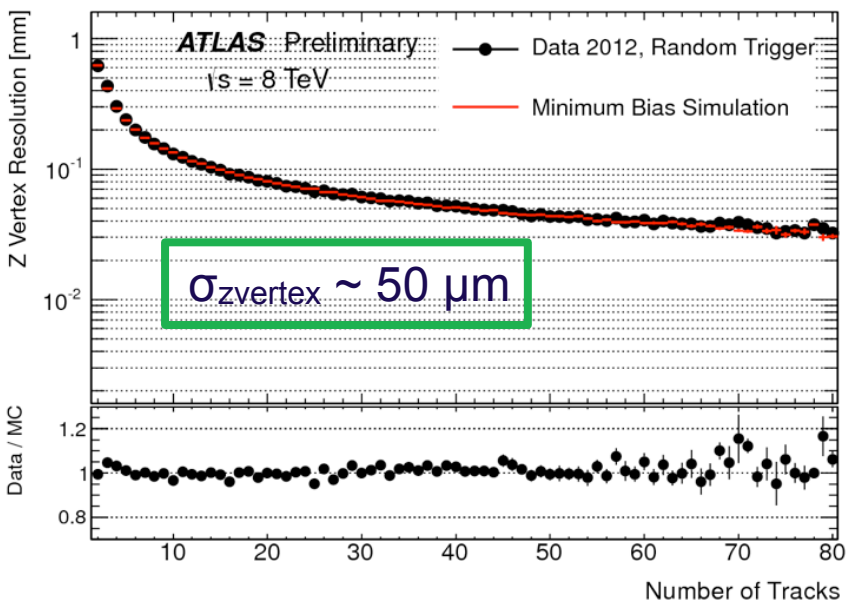


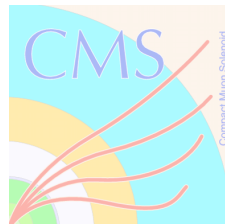
# Vertex et traces



Champ magnétique 2T  
Silicium + Radiation de Transition

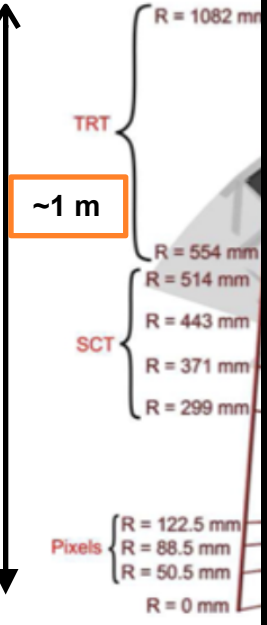
Champ magnétique 4T  
Tout Silicium



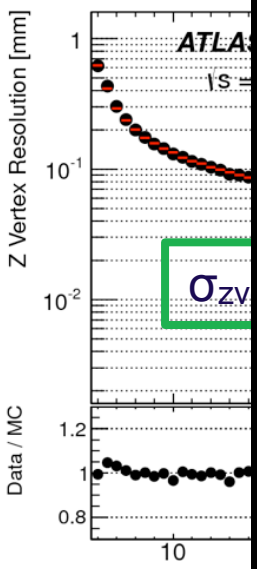
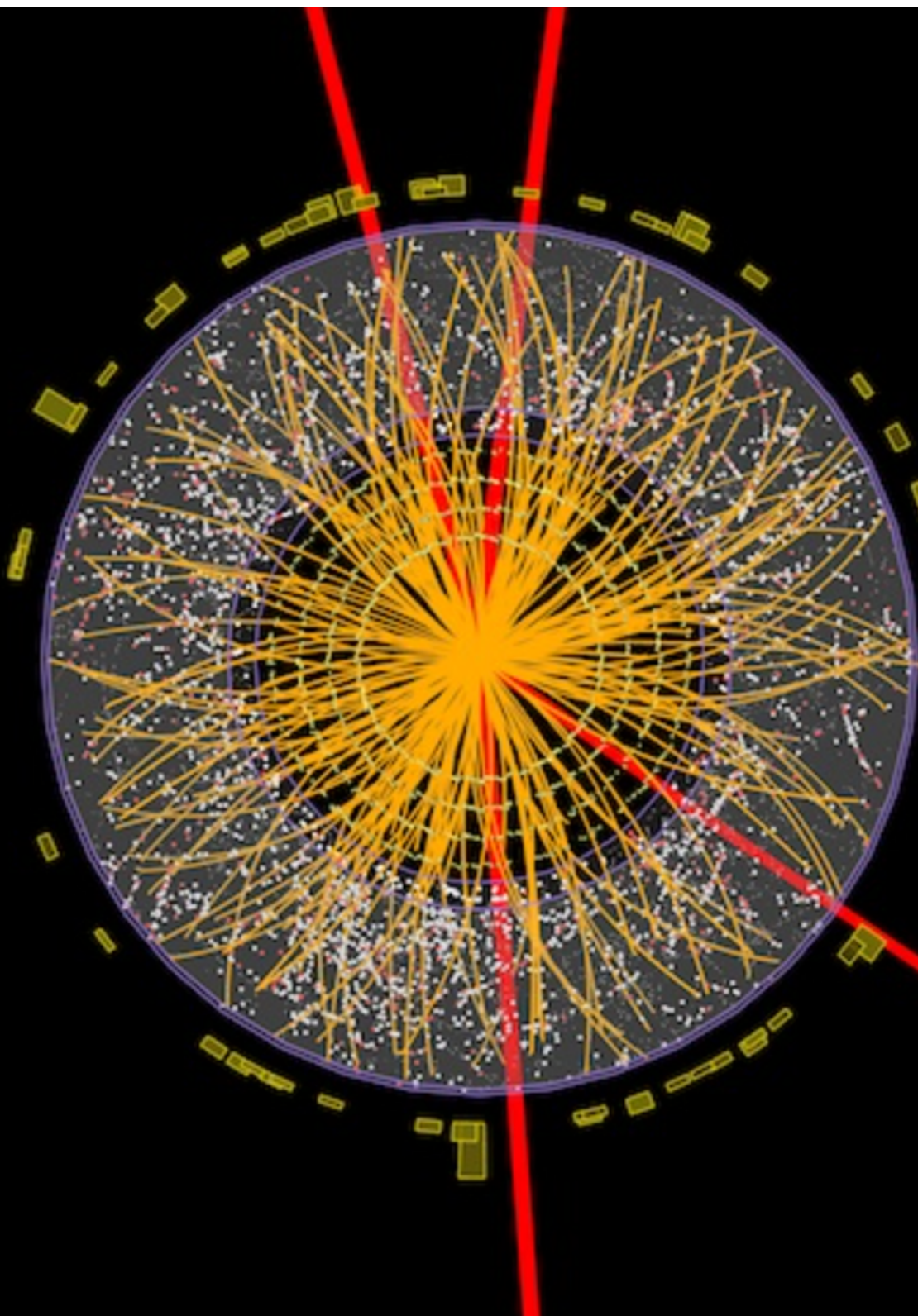


barrel layers

# Vertex



Champ  
Silicium



## PSI43

$150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$  pixel

53 pixels in double columns  
k transistors

phery:  
k transistors

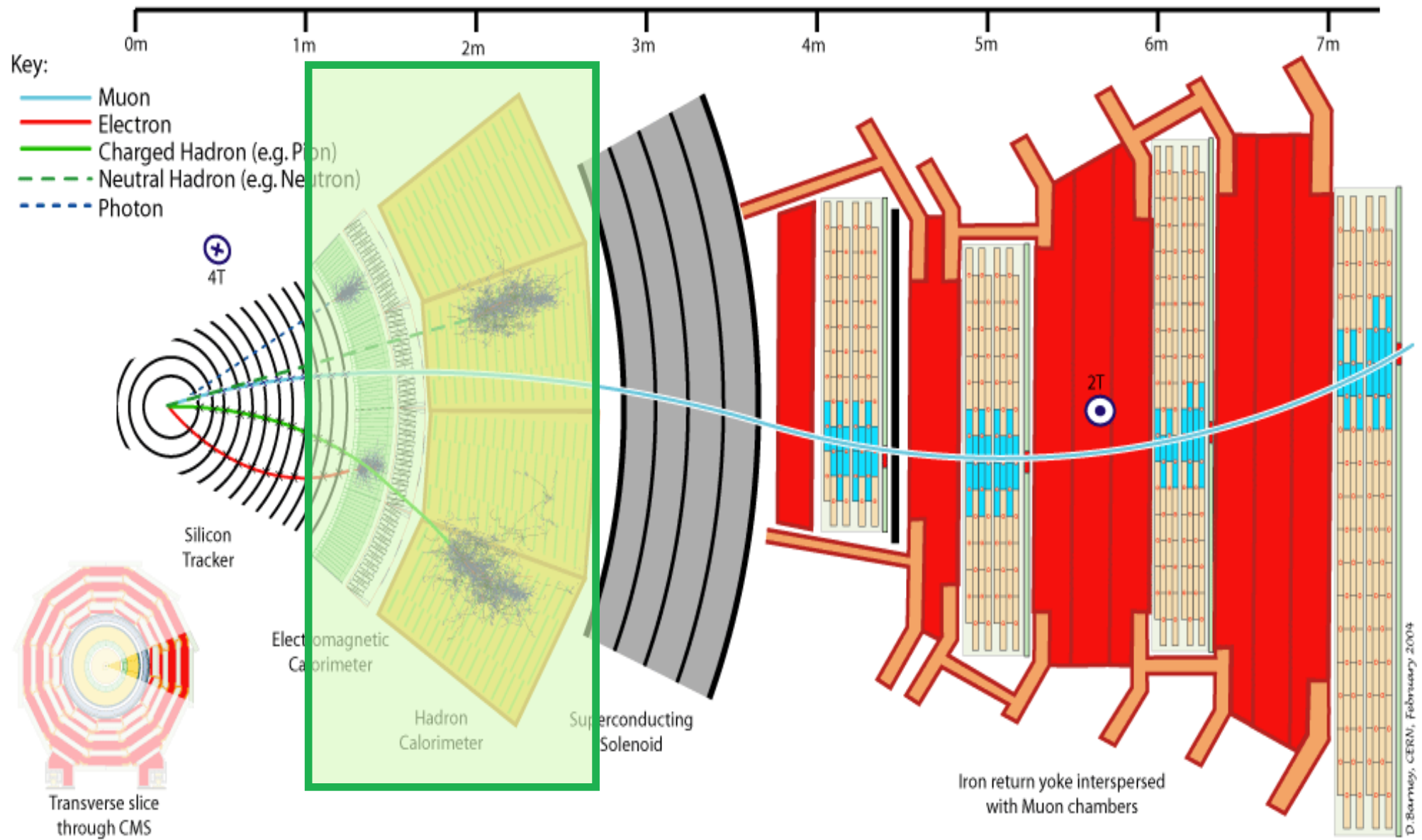
el-column interface

a buffers (4x24 capacitors)

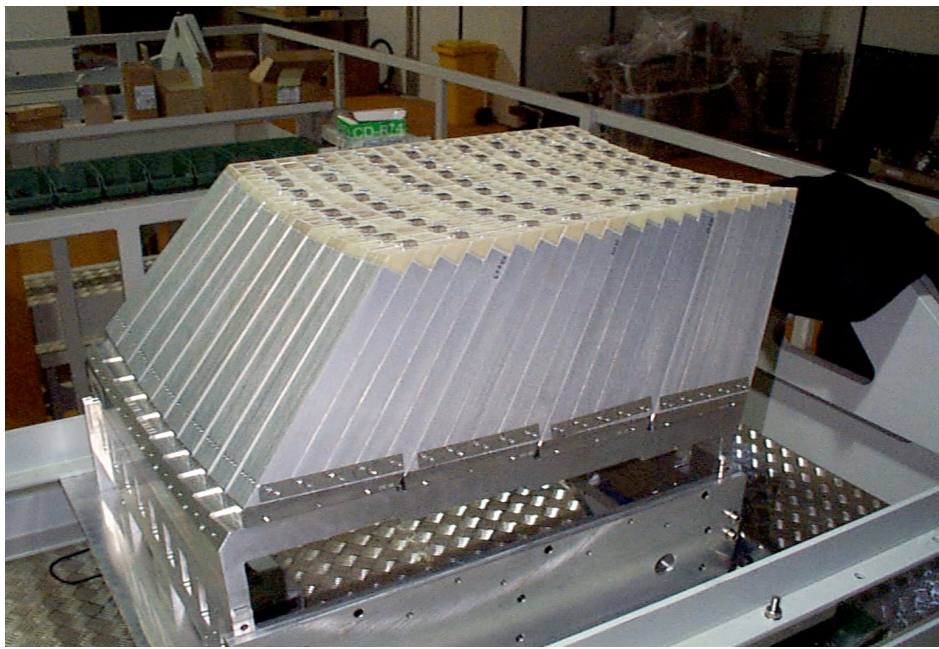
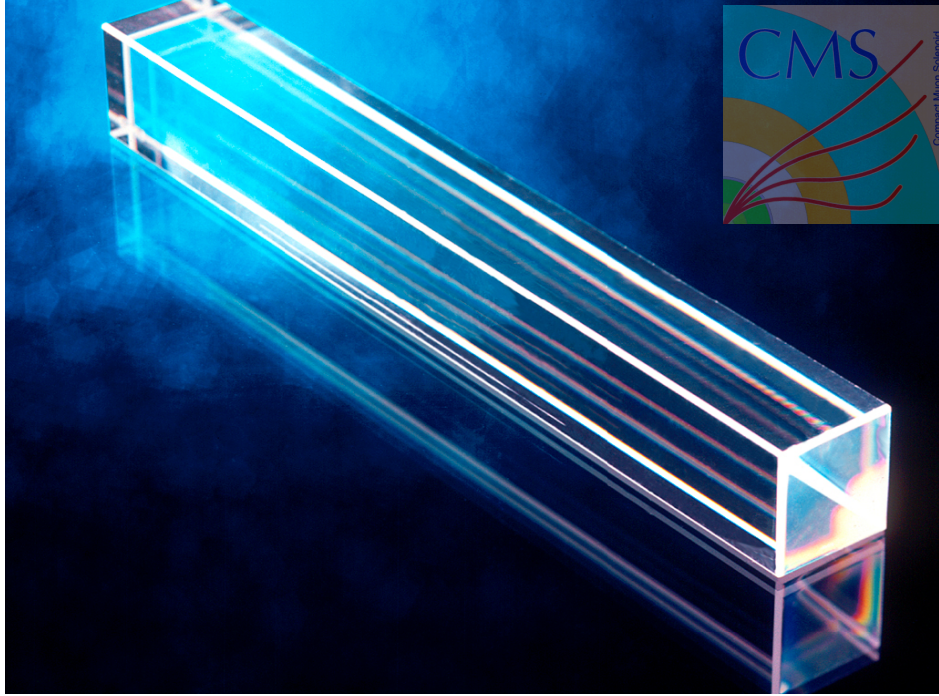
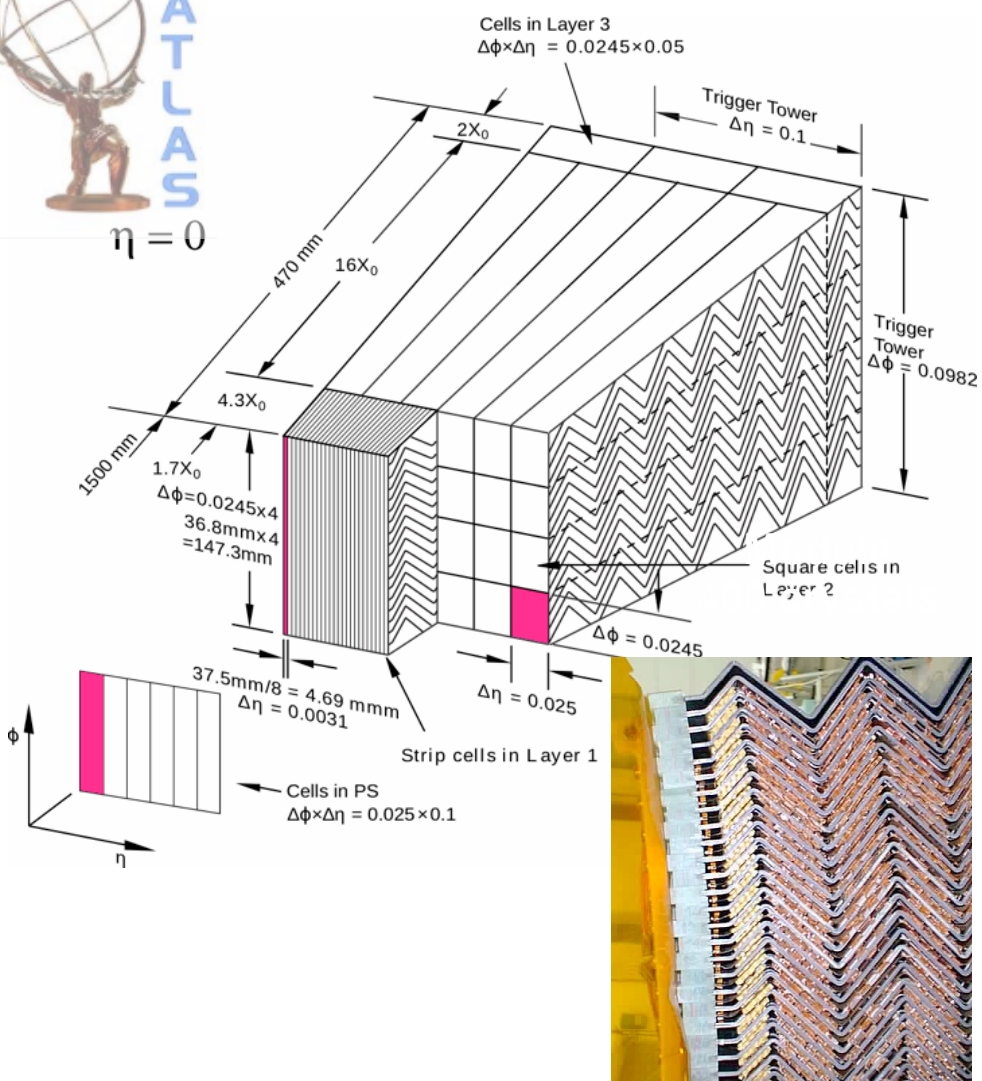
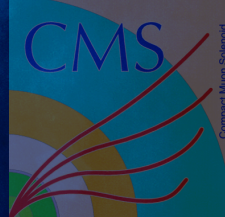
estamp buffers (8x8 bits)

, DACs, regulators,  
nters, readout, wirebonds  
transistors

# Détecteurs: calorimètres



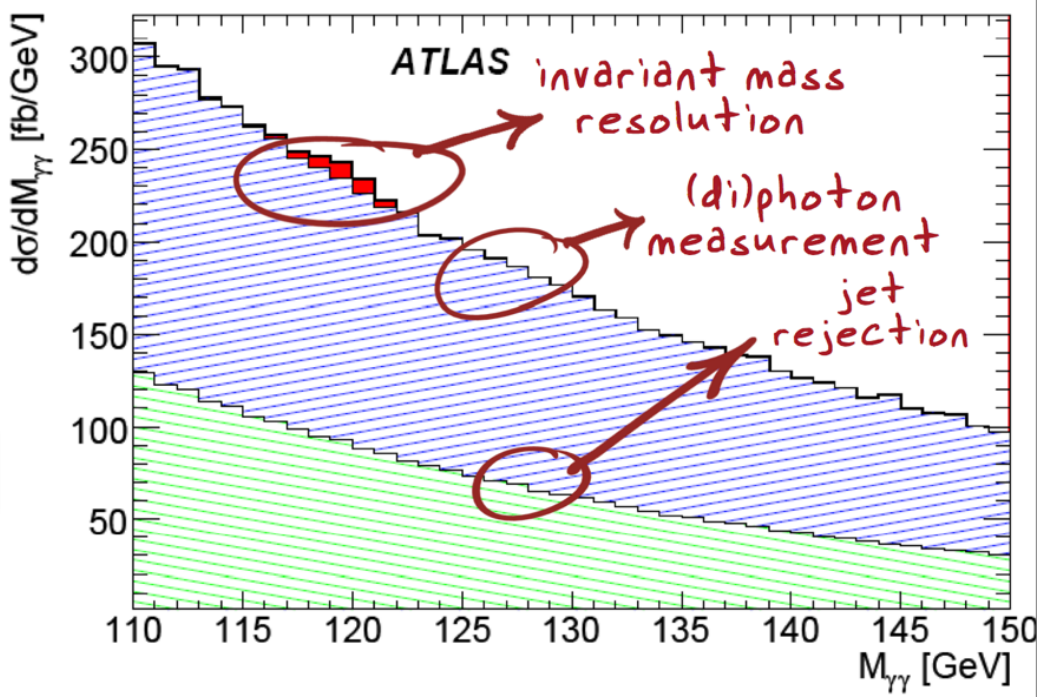
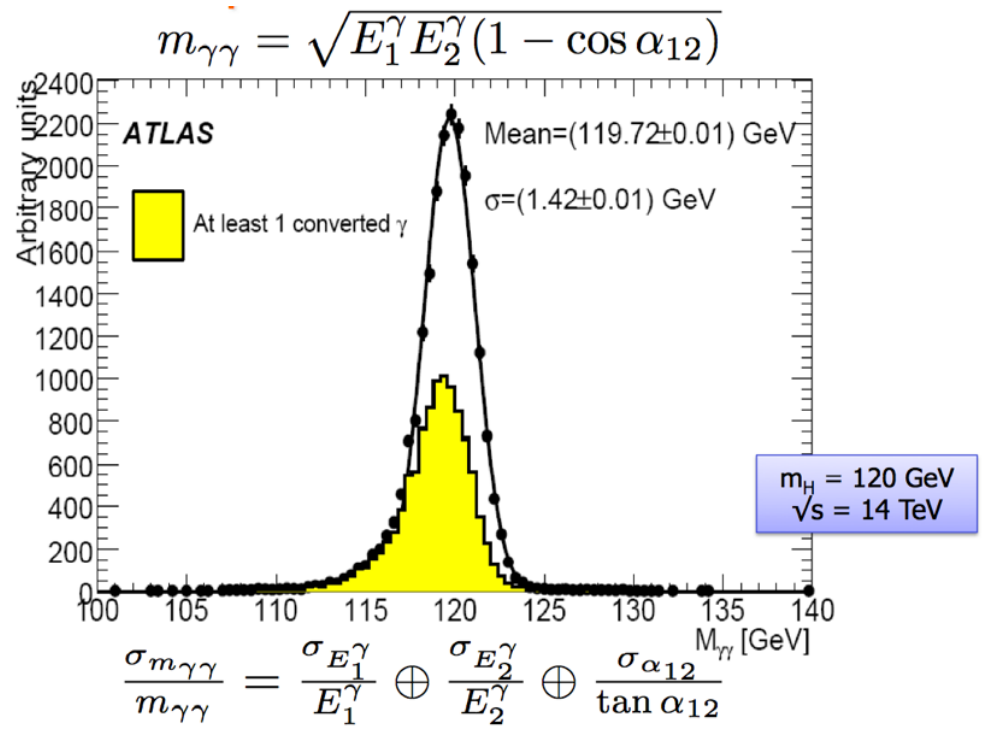
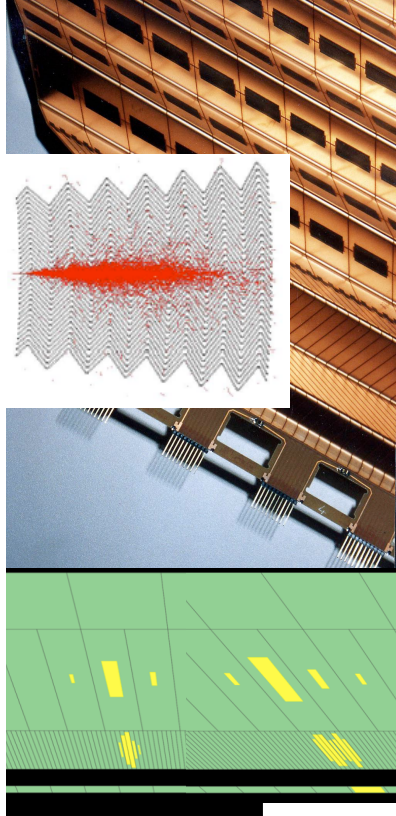
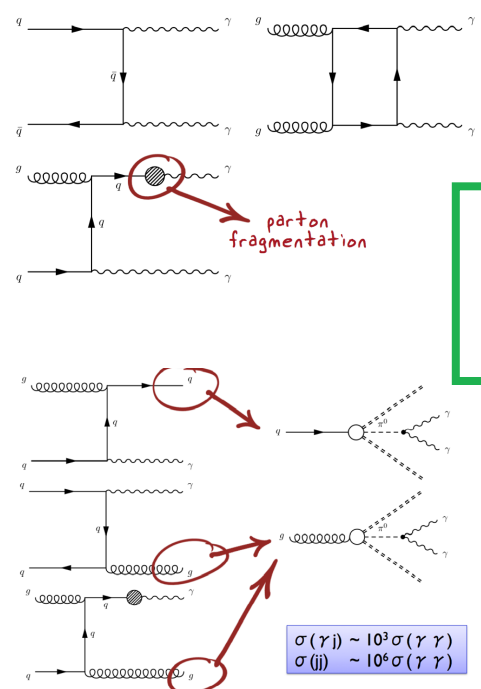
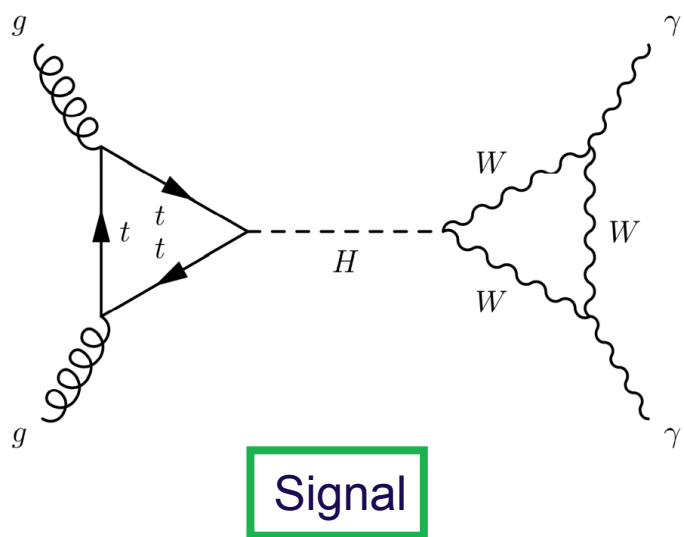
# Calorimètre et énergie



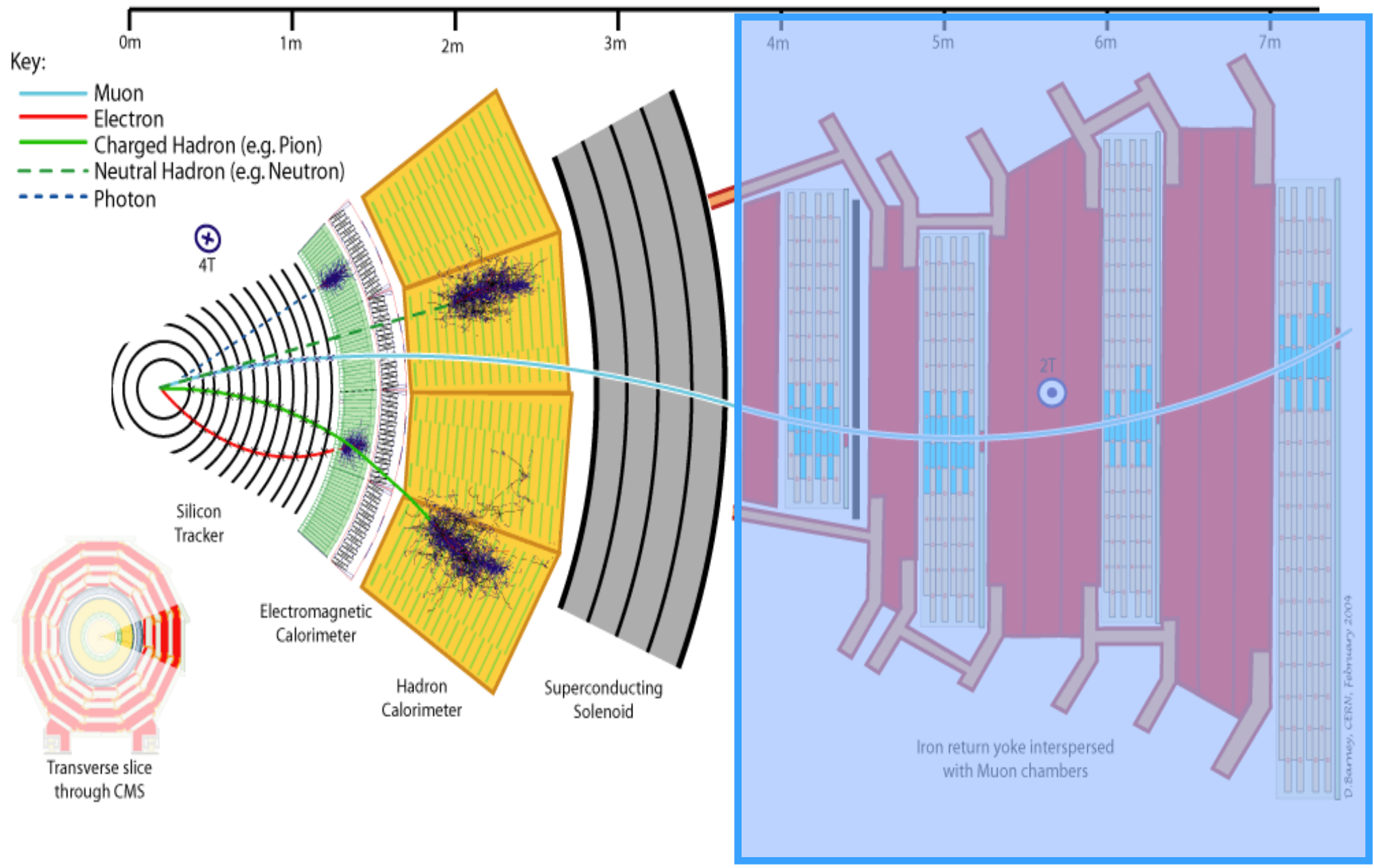
170k canaux - L=6 m - R<sub>min</sub>=1.4m  
 $\Delta E/E \sim 10\%/\sqrt{E} \oplus 150 \text{ MeV}/E \oplus 0.7\%$   
 (~1% à m=100 GeV)  
 Résolution angulaire 50mrad/ $\sqrt{E}(\text{GeV})$

75k canaux  
 $\Delta E/E \sim 3-5\%/\sqrt{E} \oplus 150 \text{ MeV}/E \oplus 0.5\%$

# Calorimètre conçu pour détecter $H \rightarrow \gamma\gamma$



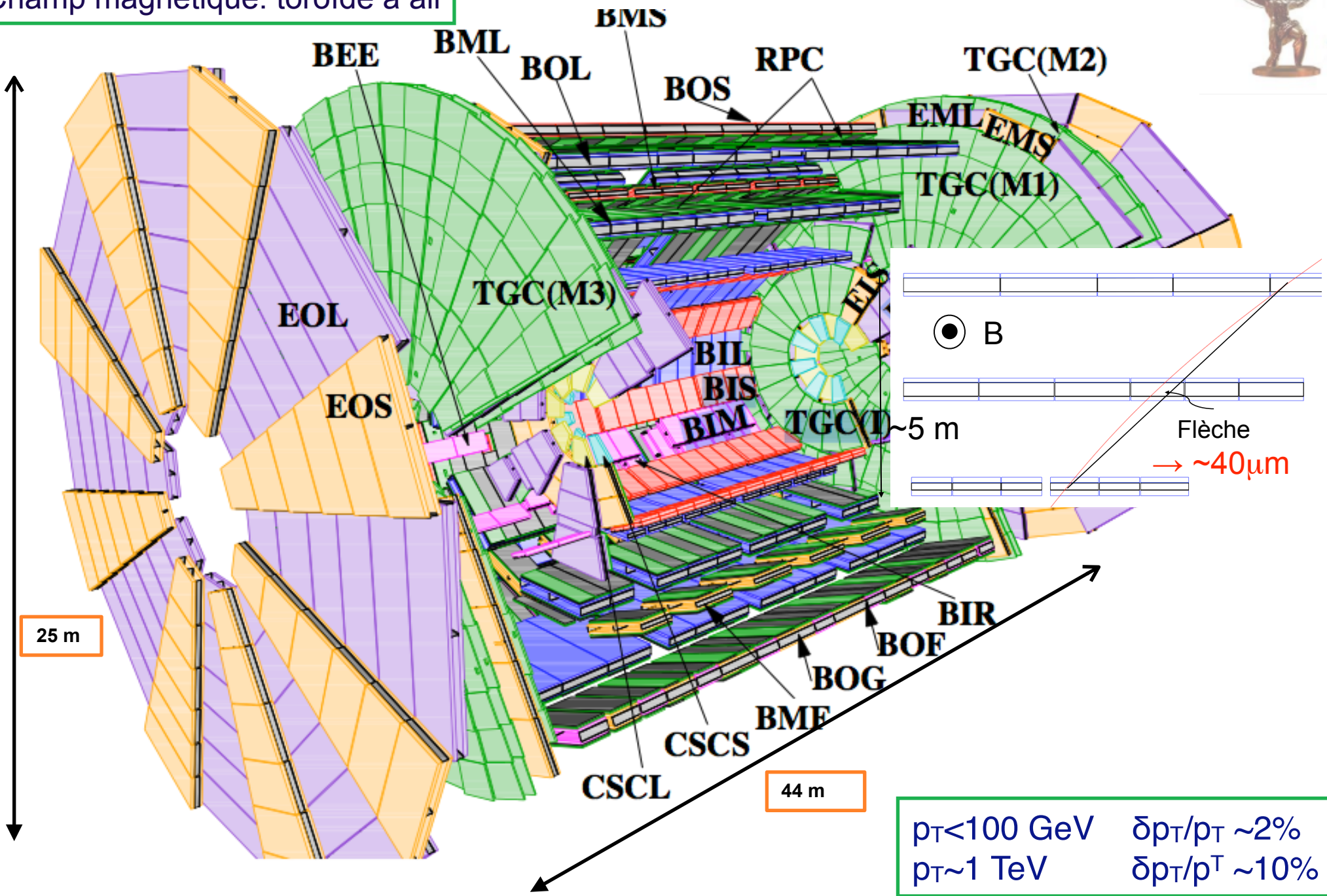
# Détecteurs: muons





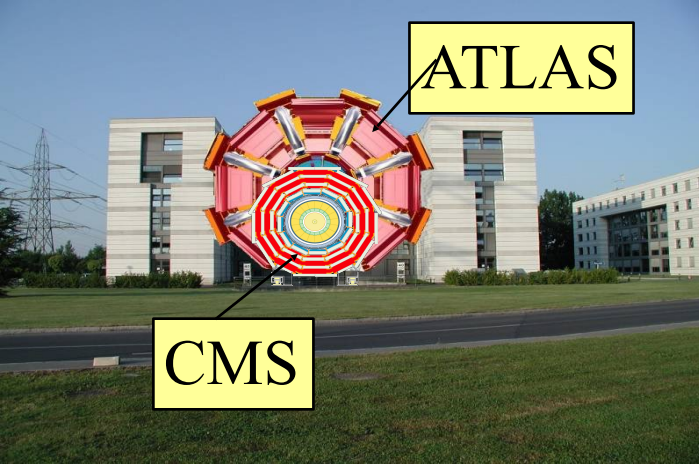
# Muons

Champ magnétique: toroïde à air



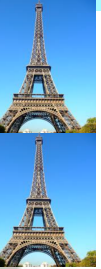
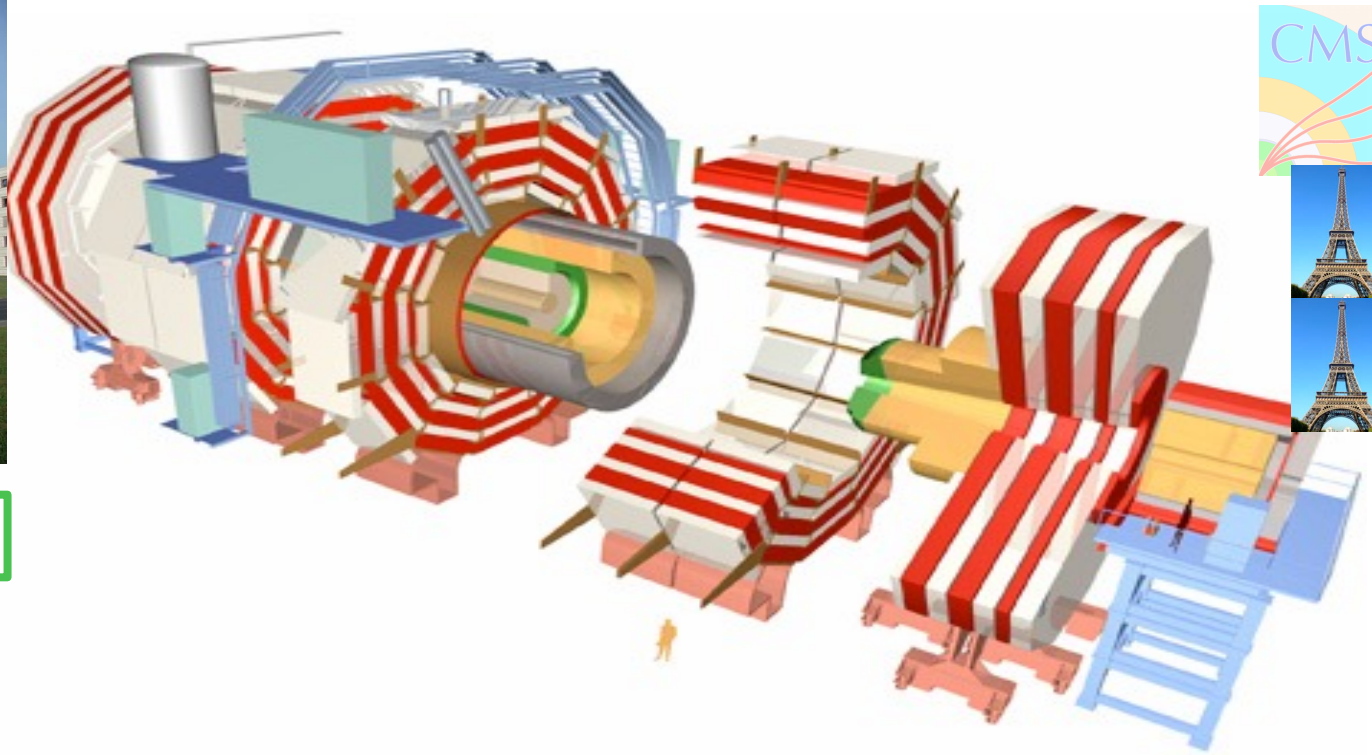
$p_T < 100 \text{ GeV}$      $\delta p_T / p_T \sim 2\%$   
 $p_T \sim 1 \text{ TeV}$      $\delta p_T / p_T \sim 10\%$



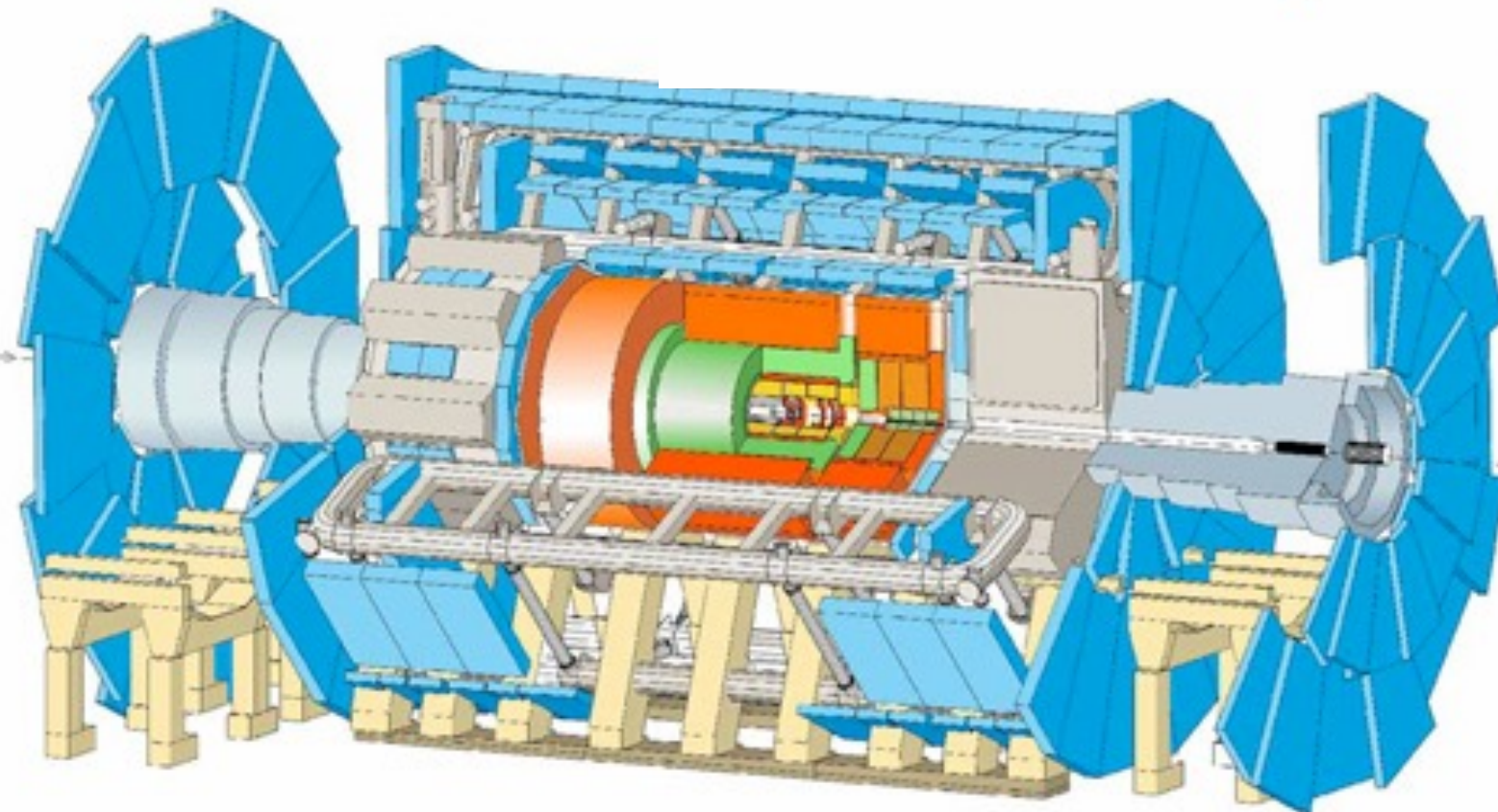


ATLAS

CMS



~3000 physiciens/collaboration



# Expérience LHCb: production de quark b à l'avant

- **TWO-LEVEL TRIGGER:**
    - L0 hardware (12 → 1 MHz)
    - HLT software (1 → 0.005 MHz)
- Very good  $\epsilon(\mu)$   
Good  $\epsilon(h)$

**VERTEX DETECTOR**  
reconstruct vertices  
decay time resolution: 46 fs  
IP reconstruction: 20  $\mu\text{m}$

**TRACKING SYSTEM**  
momentum resolution  
 $\Delta p/p = 0.4\% - 0.6\%$

**COLLISIONS @ 40 MHz**  
  
~12 MHz  
**VISIBLE INTERACTIONS (2012)**

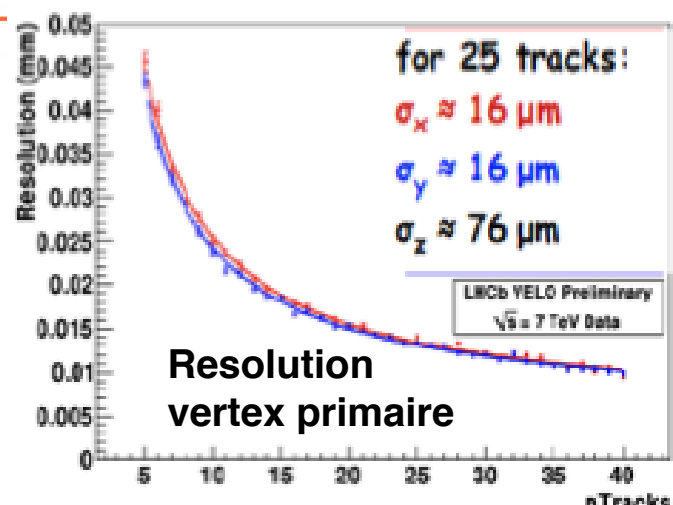
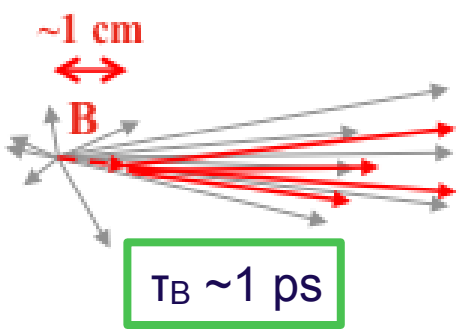
y  
z  
x  
  
z ~ 20 m  
y ~ 10 m  
x ~ 13 m

**DIPOLE MAGNET**  
4 Tm  
normal conducting  
regular polarity switches

**RICH DETECTORS**  
K/ $\pi$ /p separation

**CALORIMETERS**  
energy measurement  
particle identification

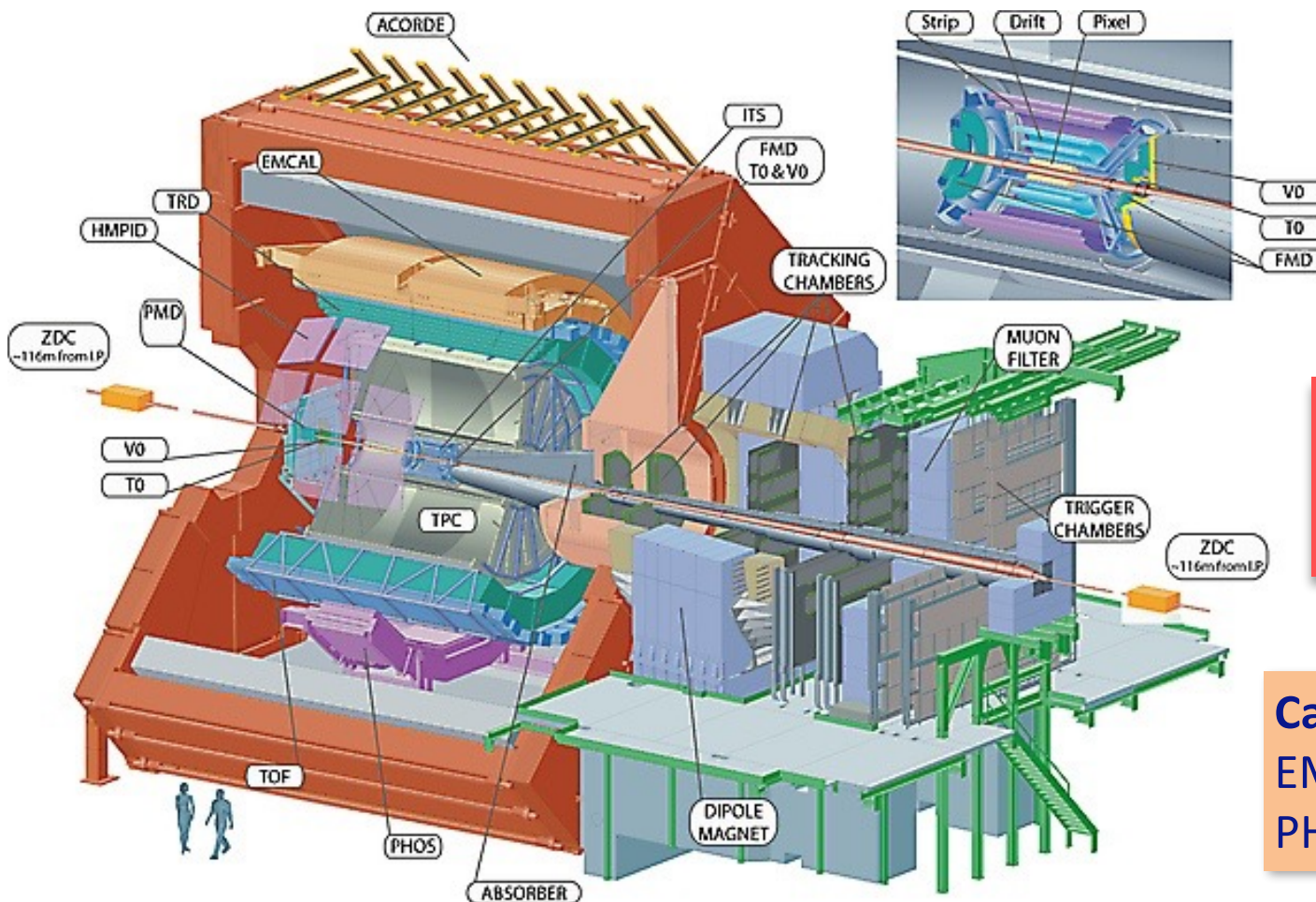
**MUON SYSTEM**



Présentation Simon Akar

# ALICE spécialisé pour l'étude des collisions d'ions lourds

Présentation Antoine Lardeux



**Détecteurs à l'avant**  
Grande rapidité ( $\eta$ )  
Déclenchement  
Caractérise l'événement

**Spectromètre à muons**  
 $-4 < |\eta| < -2.5$   
 $p(\text{muons}) > 4 \text{ GeV}/c$

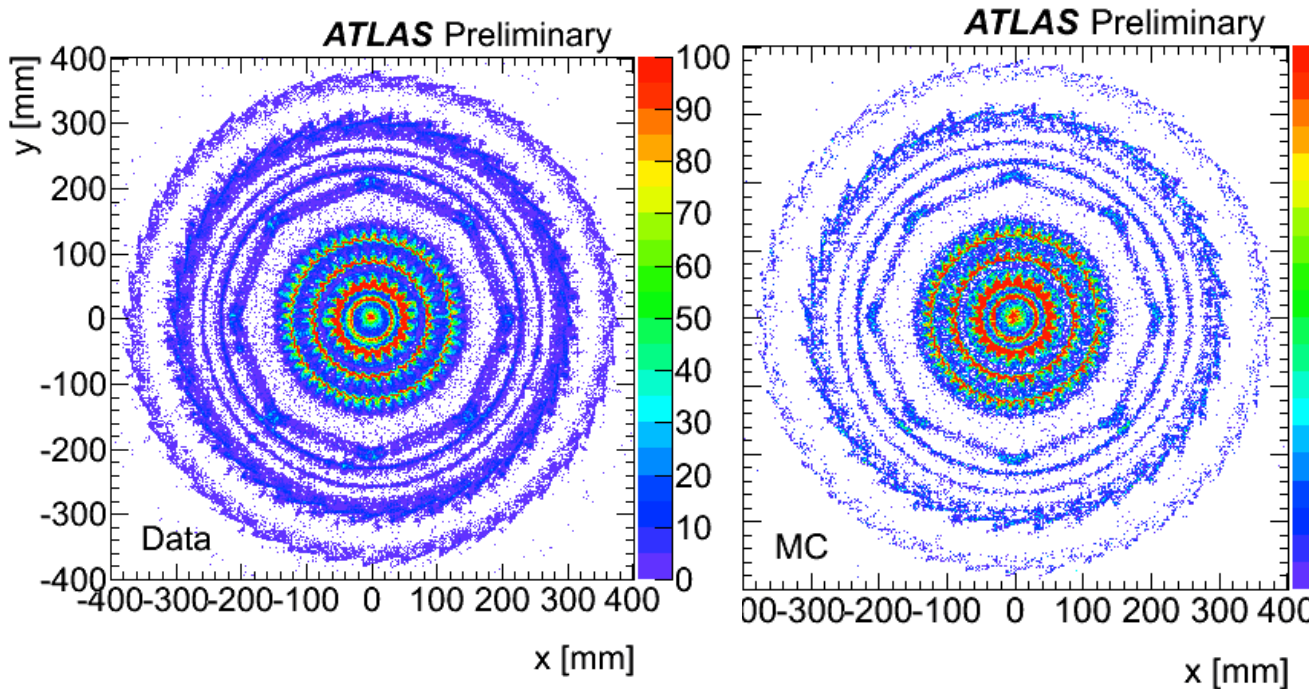
**Calorimètre**  
EMCAL + DCAL (Run2)  
PHOS

**Partie centrale ( $|\eta| < 0.9$ )**  
hadrons, e,  $\gamma$   
TPC  $p \sim 100 \text{ MeV}/c$   
ITS: excellent vertexing

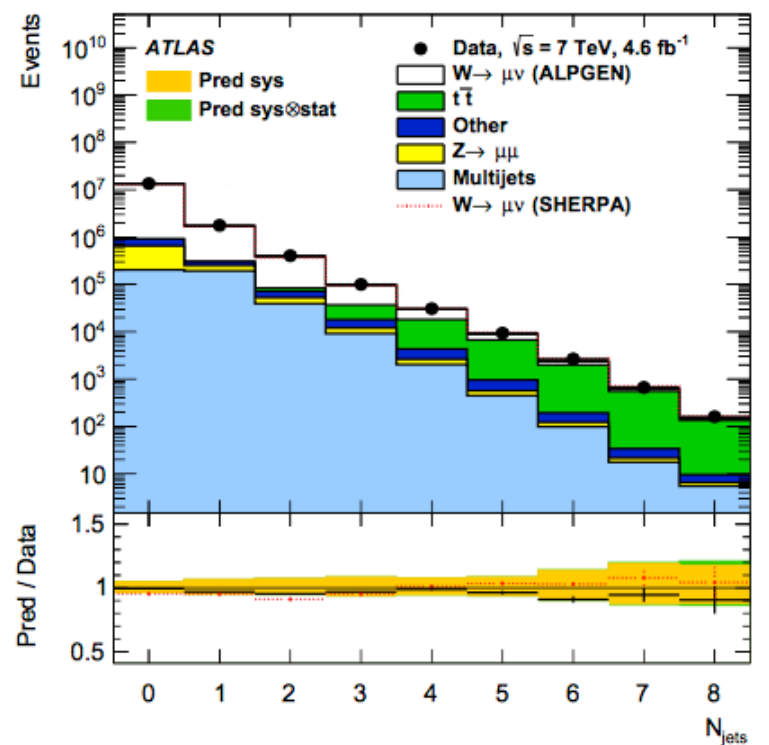
**Excellente capacité  
d'identification des  
particules.**

# Simulation des interactions et des détecteurs

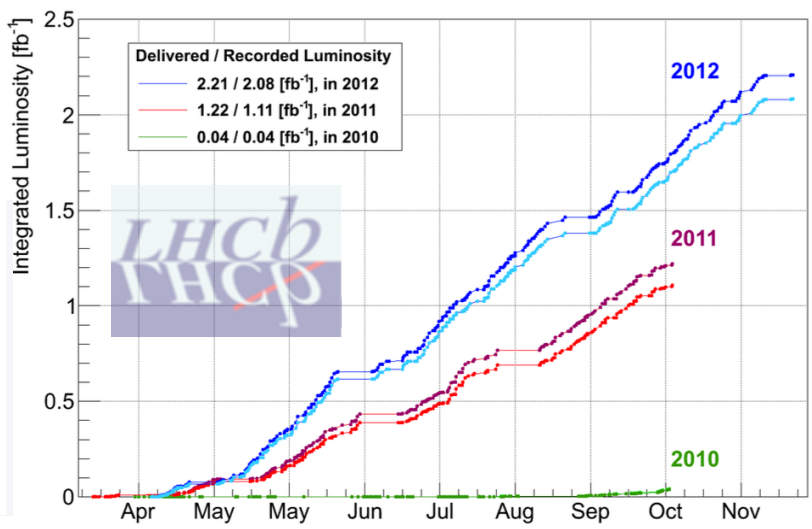
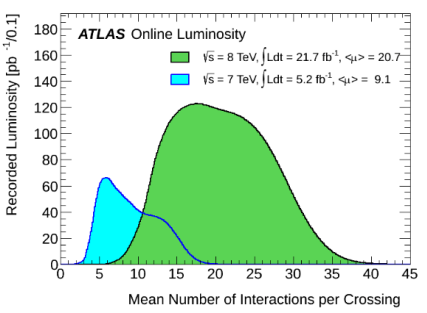
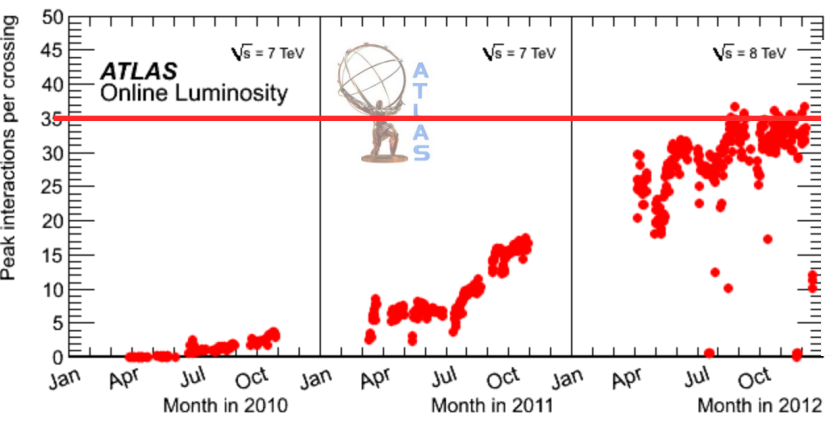
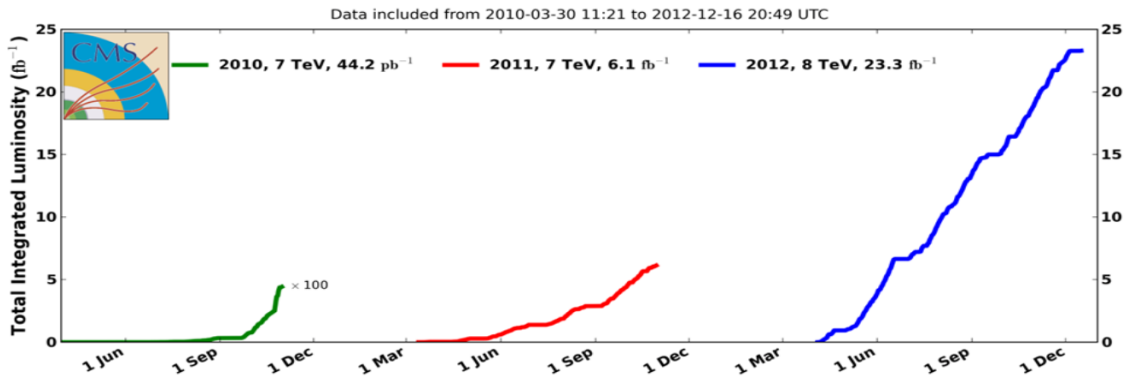
Le modèle standard décrit les interactions électro-faibles et fortes :  
 la théorie est renormalisable → calculs possibles aux ordres finis  
 Le calcul des amplitudes d'interactions permet de prédire les sections efficaces, les topologies, distributions ,.....  
 programmes de simulations des interactions proton-proton aux ordres successifs des corrections  
 Description précise des détecteurs et génération monte-carlo de leurs réponses (Geant IV)  
 La description des interactions et de l'impact du détecteur a atteint une qualité remarquable au LHC.



$pp \rightarrow W^+ + \text{jets}$  avec  $W \rightarrow \mu^+ + \nu$

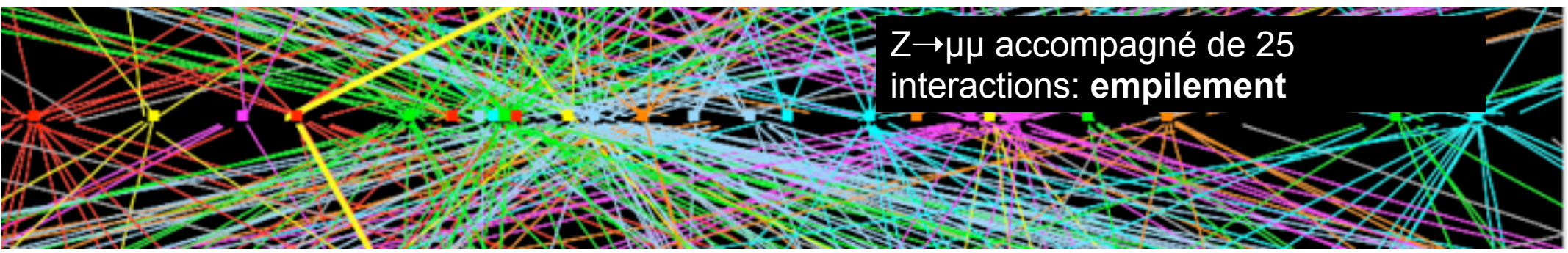


# Le run I du LHC - collisions p-p



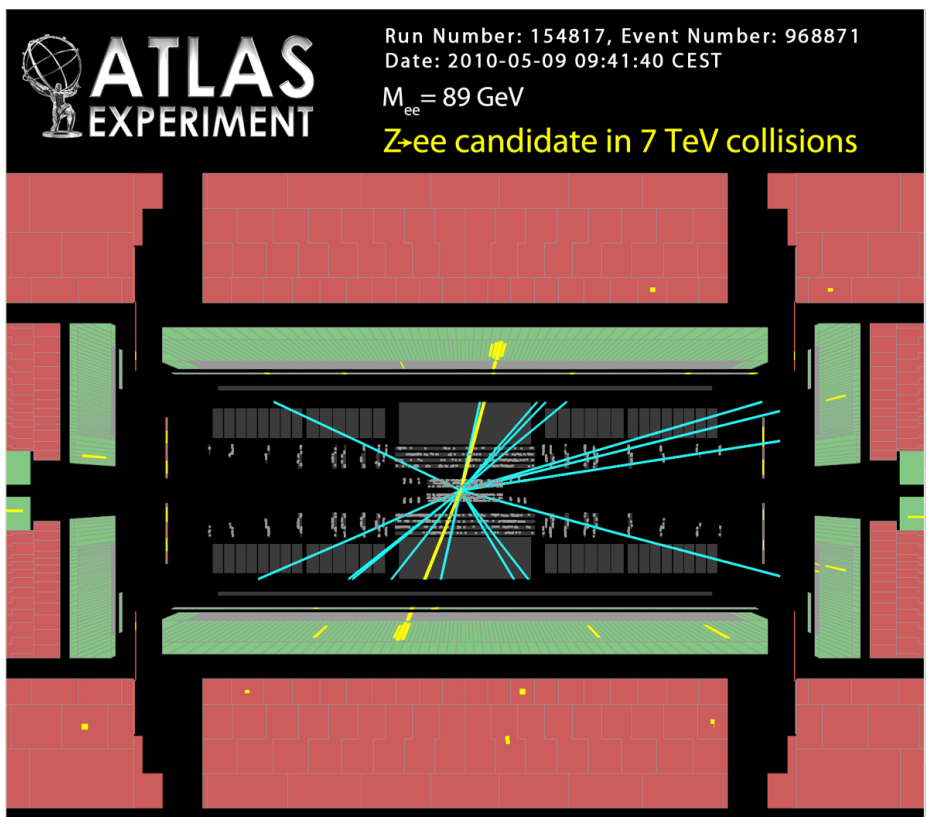
**ATLAS / CMS p-p**  
 $\int L dt \sim 5$  fb<sup>-1</sup> - 2011 -  $\sqrt{s} = 7$  TeV -  $\langle \mu \rangle = 8$   
 $\int L dt \sim 20$  fb<sup>-1</sup> - 2012 -  $\sqrt{s} = 8$  TeV -  $\langle \mu \rangle = 21$

**LHCb p-p**  $\mu \sim 0.4$   
 $\int L dt \sim 1.1$  fb<sup>-1</sup> - 2011 -  $\sqrt{s} = 7$  TeV  
 $\int L dt \sim 2.1$  fb<sup>-1</sup> - 2012 -  $\sqrt{s} = 8$  TeV



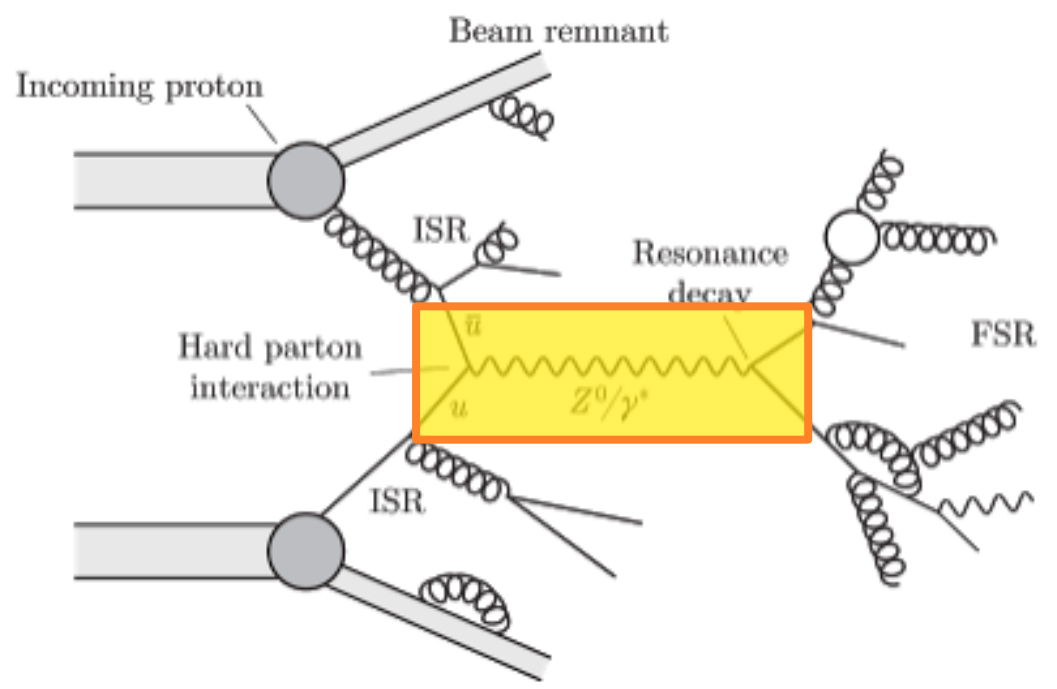
$Z \rightarrow \mu\mu$  accompagné de 25 interactions: **empilement**

# Sonder les prédictions du modèle standard

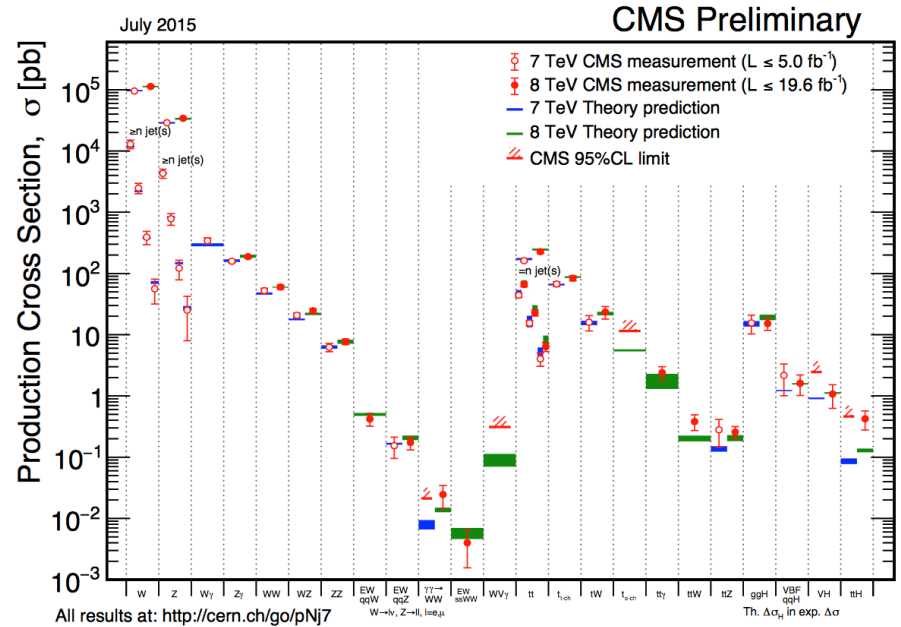


De l'enregistrement d'une collision proton-proton à l'interprétation en termes de processus élémentaires à la confrontation de la mesure à la prédiction.

Calculs théoriques LO, NLO, ....

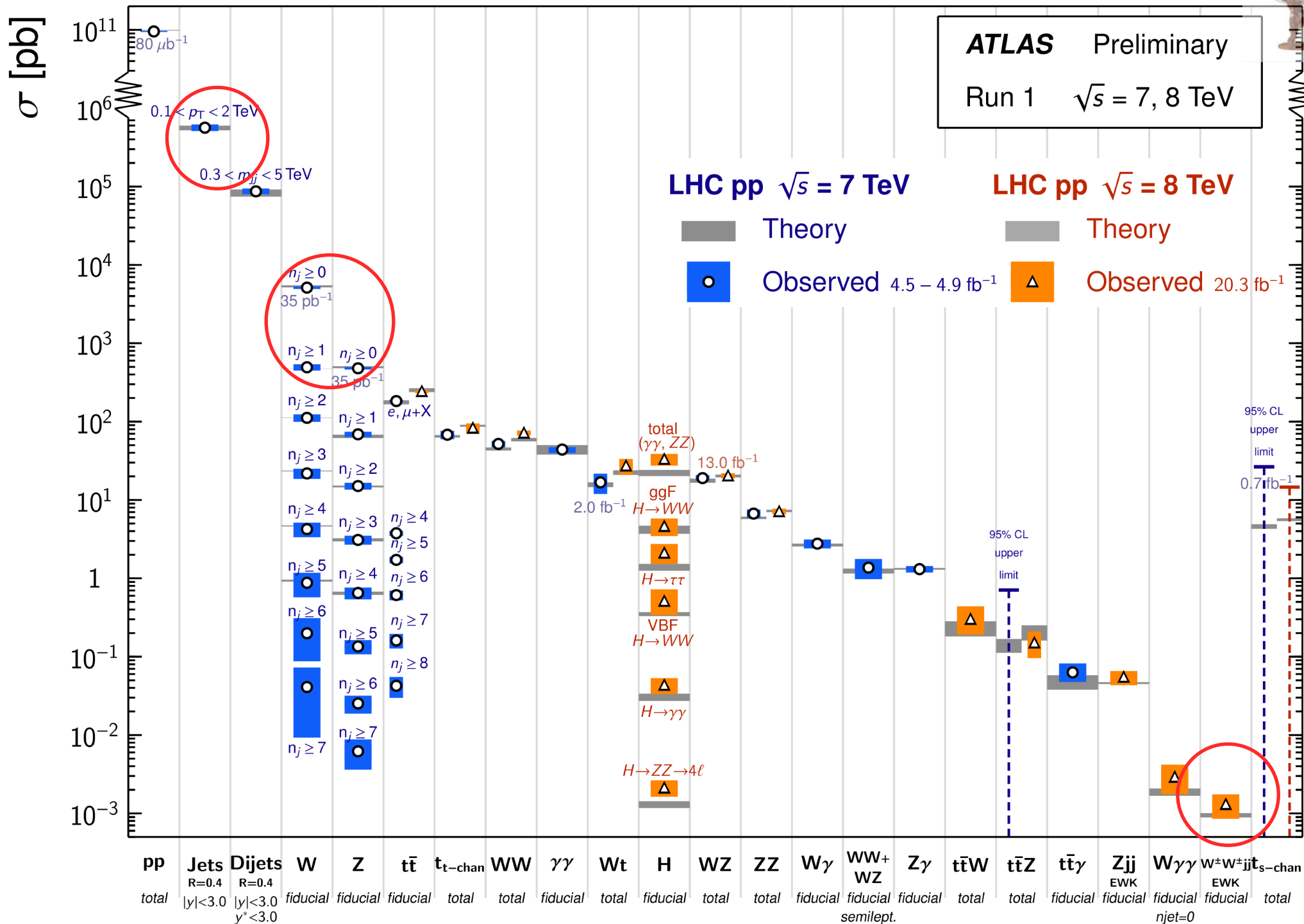


# Standard Model EW & QCD



# Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: March 2015

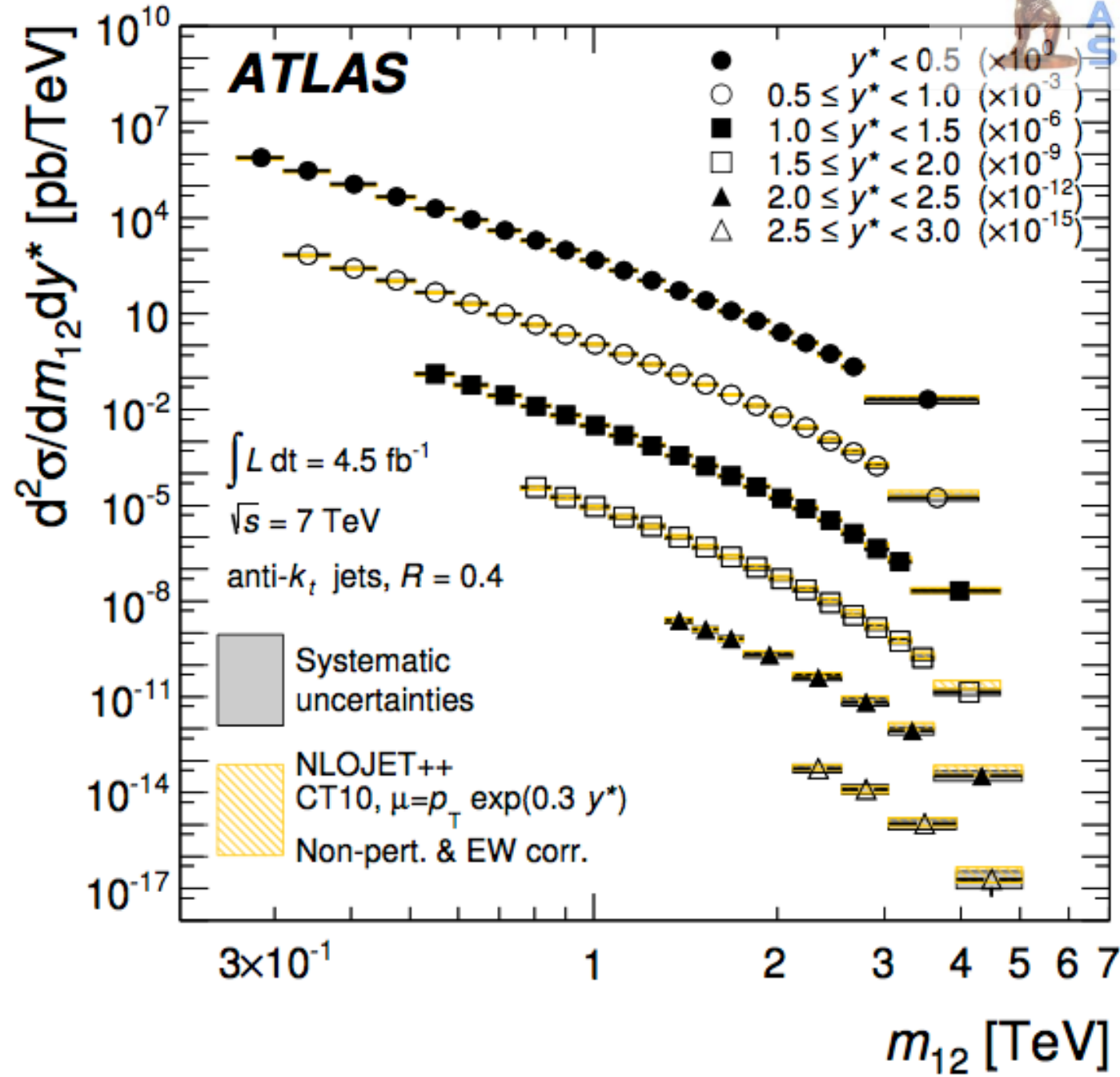
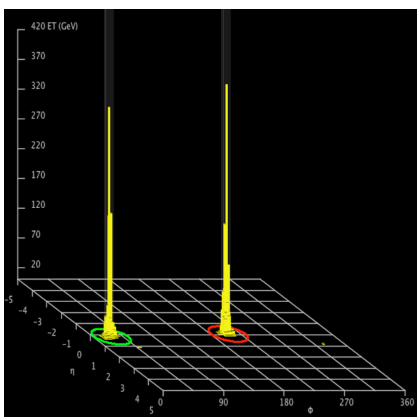
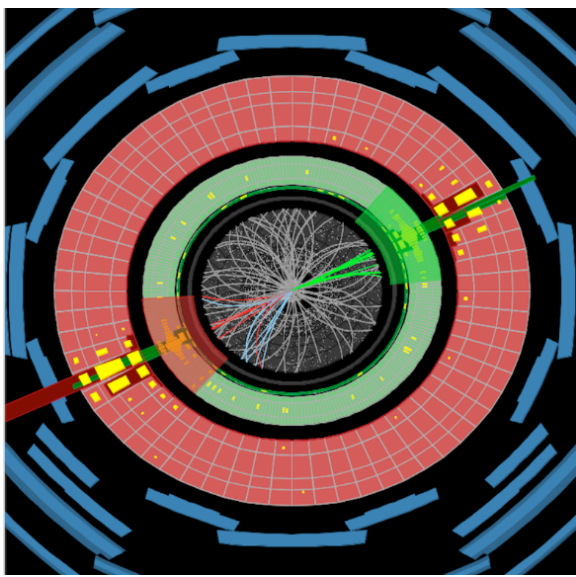
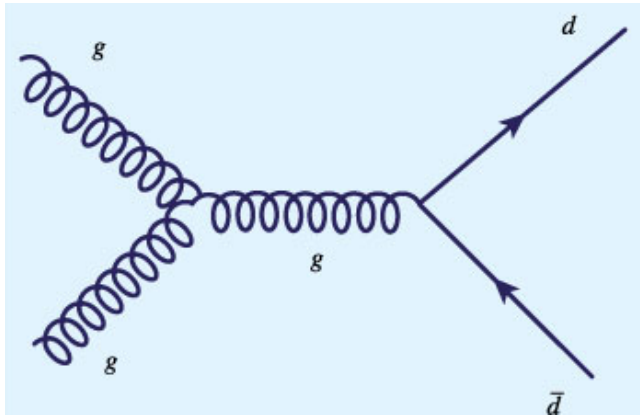






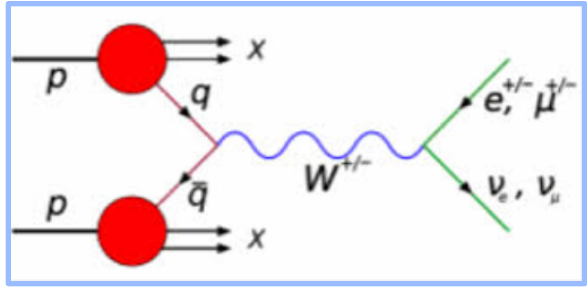
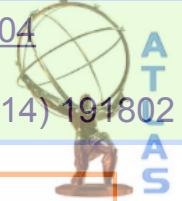
ATLAS

# Jets

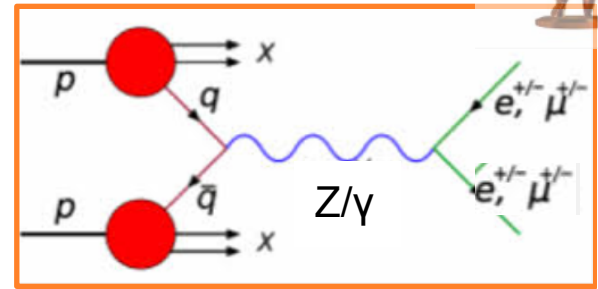


# Production des bosons W/Z

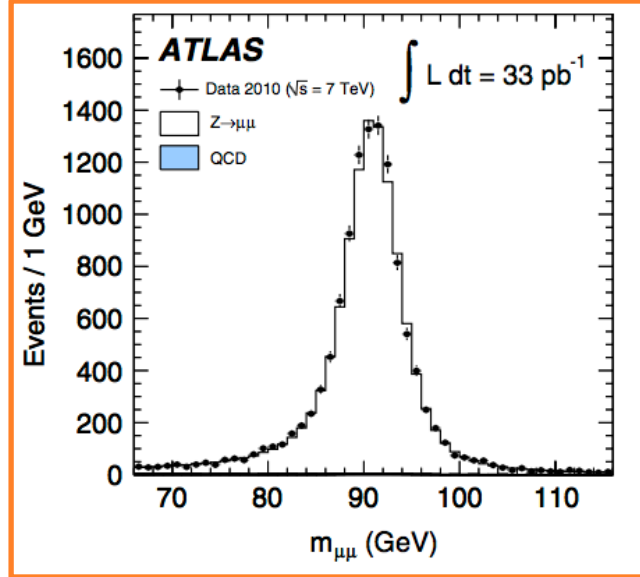
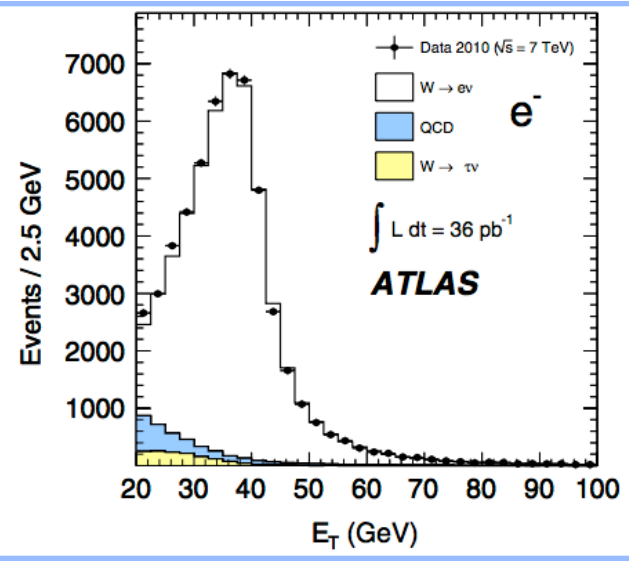
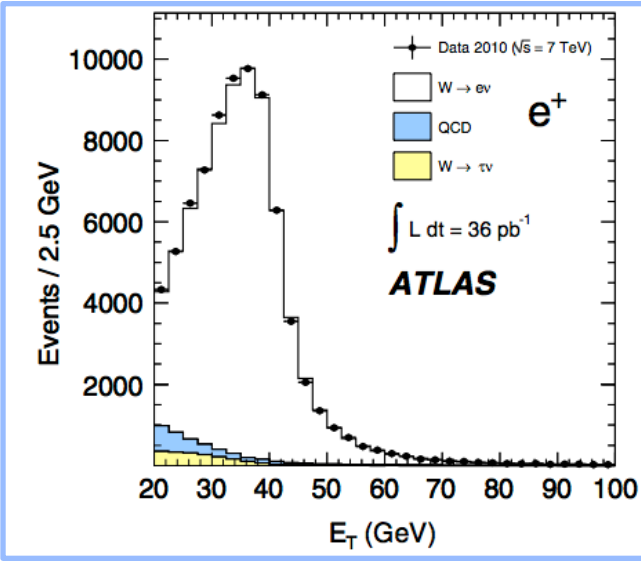
ATLAS 7 TeV Phys. Rev. D 85, 072004  
 CMS 7 TeV JHEP 10 (2011) 132  
 CMS 8 TeV Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 191802



$W^\pm$  1 lepton (e,  $\mu$ ) +  $E_T^{\text{miss}}$



Z 2 leptons (e+e-,  $\mu$ + $\mu$ -)

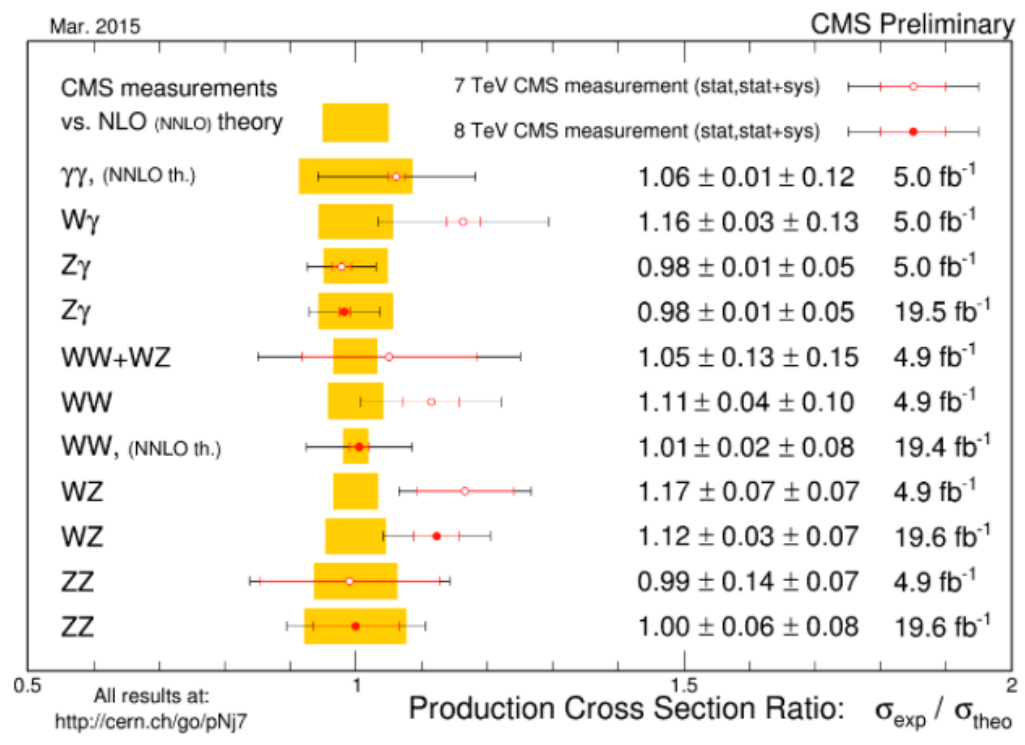
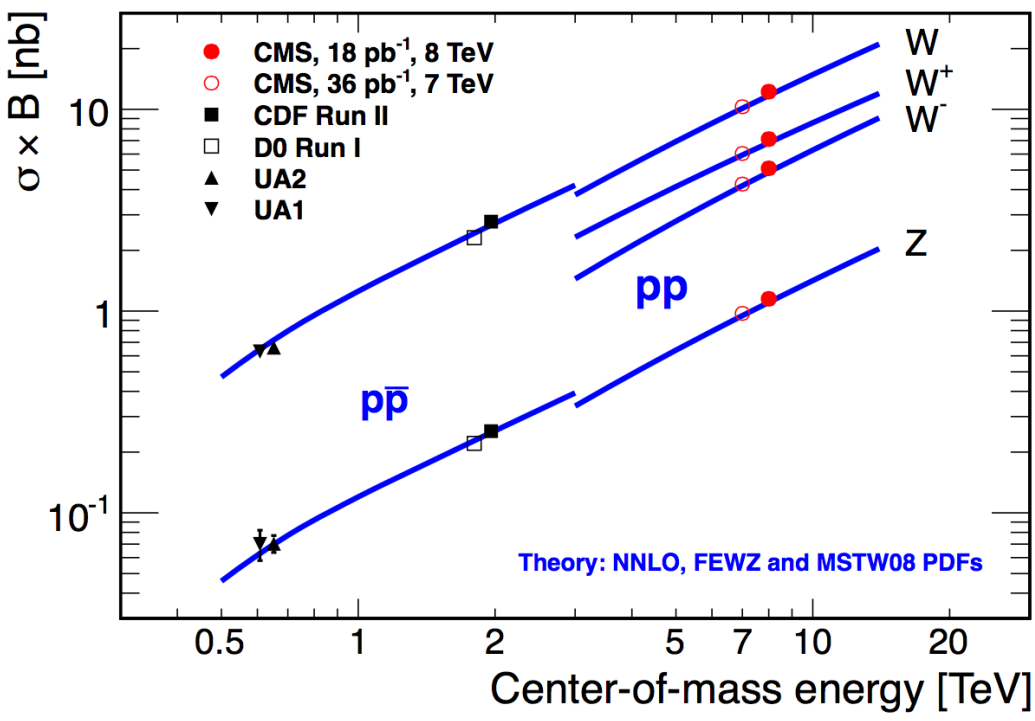


$$\sigma_{\text{fid}} = \frac{N - B}{C_{W/Z} \cdot L_{\text{int}}}$$

	$N$	$B$	$C_{W/Z}$	$A_{W/Z}$
$W^+$	84 514	$6600 \pm 600$	$0.796 \pm 0.016$	$0.495 \pm 0.008$
$W^-$	55 234	$5700 \pm 600$	$0.779 \pm 0.015$	$0.470 \pm 0.010$
$W^\pm$	139 748	$12\,300 \pm 1100$	$0.789 \pm 0.015$	$0.485 \pm 0.007$
Z	11 709	$86 \pm 32$	$0.782 \pm 0.007$	$0.487 \pm 0.010$



# Section efficace de production W&Z vs $\sqrt{s}$





CMS measurements  
vs. NLO (NNLO) theory

7 TeV CMS measurement (stat,stat+sys)

8 TeV CMS measurement (stat,stat+sys)

$\gamma\gamma$ , (NNLO th.)

$W\gamma$

$Z\gamma$

$Z\gamma$

$WW+WZ$

$WW$

$WW$ , (NNLO th.)

$WZ$

$WZ$

$ZZ$

$ZZ$

$1.06 \pm 0.01 \pm 0.12$

$5.0 \text{ fb}^{-1}$

$1.16 \pm 0.03 \pm 0.13$

$5.0 \text{ fb}^{-1}$

$0.98 \pm 0.01 \pm 0.05$

$5.0 \text{ fb}^{-1}$

$0.98 \pm 0.01 \pm 0.05$

$19.5 \text{ fb}^{-1}$

$1.05 \pm 0.13 \pm 0.15$

$4.9 \text{ fb}^{-1}$

$1.11 \pm 0.04 \pm 0.10$

$4.9 \text{ fb}^{-1}$

$1.01 \pm 0.02 \pm 0.08$

$19.4 \text{ fb}^{-1}$

$1.17 \pm 0.07 \pm 0.07$

$4.9 \text{ fb}^{-1}$

$1.12 \pm 0.03 \pm 0.07$

$19.6 \text{ fb}^{-1}$

$0.99 \pm 0.14 \pm 0.07$

$4.9 \text{ fb}^{-1}$

$1.00 \pm 0.06 \pm 0.08$

$19.6 \text{ fb}^{-1}$

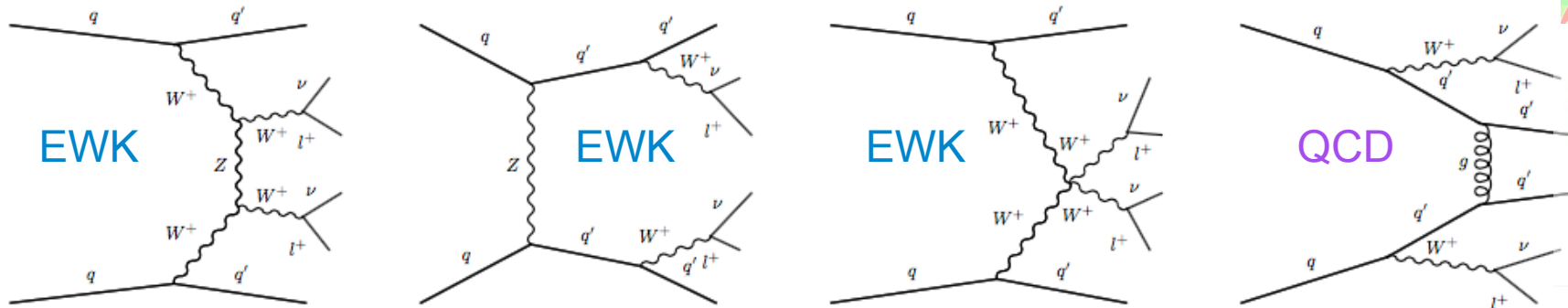
All results at:

<http://cern.ch/go/pNj7>

Production Cross Section Ratio:  $\sigma_{\text{exp}} / \sigma_{\text{theo}}$

# $W^\pm W^\pm$ jet-jet production

ATLAS [10.1103/PhysRevLett.113.141803](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevLett.113.141803)  
 CMS [10.1103/PhysRevLett.114.051801](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevLett.114.051801)



Diffusion de bosons vecteurs

Événements avec deux leptons de même signe  
 $[W^\pm \rightarrow l^\pm \nu, l = e \text{ ou } \mu]$  et deux jets.

Deux leptons de même signe avec

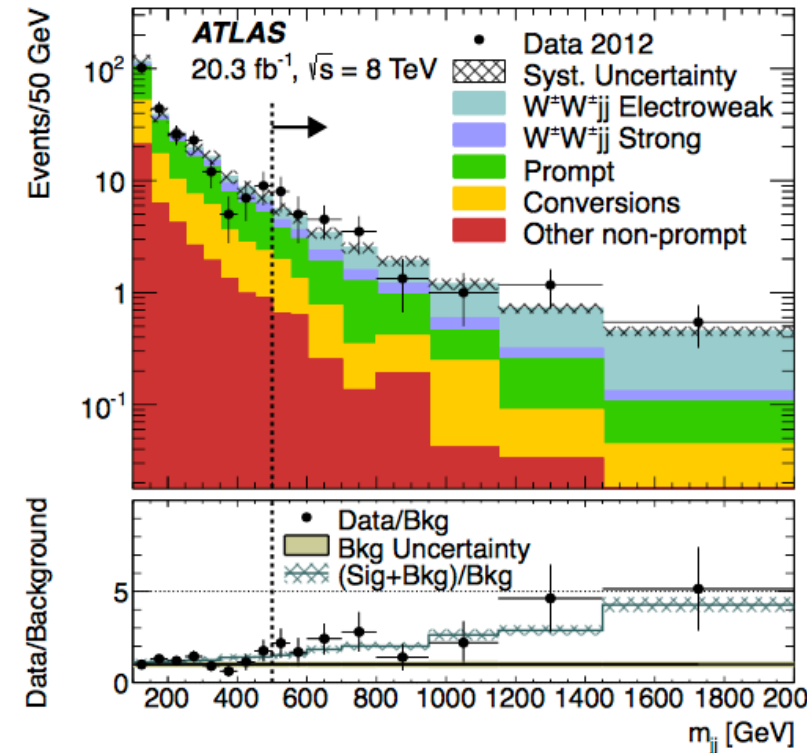
$$P_{T^{\text{lep}}} > 25 \text{ GeV} - |\eta_{\text{lep}}| < 2.5 - m_{\text{leplep}} > 20 \text{ GeV} - \Delta R_{\text{leplep}} > 0.3$$

Au moins deux jets

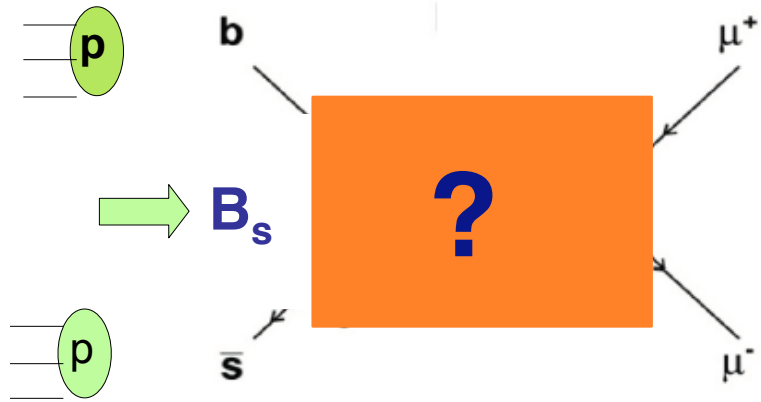
$$P_{T^{\text{jet}}} > 30 \text{ GeV} - |\eta_{\text{jet}}| < 4.5 - m_{\text{jetjet}} > 500 \text{ GeV} - \Delta R_{\text{lepjet}} > 0.3$$

$$\sigma^{\text{fid}} = 2.1 \pm 0.5 \text{ (stat)} \pm 0.3 \text{ (syst) fb}$$

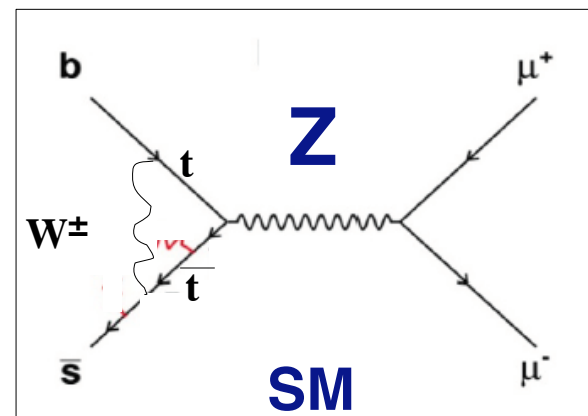
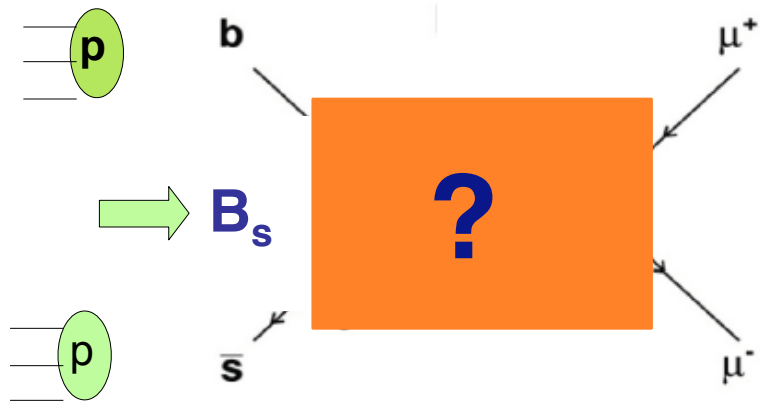
$$\sigma_{\text{th}} = 1.52 \pm 0.11 \text{ fb}$$



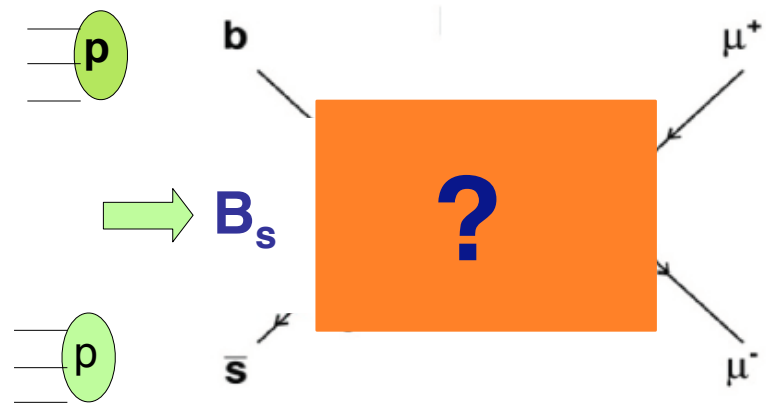
## Désintégrations rares



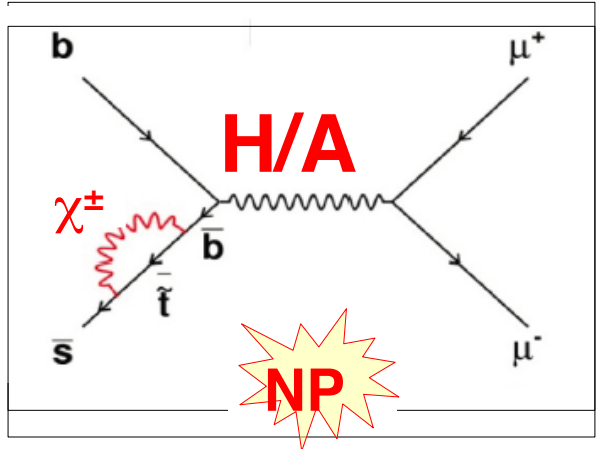
## Désintégrations rares



## Désintégrations rares



ou

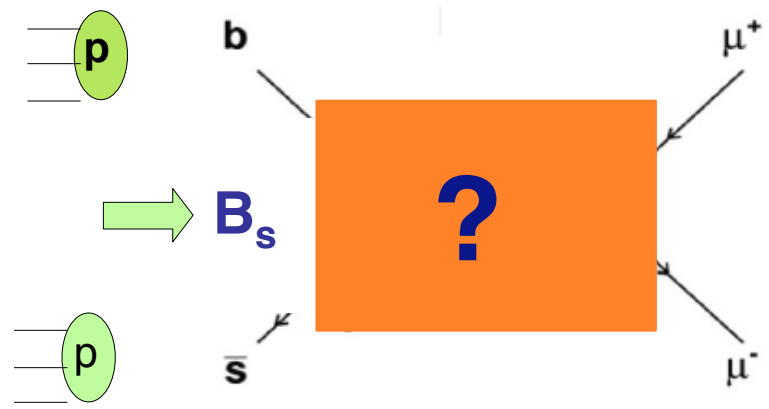




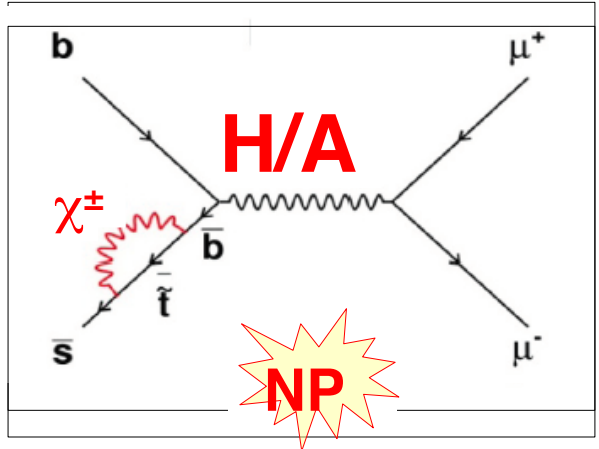
# La physique de LHCb: Recherche indirecte de Nouvelle Physique

## Désintégrations rares

Q:  $BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{mes} >? BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{MS}$   
 Nouvelle physique ?



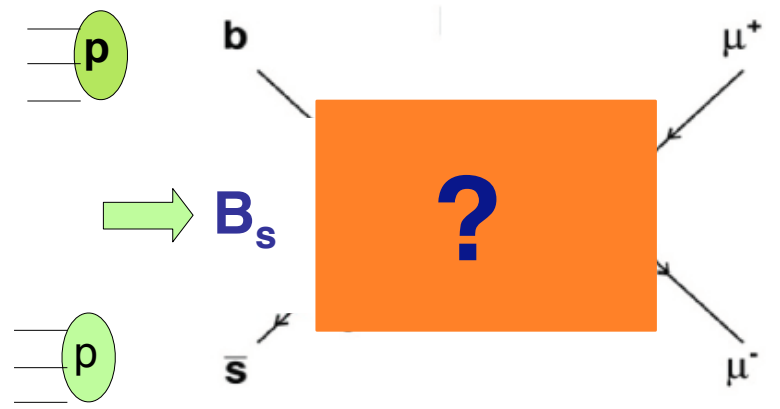
ou



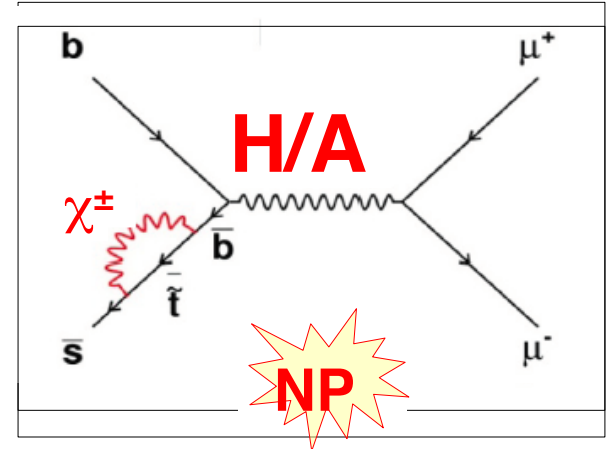
# La physique de LHCb: Recherche indirecte de Nouvelle Physique

## Désintégrations rares

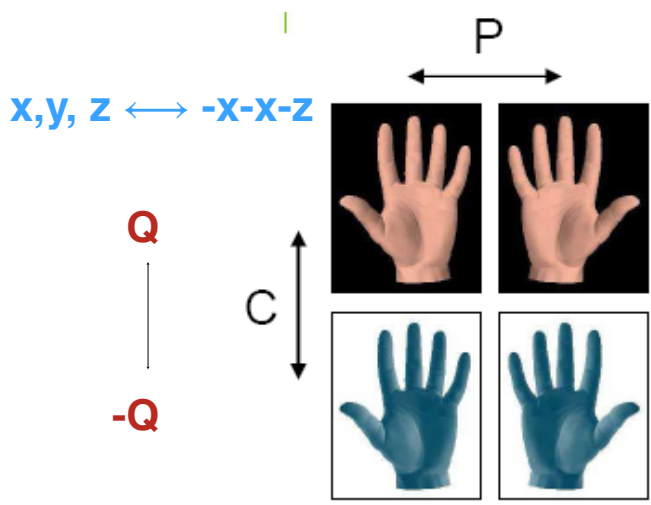
Q:  $BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{mes} >? BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{MS}$   
Nouvelle physique ?



ou



## Violation de la symétrie de charge.parité (CP)

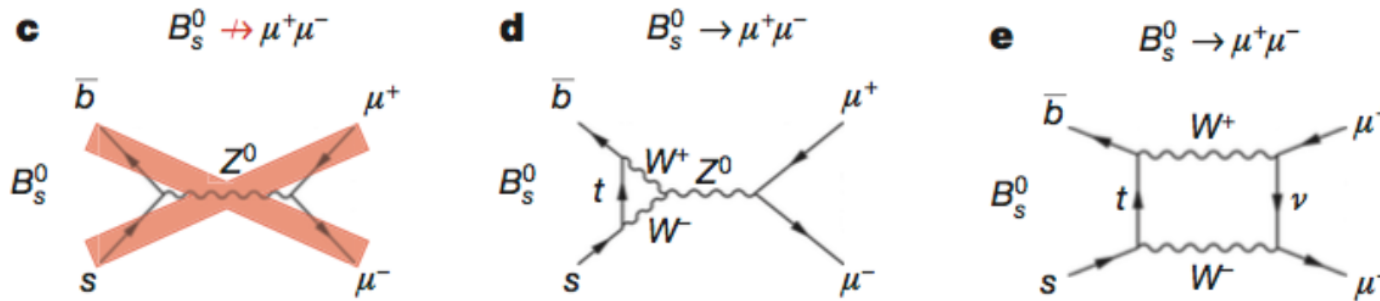


La violation de CP: ingrédient essentiel pour répondre à la question «où est passée l'antimatière?»

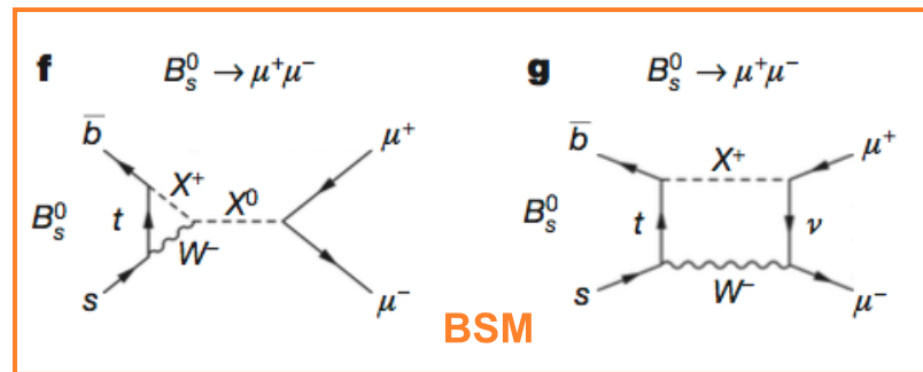
Cependant, l'amplitude de la violation de CP mesurée est trop faible pour expliquer l'asymétrie matière-antimatière observée.



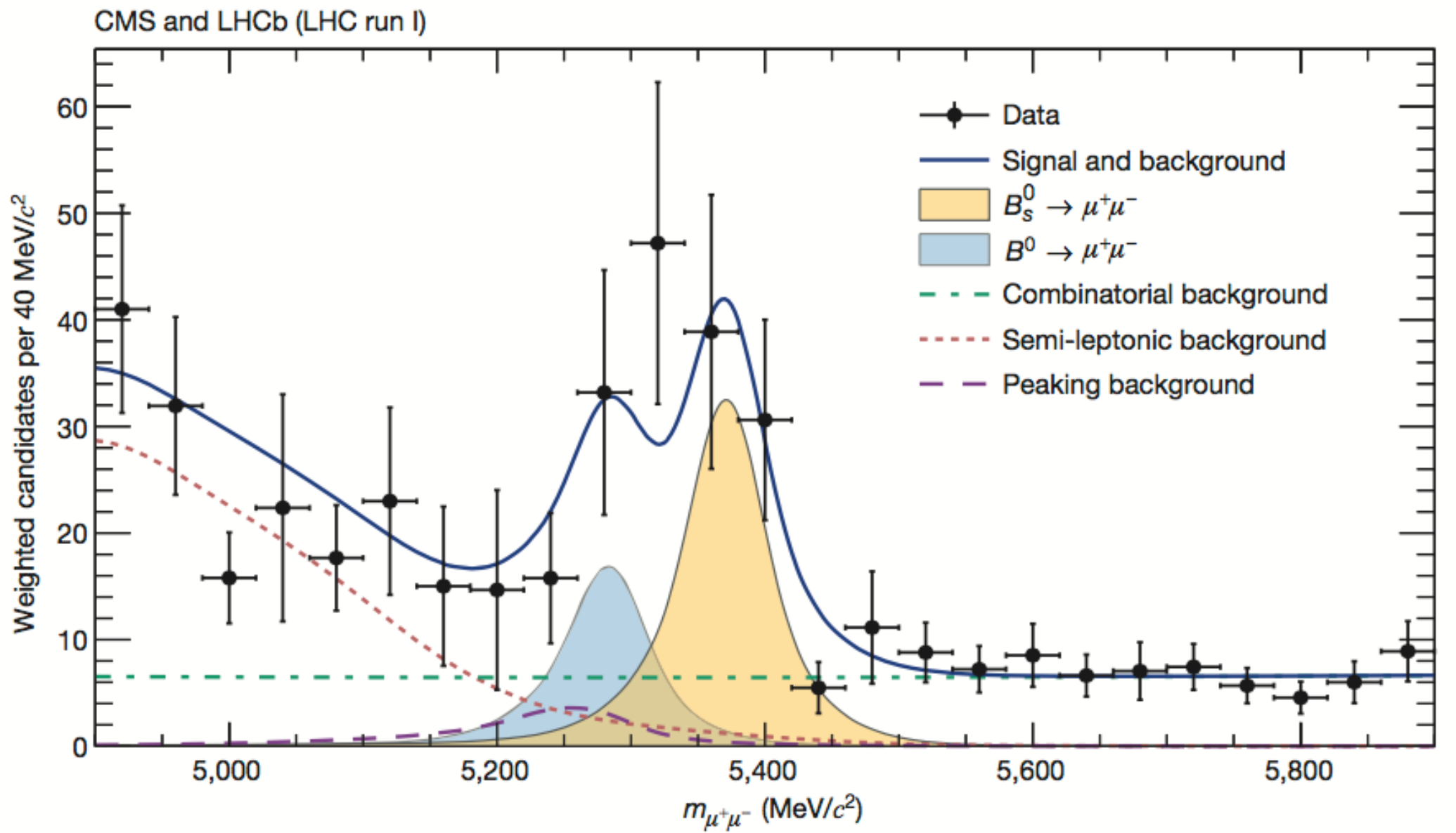
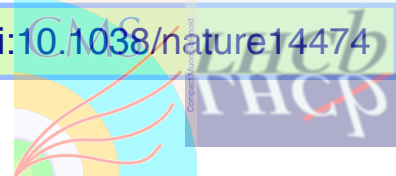
# $B_s \rightarrow \mu\mu$ - LHCb+CMS

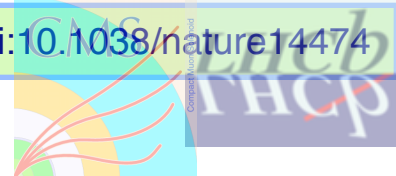


et ???

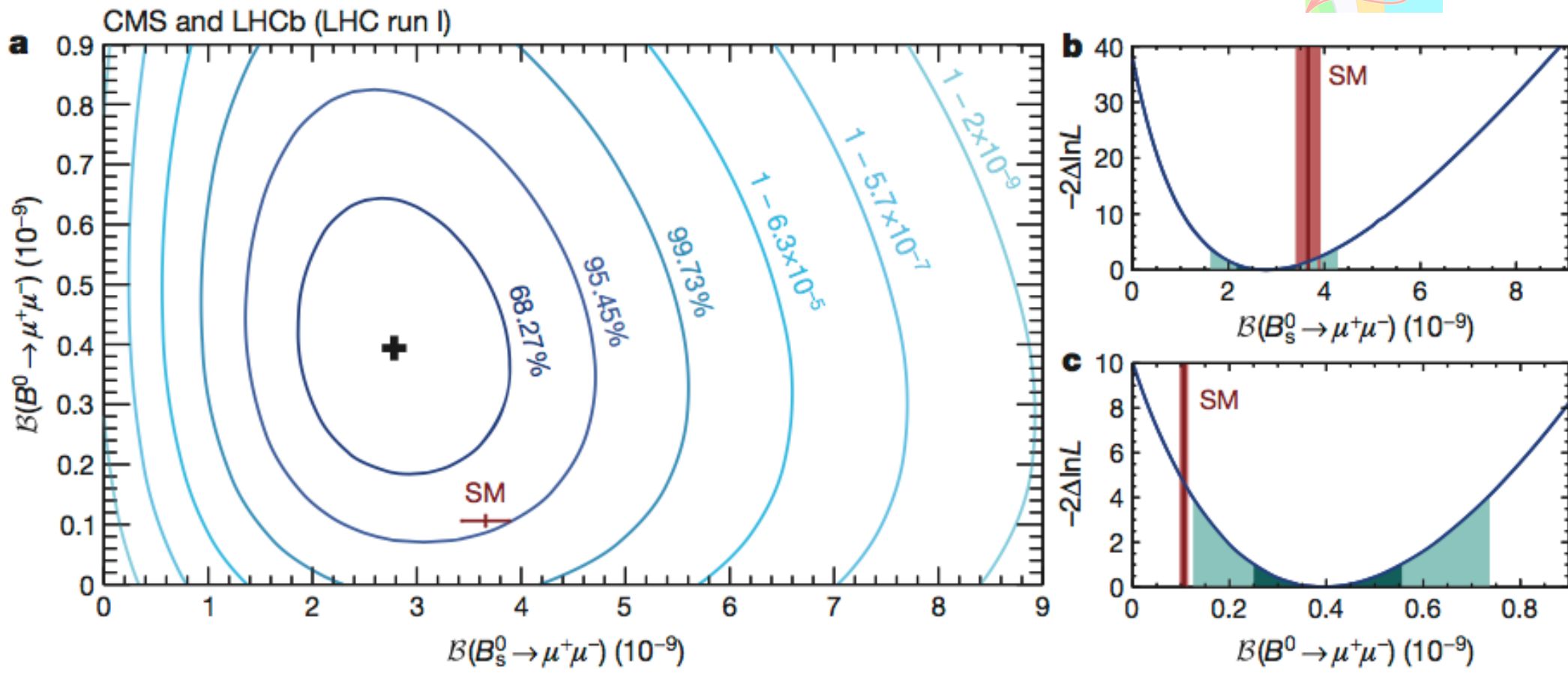


Analyse des événements avec deux muons dans l'état final:  $m_{\mu\mu}$ .  
 $BR(B_s \rightarrow \mu\mu) \sim BR((B_s \rightarrow \mu\mu)_{SM})$  ou  $BR(B_s \rightarrow \mu\mu) > BR((B_s \rightarrow \mu\mu)_{SM})$  ?





# $B_s \rightarrow \mu\mu$ - LHCb+CMS



$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.8^{+0.7}_{-0.6}) \times 10^{-9} \quad 6.2 \sigma$$

$$\mathcal{S}_{SM}^{B_s^0} = 0.76^{+0.20}_{-0.18} \quad 1.2 \sigma$$

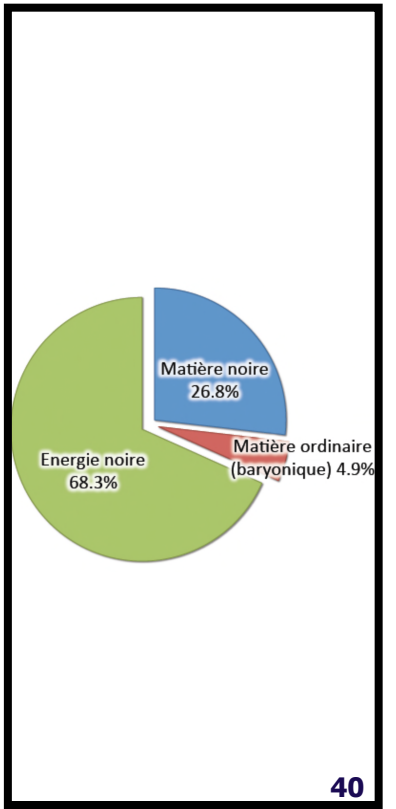
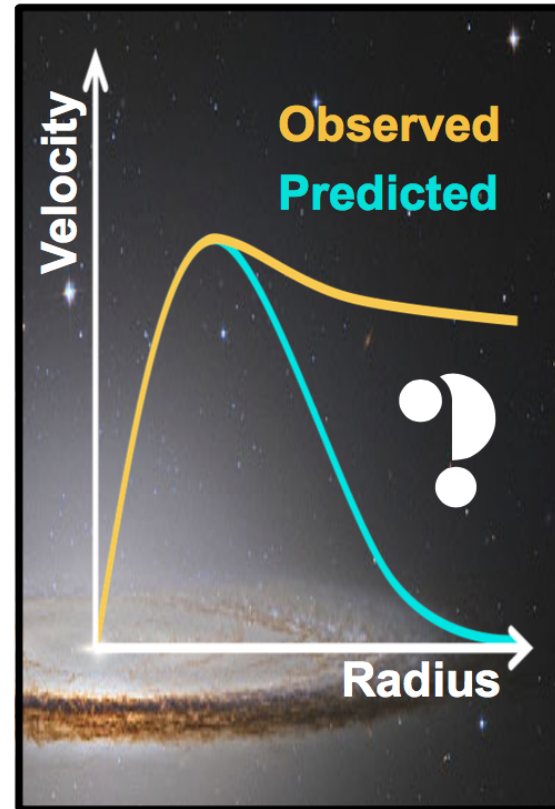
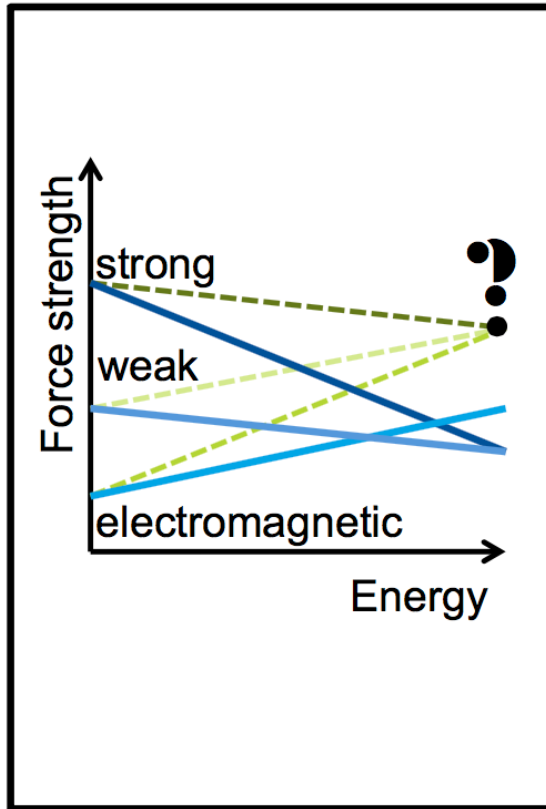
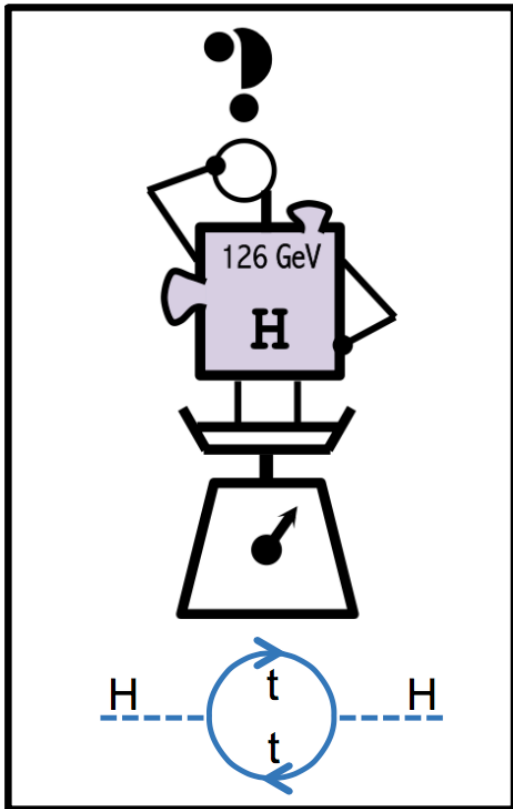
$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.9^{+1.6}_{-1.4}) \times 10^{-10} \quad 3.2 \sigma$$

$$\check{\mathcal{S}}_{SM}^{B^0} = 3.7^{+1.6}_{-1.4} \quad 2.2 \sigma$$

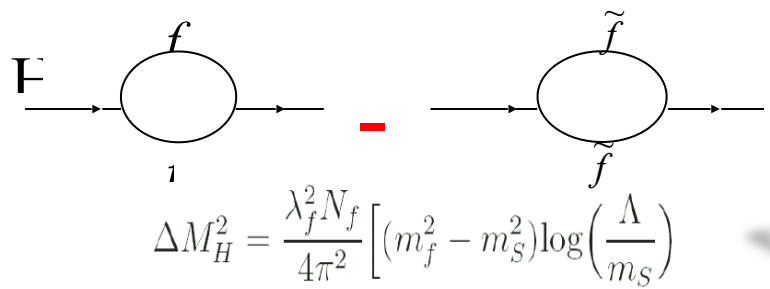
# Les limitations du modèle standard

Les mesures faites au LHC confirment toutes les prédictions du Modèle Standard.  
Cependant, le modèle standard ne permet pas d'expliquer toutes les phénomènes

- matière noire cosmologique
- asymétrie matière - antimatière dans l'univers
- énergie noire: univers en expansion accélérée
- la question de la naturalité  $\delta_{mH}/m_H$
- hiérarchie de masses des quarks et leptons
- la masse des neutrinos



# La supersymétrie

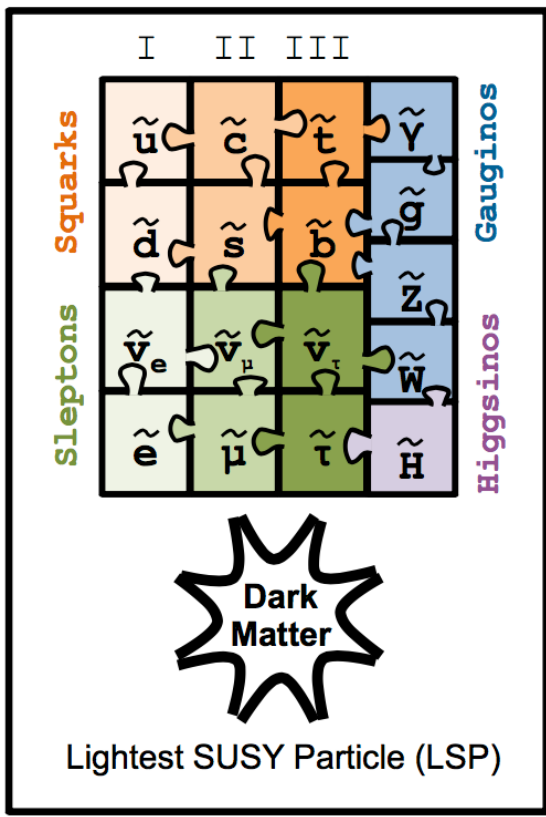
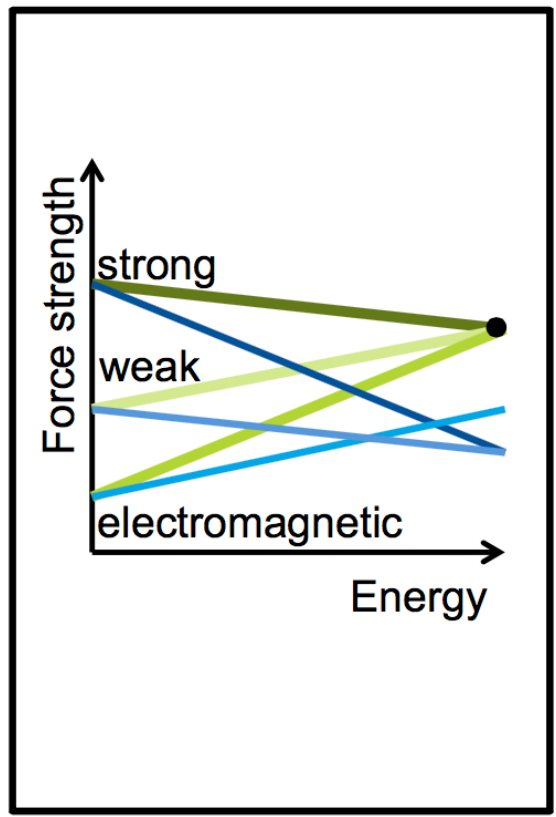
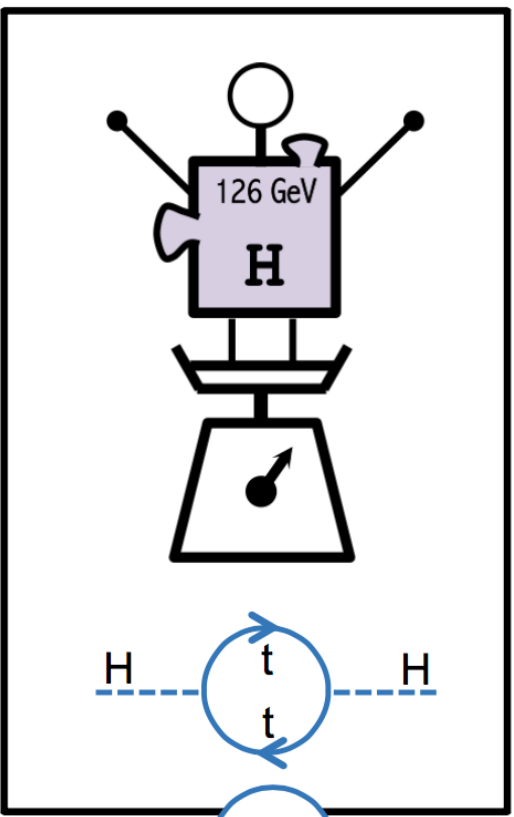


Fermions	2.4 MeV	1.3 GeV	170 GeV	0
	u	c	t	Y
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	d	s	b	g
<2.2 eV	<0.2 MeV	<16 MeV	91 GeV	
ν <sub>e</sub>	ν <sub>μ</sub>	ν <sub>τ</sub>	Z	
0.5 MeV	16 MeV	1.8 GeV	80 GeV	
e	μ	τ	W	
			126 GeV	
			H	

Gauge bosons  
Higgs

Sfermions	ū	c	t	Y
	ū	c	t	Y
	q	s	b	g
	q	s	b	g
ν̃ <sub>e</sub>	ν̃ <sub>μ</sub>	ν̃ <sub>τ</sub>	Z	
ν̃ <sub>e</sub>	ν̃ <sub>μ</sub>	ν̃ <sub>τ</sub>	Z	
e	μ	τ	W	
e	μ	τ	W	
			H	
			H	

Gauginos  
Higgsinos



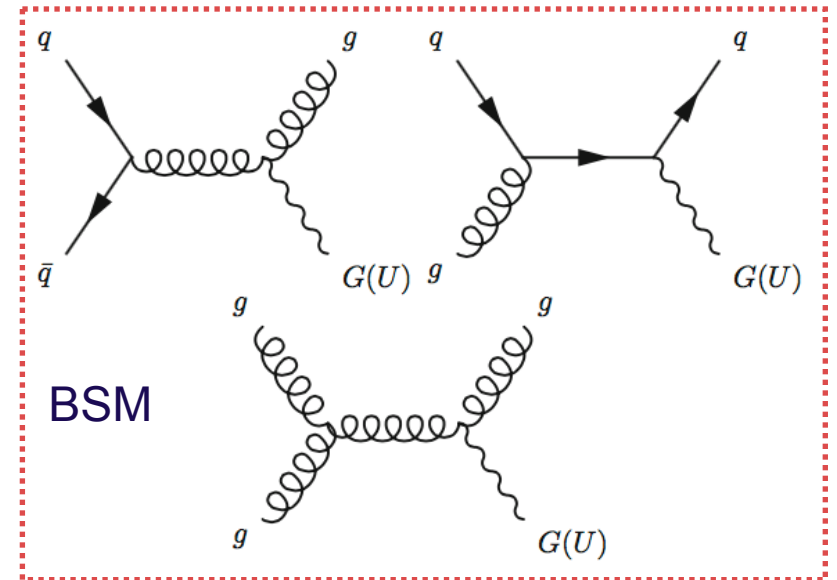
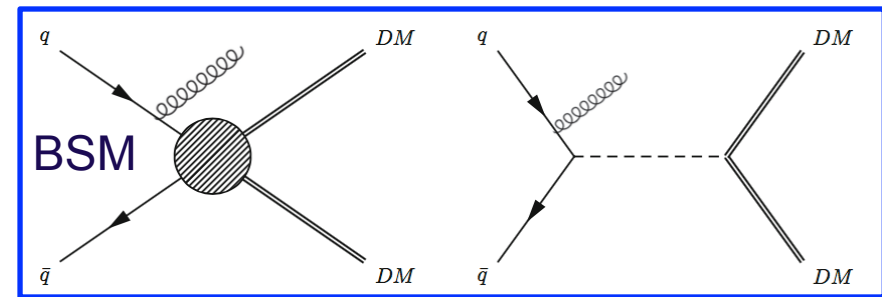
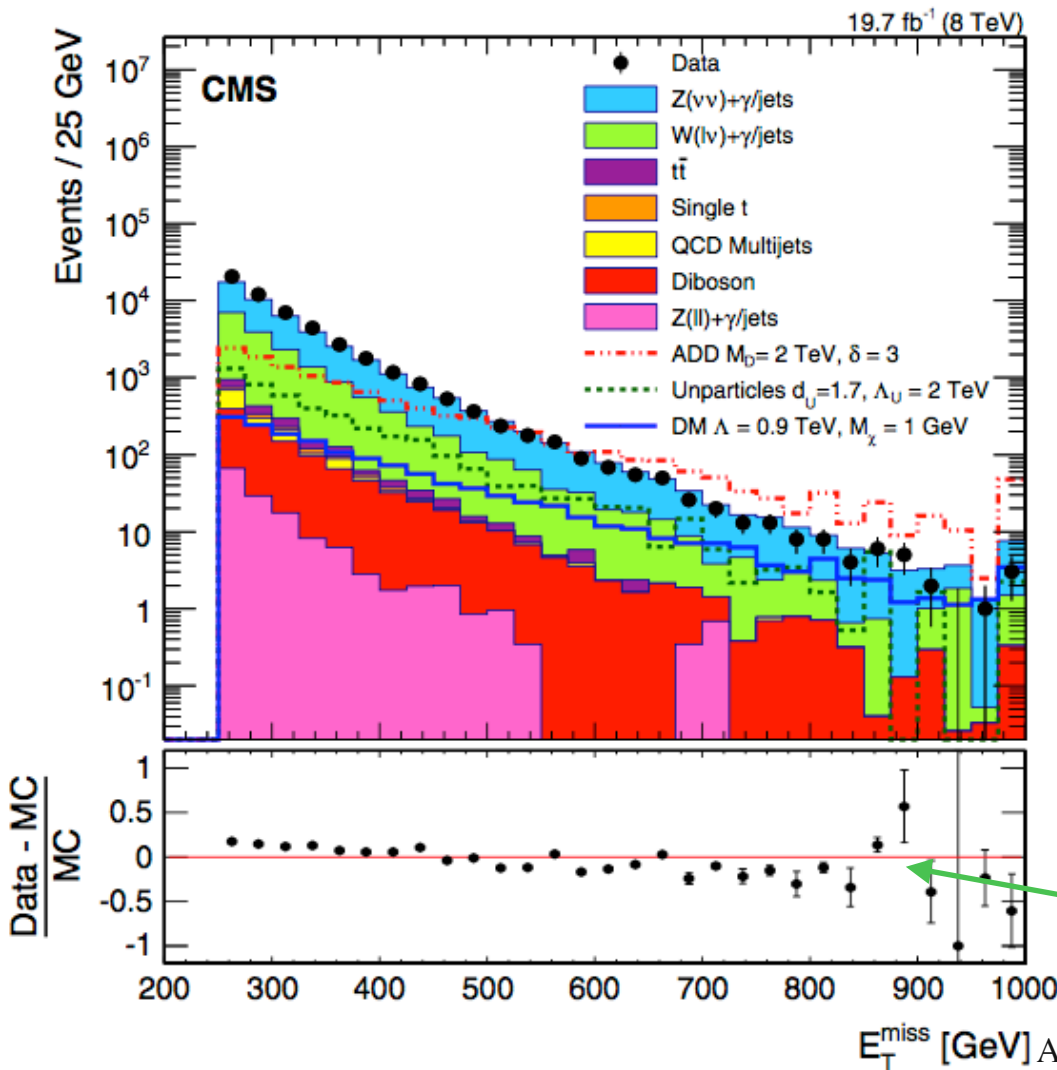




# Recherche directe de matière noire

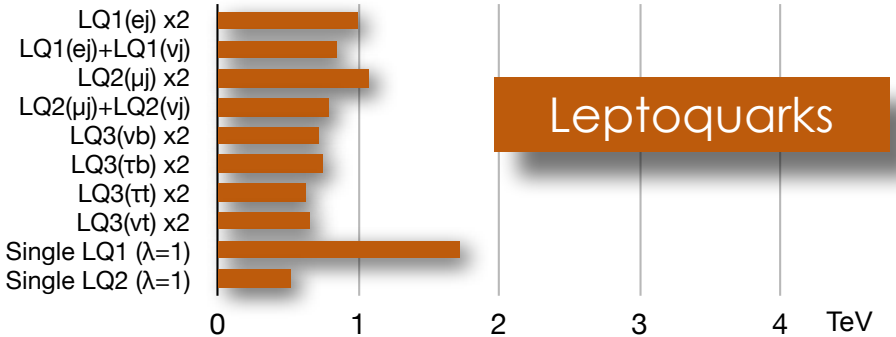
Recherche de Weak Interacting Massive Particle:  $pp \rightarrow \chi\chi + X$

Recherche de Graviton ou *Unparticle* dans le cadre de modèle à dimensions supplémentaires AAD (Arkani-Hamed, Dimopoulos and Dvali)

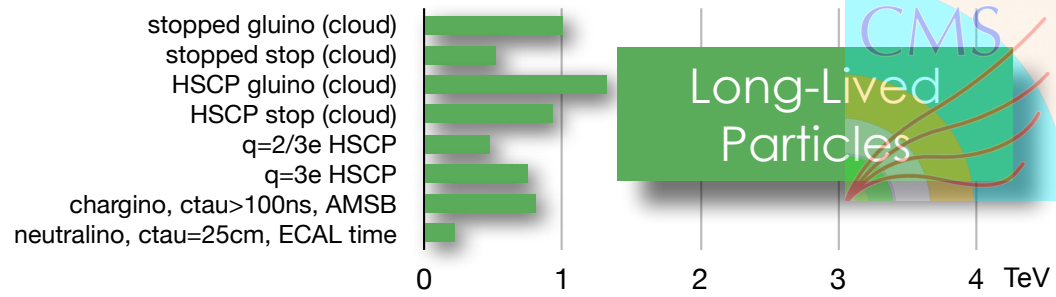


Le modèle standard décrit les données

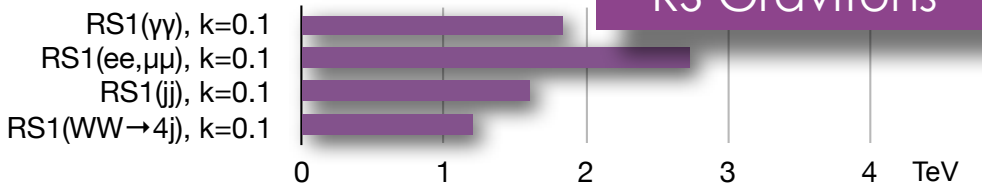
Arkani-Hamed, Dimopoulos, and Dvali (ADD)



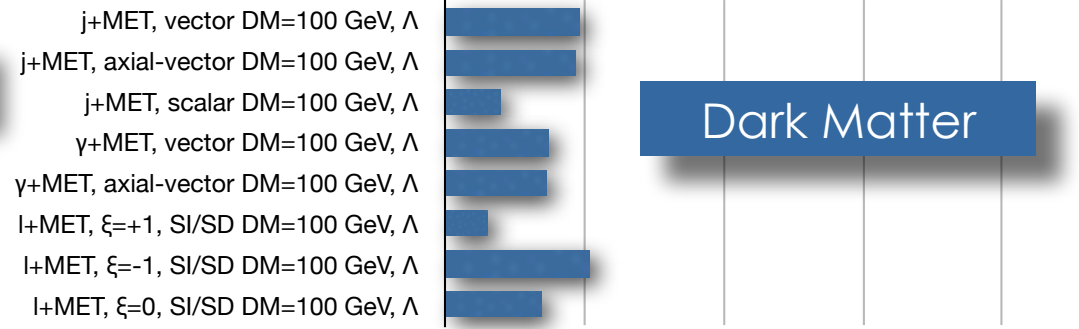
### Leptoquarks



### Long-Lived Particles

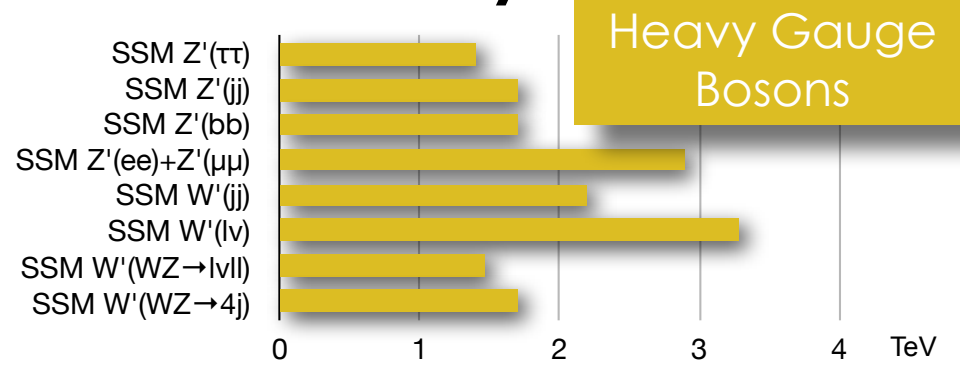


### RS Gravitons

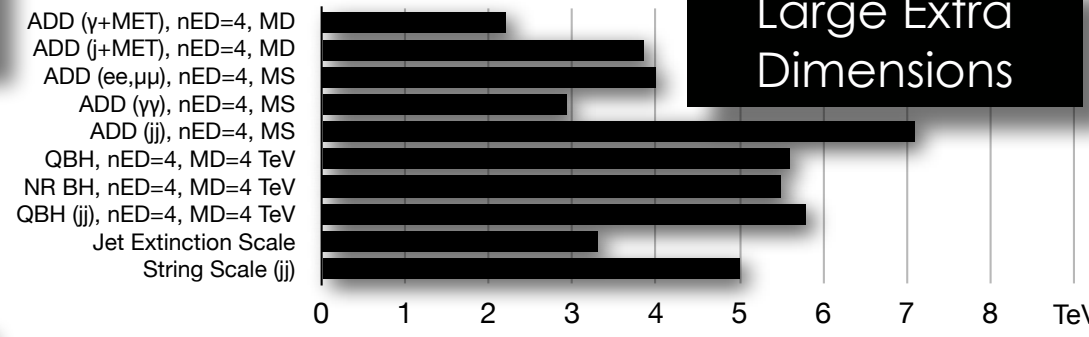


### Dark Matter

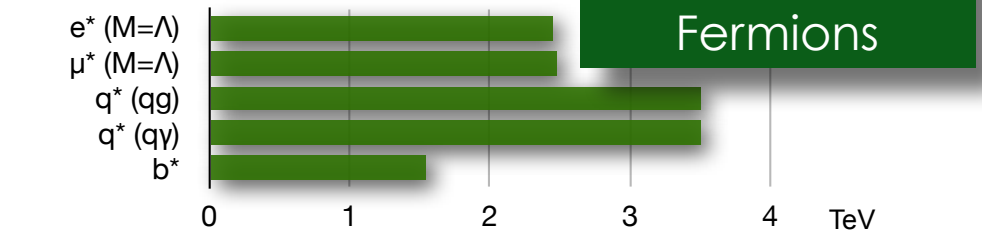
**CMS Preliminary**



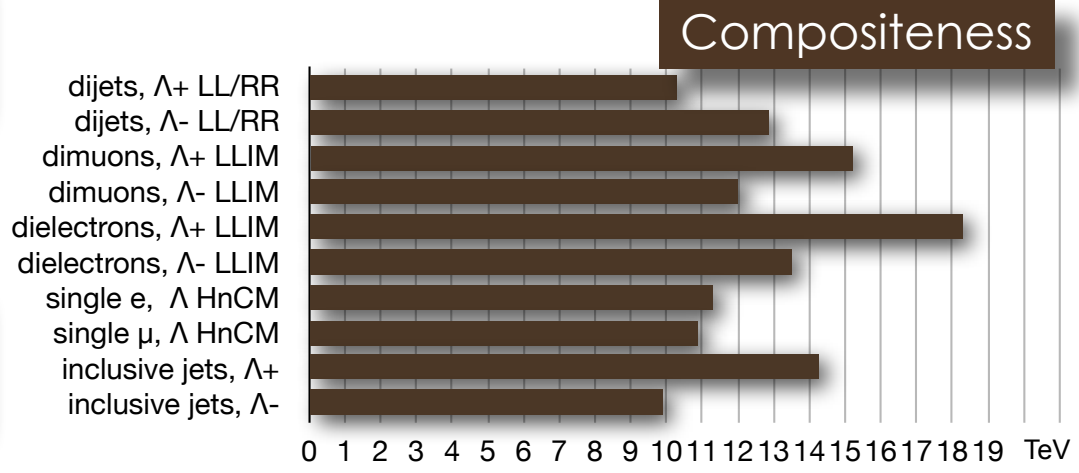
### Heavy Gauge Bosons



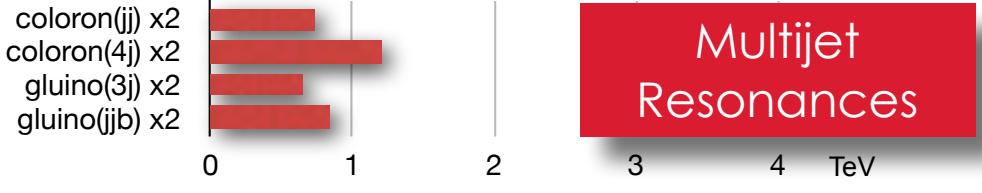
### Large Extra Dimensions



### Excited Fermions



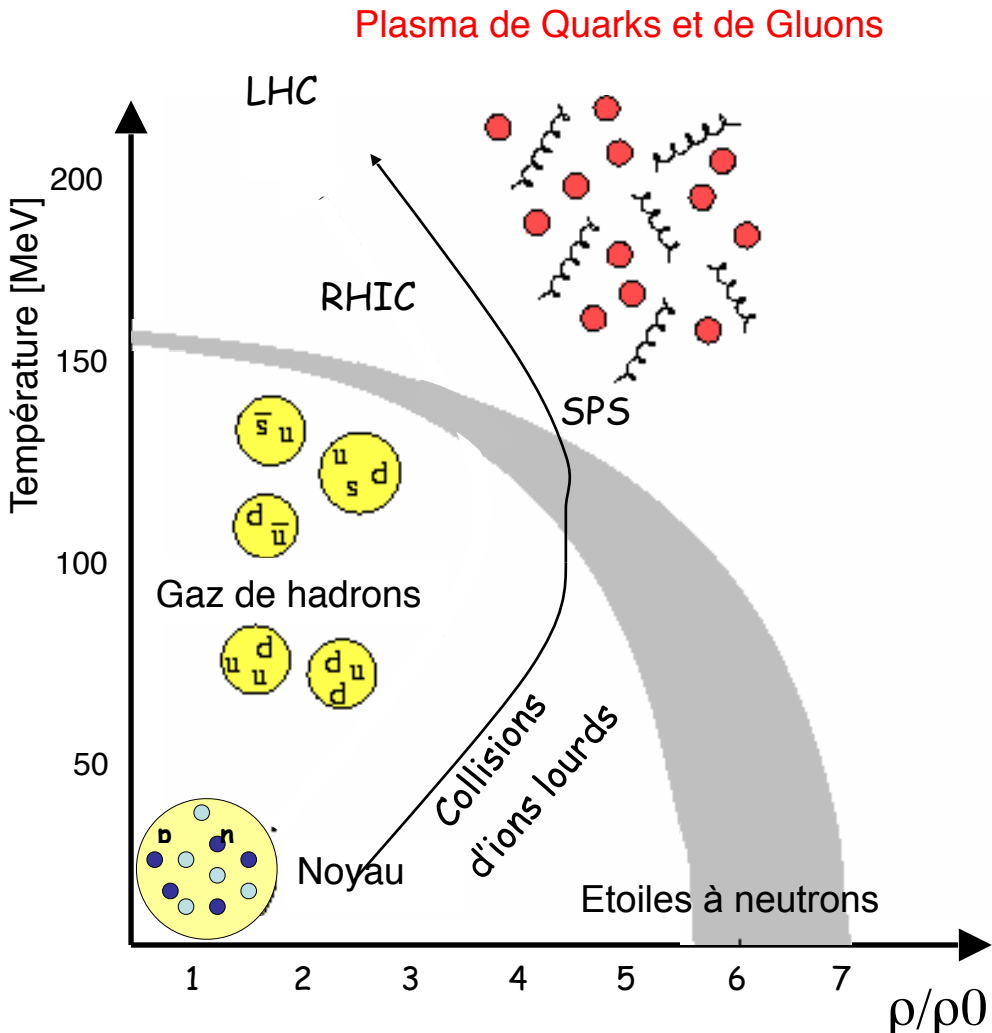
### Compositeness



### Multijet Resonances

# Collisions d'ions lourds au LHC: Pb-Pb, p-Pb

ALICE, ATLAS et CMS



Dans la matière ordinaire les quarks et les gluons sont confinés dans les hadrons.

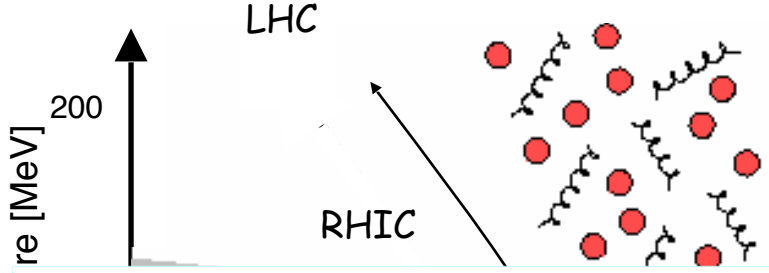
A température et densité élevées un nouvel état de la matière :  
le plasma de quarks et gluons (QGP)

**Exploration du diagramme de phase de QCD**  
 Nature de la transition de phase  
 Propriétés du plasma Quark-Gluon à haute température (RHIC & LHC) et à haute densité (GSI, FAIR/NICA)

# Collisions d'ions lourds au LHC: Pb-Pb, p-Pb

Plasma de Quarks et de Gluons

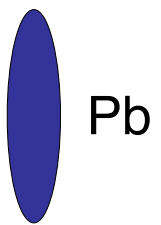
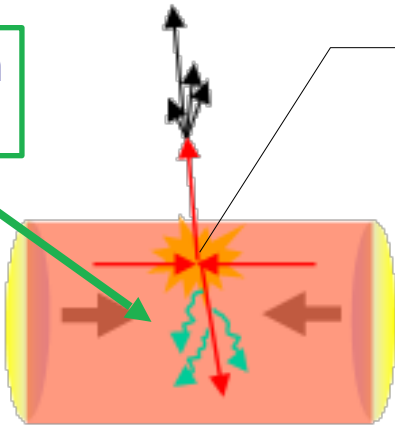
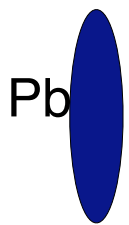
ALICE, ATLAS et CMS



Dans la matière ordinaire les quarks et les gluons sont confinés dans les hadrons.

Perte d'énergie par radiation de gluons du parton initial

Collision dure entre quarks (la sonde)



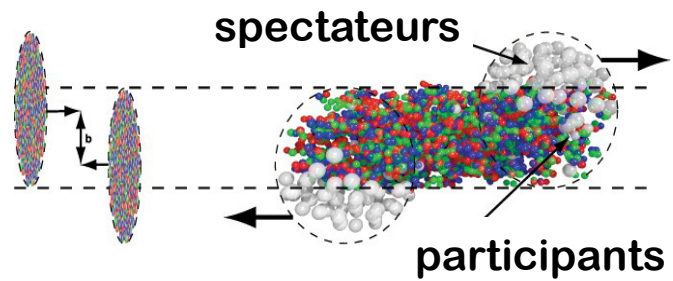
Etude du QGP  
Etude du confinement

QGP formé par la collision Pb-Pb

# Caratériscation des collisions Pb-Pb: Pasma Quark-Gluon ?

Eur. Phys. J. C (2014) 74-3108

Présentation Antoine Lardeux



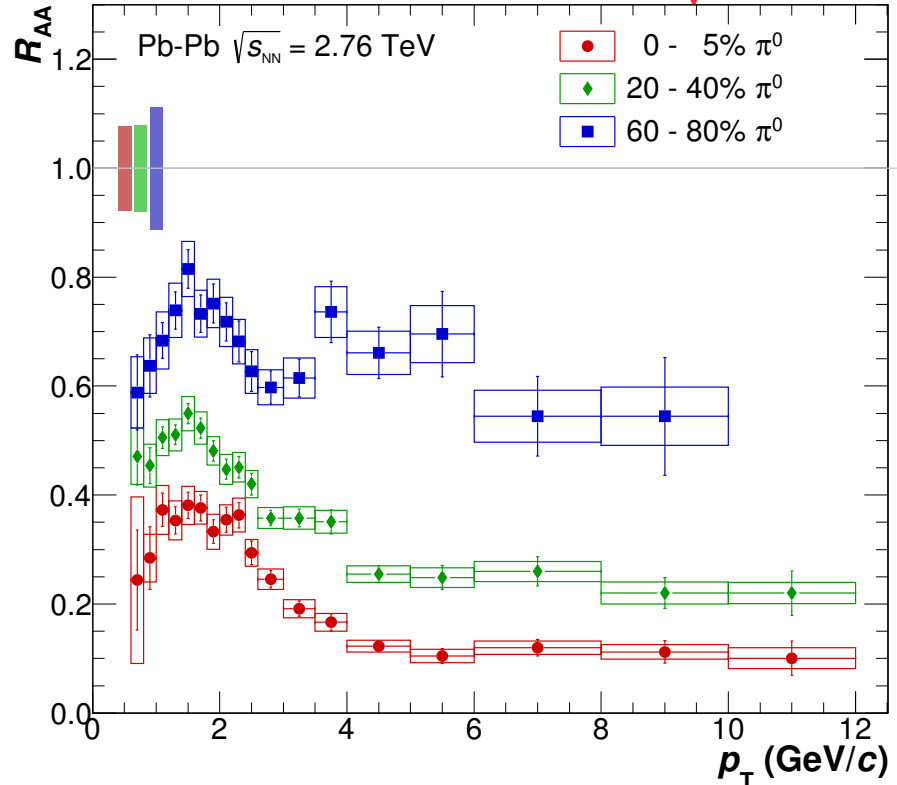
$N_{part}$  : nombre de nucléons participant à la collision  
 $N_{coll}$  : nombre de collisions binaires nucléon-nucléon

Mésons  $\pi^0$  à grand  $p_T$  : sélecteur d'une collision dure

indicateur de la centralité de la collision

$$R_{AA} = \frac{N_{PbPb}^{J/\psi}}{\langle N_{coll} \rangle N_{pp}^{J/\psi}}$$

Quantifie les effets nucléaires  
 = 1 Pas d'effet de milieu  
 < 1 Suppression  
 > 1 Augmentation



## 1964 Higgs mechanism and Higgs particle

1980's: First ideas about LHC

1990 - ECFA Aachen meeting: Physics, detector, machine ( $H \rightarrow \Upsilon\Upsilon$  ?)

First R&D's (First Accordion prototype)

1992 - ATLAS Letter of Intend

2 metre accordion module with fast readout

1994 - ATLAS Technical Proposal

Spanish fan - Endcap accordion prototype

1996 - 2000 - ATLAS Technical Design Reports

Modules Zero and R&Ds, tesbeam, tesbeam, tesbeam

2000 ATLAS Memorandum of Understanding

Cavern & detector construction starts

2003-2004 ATLAS detector starts to go down

ATLAS combined testbeam

2006-2007 ATLAS continues installation

First cosmic muons data taking

2008 - LHC incident / 2009 First collisions

More cosmic muons + 0.9 TeV + 2.76 TeV pp collisions

2010 ~35 evts/pb pp collisions at 7 TeV & Pb-Pb collisions

2011 ~ 5 evts/fb pp collisions at 7 TeV & Pb-Pb collisions

2012 ~ 20 evts/fb pp collisions at 8 TeV -

**The Higgs boson is discovered  $m_H \sim 125$  GeV**

ATLAS is 20 years old

2013 - p-Pb collisions and start of a two years Long Shutdown

2015 Run II starts with  $\sqrt{s}=13$  TeV

## 1964 Higgs mechanism and Higgs particle

1980's: First ideas about LHC

1990 - ECFA Aachen meeting: Physics, detector, machine ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )

First R&D's (First Accordion prototype)

1992 - ATLAS Letter of Intend

2 metre accordion module with fast readout

1994 - ATLAS Technical Proposal

Spanish fan - Endcap accordion prototype

1996 - 2000 - ATLAS Technical Design Reports

Modules Zero and R&Ds, tesbeam, tesbeam, tesbeam

2000 ATLAS Memorandum of Understanding

Cavern & detector construction starts

2003-2004 ATLAS detector starts to go down

ATLAS combined testbeam

2006-2007 ATLAS continues installation

First cosmic muons data taking

2008 - LHC incident / 2009 First collisions

More cosmic muons + 0.9 TeV + 2.76 TeV pp collisions

2010 ~35 evts/pb pp collisions at 7 TeV & Pb-Pb collisions

2011 ~ 5 evts/fb pp collisions at 7 TeV & Pb-Pb collisions

2012 ~ 20 evts/fb pp collisions at 8 TeV -

**The Higgs boson is discovered  $m_H \sim 125$  GeV**

ATLAS is 20 years old

2013 - p-Pb collisions and start of a two years Long Shutdown

2015 Run II starts with  $\sqrt{s}=13$  TeV

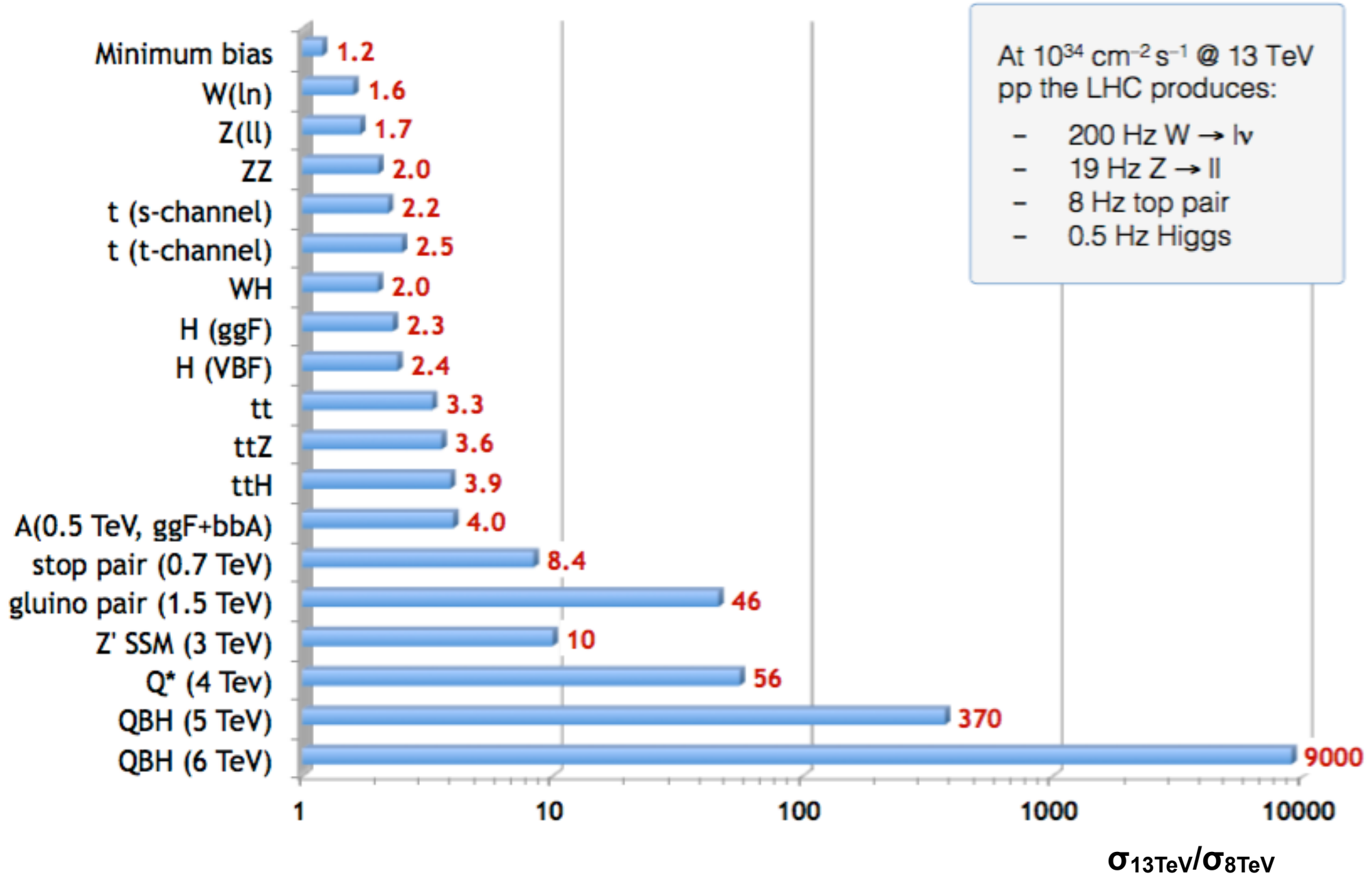


**PRESENT**

**RUN II**



# Le run II du LHC: $\sqrt{s}=8 \rightarrow 13$ TeV



# Insertable B Layer



IBL installé mai 2014

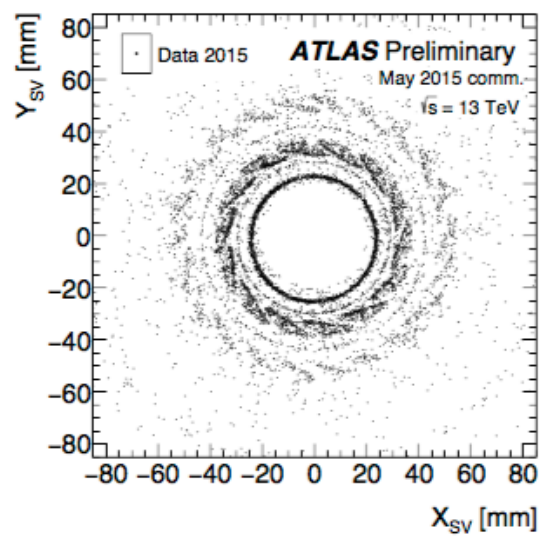
$R = 3.325 \text{ cm}$   
 6 millions de pixels  
 $50 \times 250 \mu\text{m}^2$

Amélioration de la performance d'identification des jets de quarks b

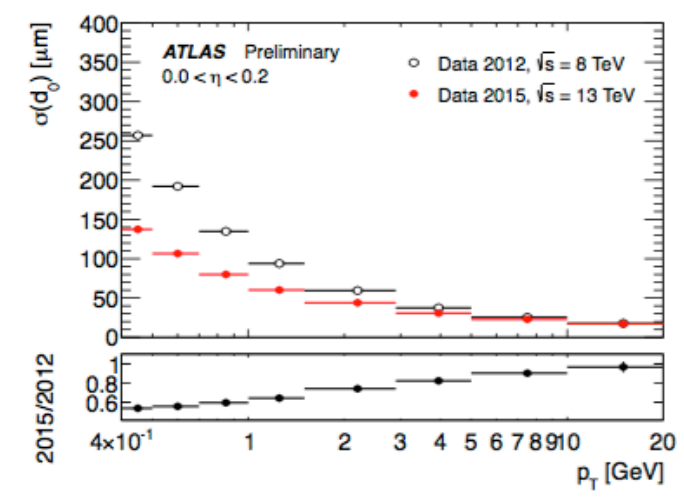
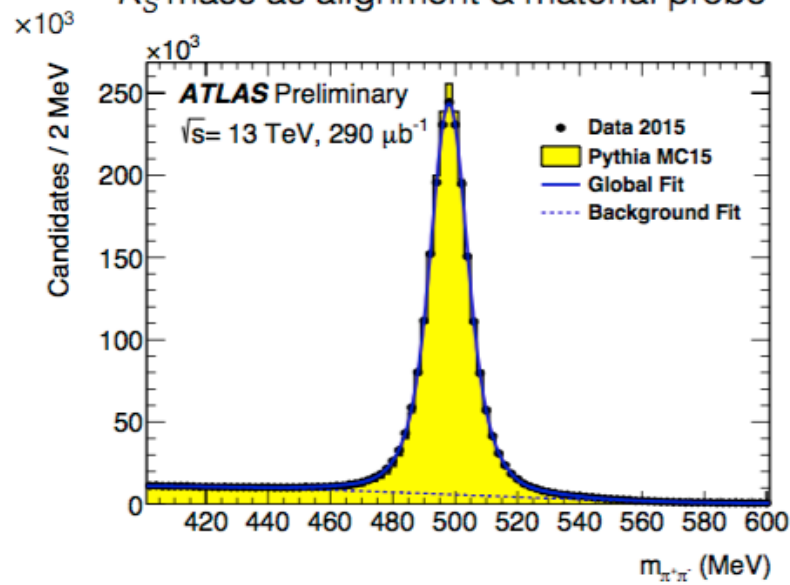
$H \rightarrow b\text{-}b\text{bar}$  (cf G. Unal)



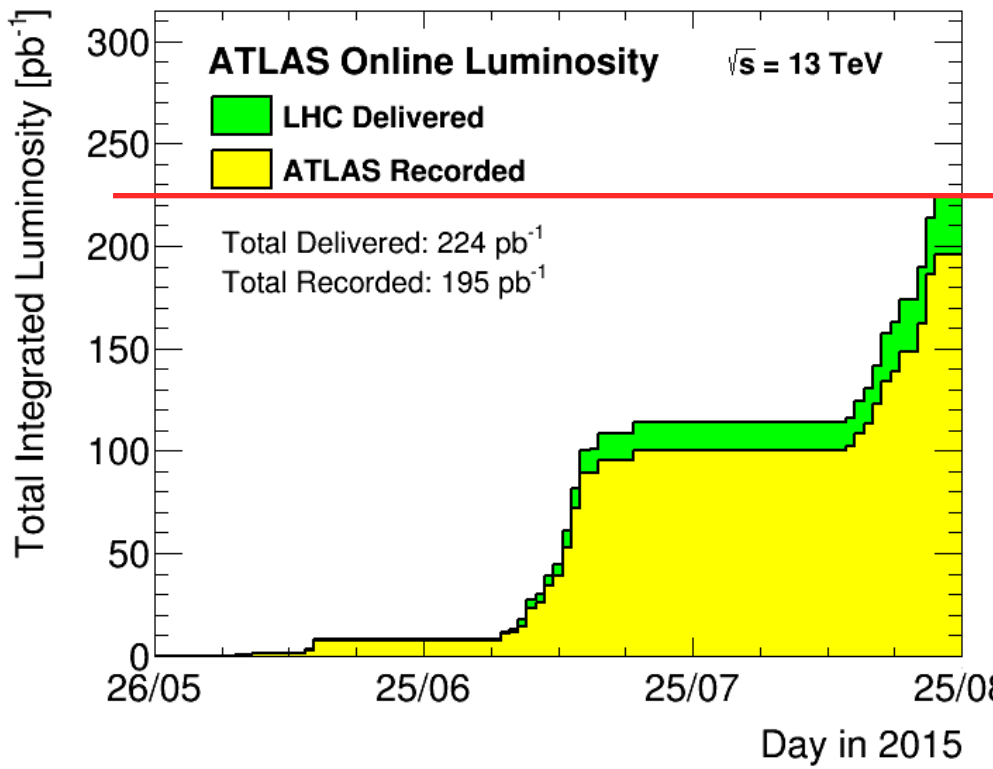
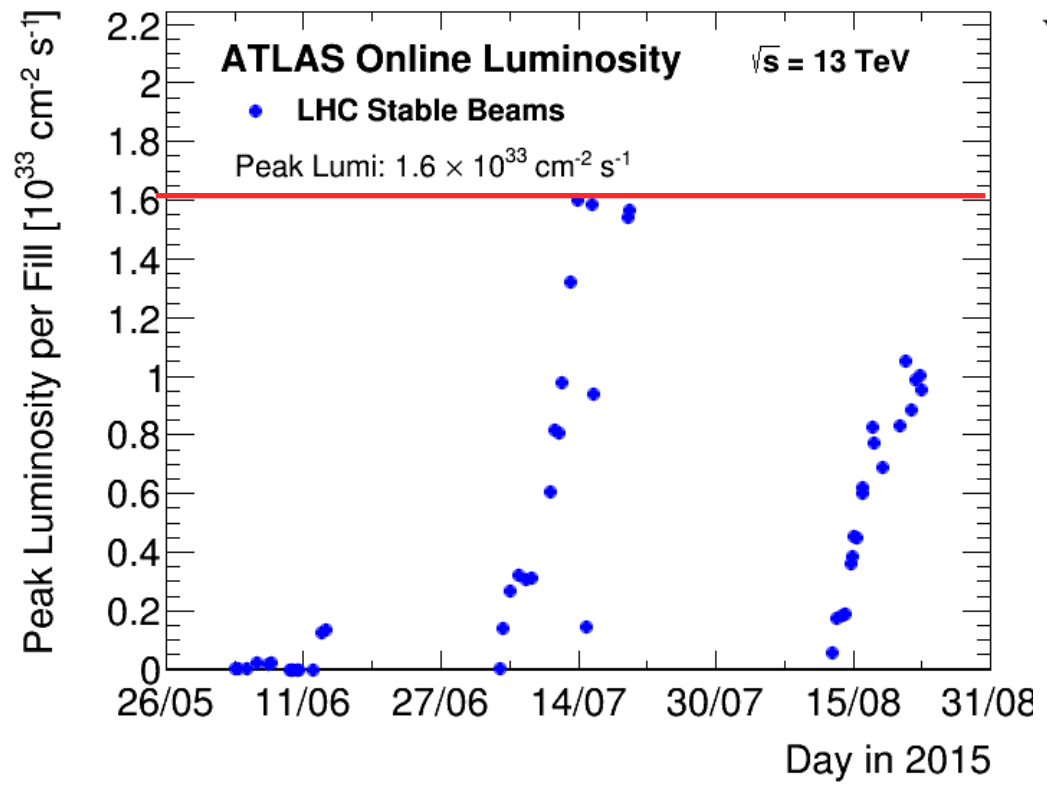
## Hadronic interaction vertices



## $K_S$ mass as alignment & material probe



# Premiers résultats à 13 TeV



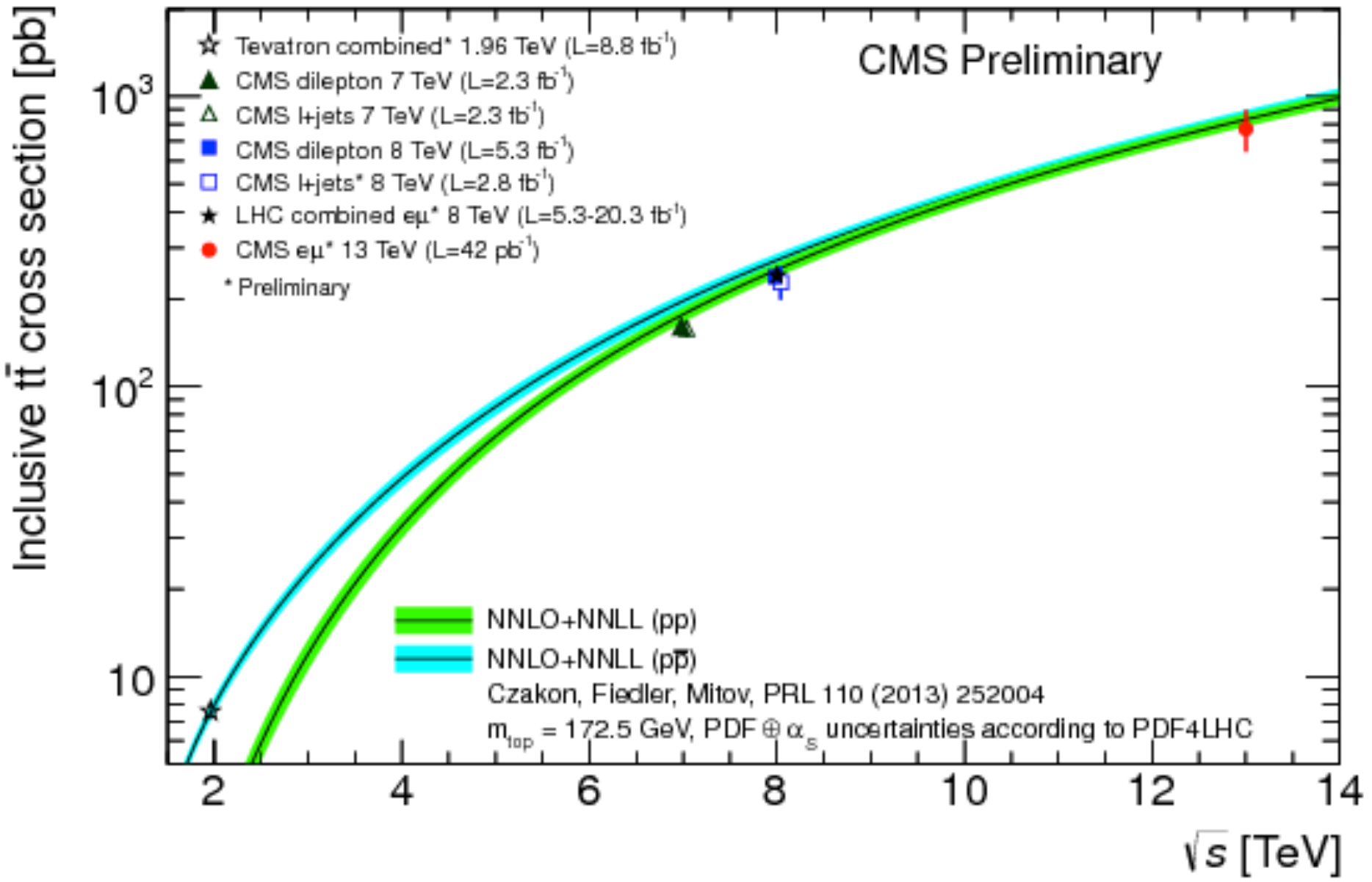
[cf 2012:  $7.7 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]  
 Attendu au run II  $L=1.3 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

[cf 2012:  $\sim 23000/\text{pb}$ ]  
 Attendu au run II  $\int L \cdot dt = 120 \text{ fb}^{-1}$

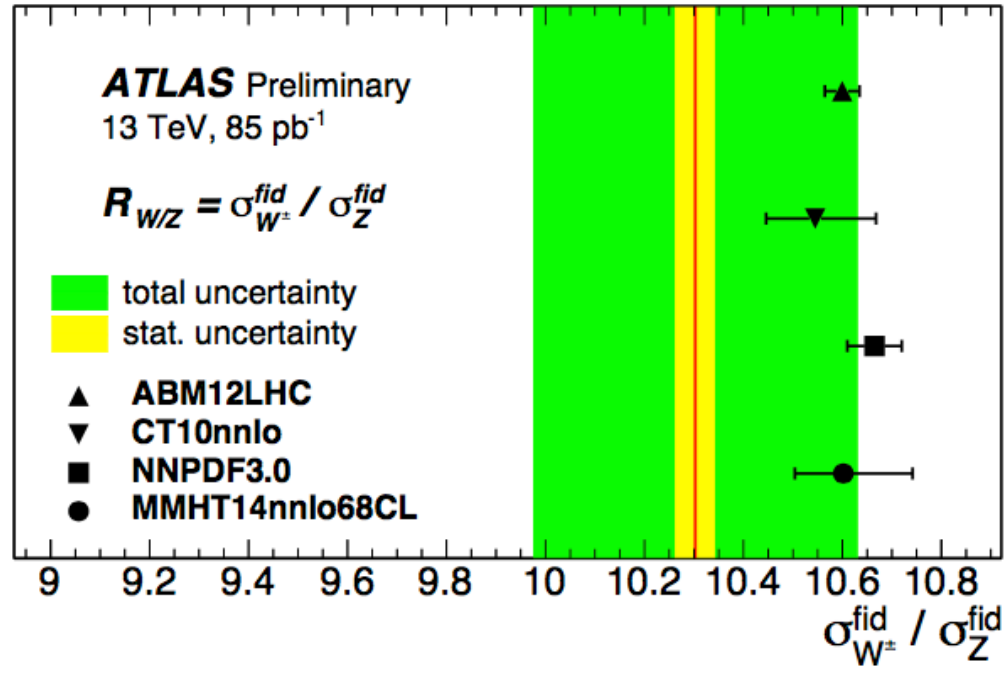
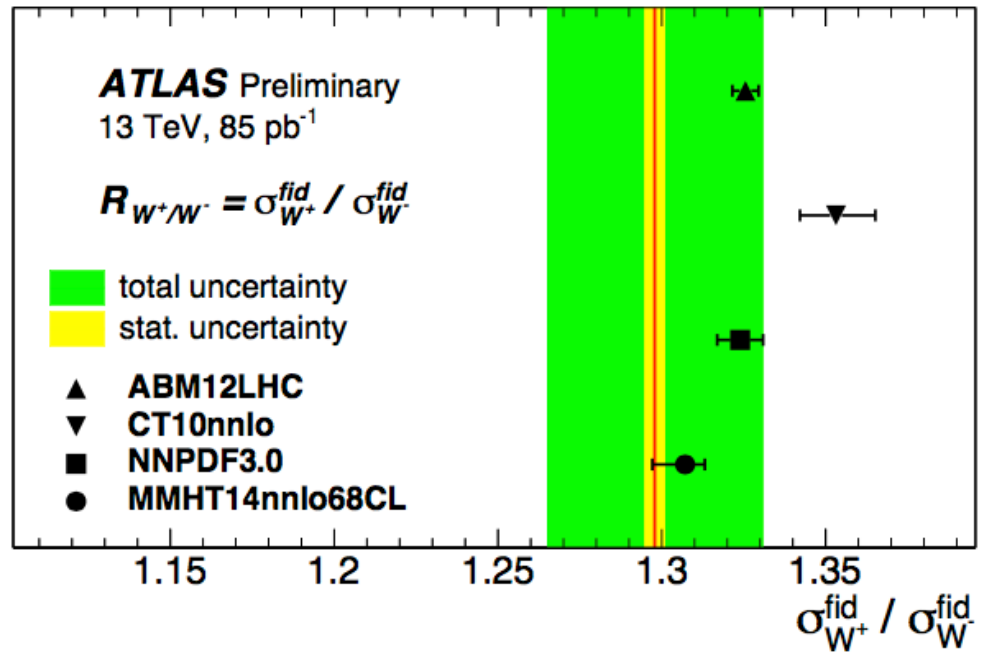
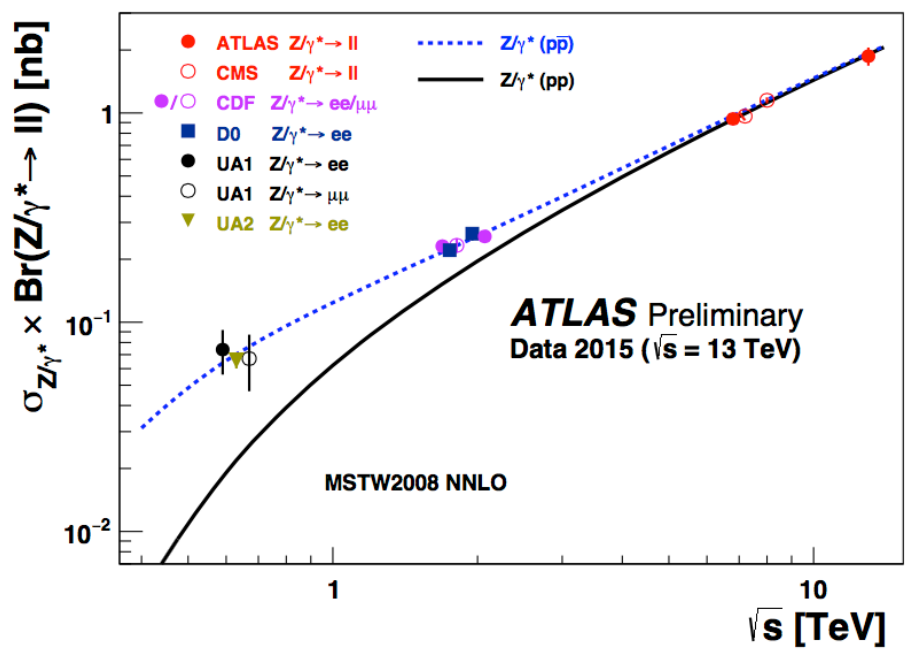
# Section efficace de production t-tbar à $\sqrt{s}=13$ TeV



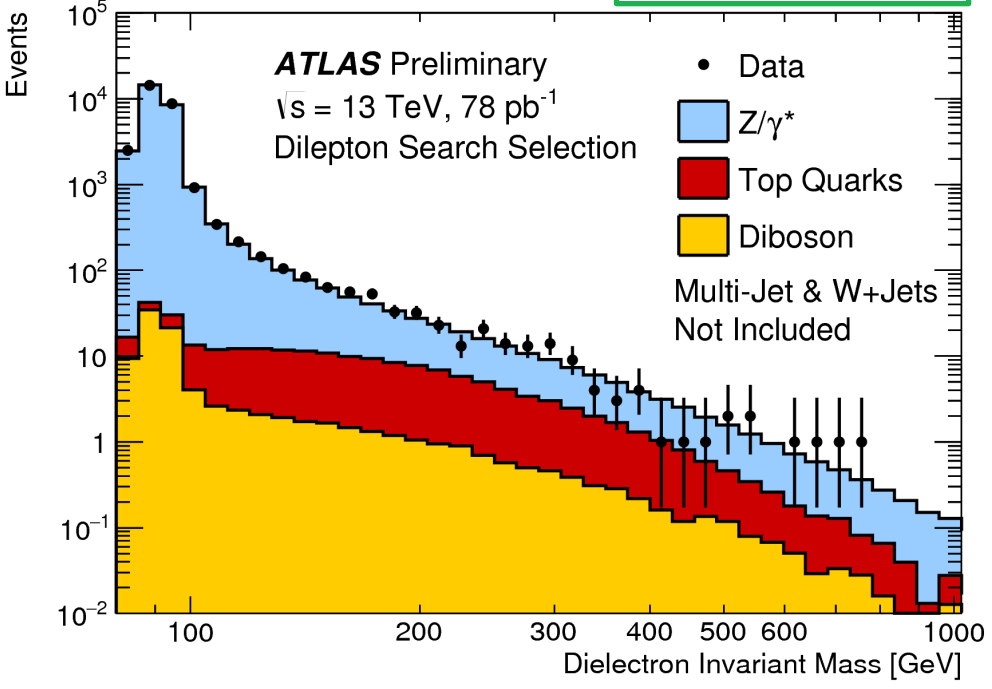
Présentation Olivier Davignon



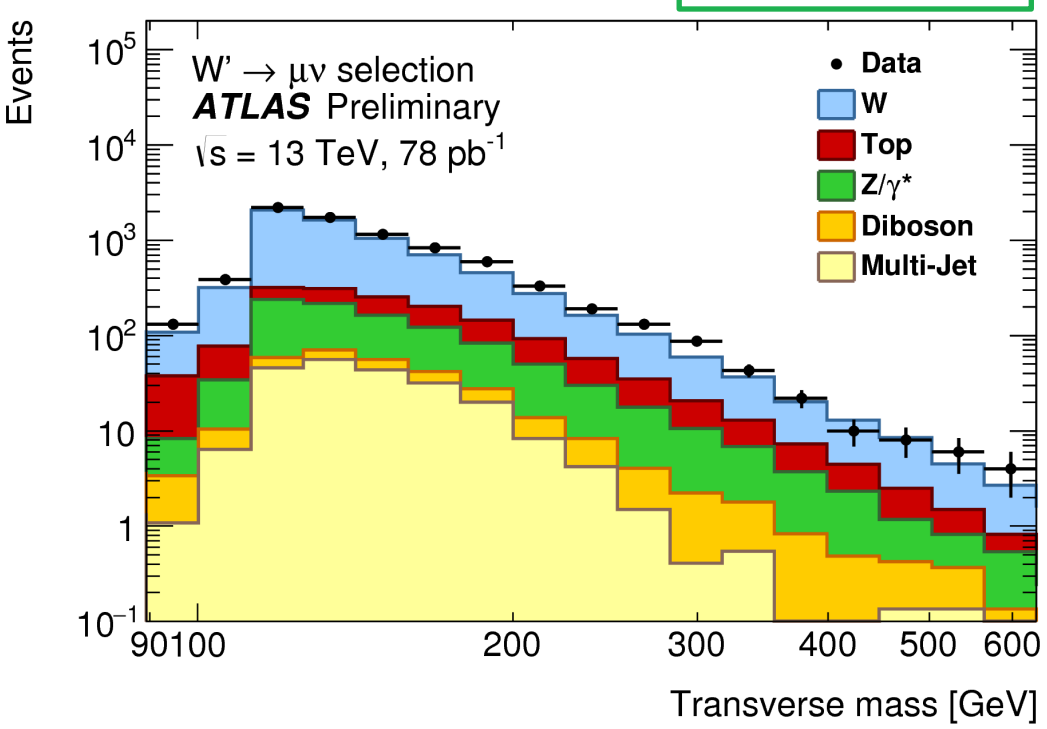
# Production du boson Z à $\sqrt{s}=13$ TeV



$pp \rightarrow ee + X$



$pp \rightarrow \mu\nu + X$



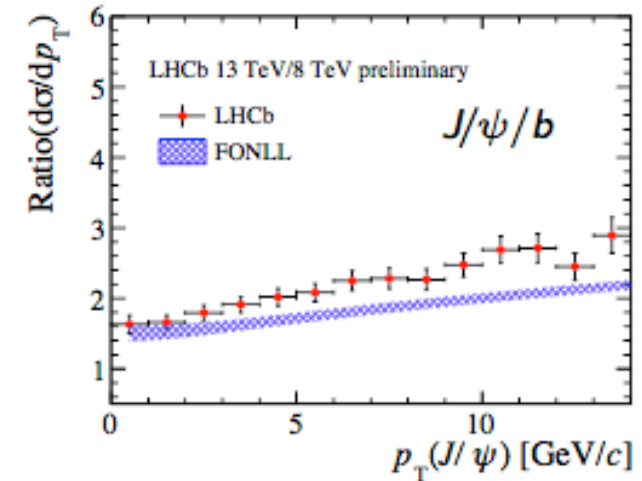
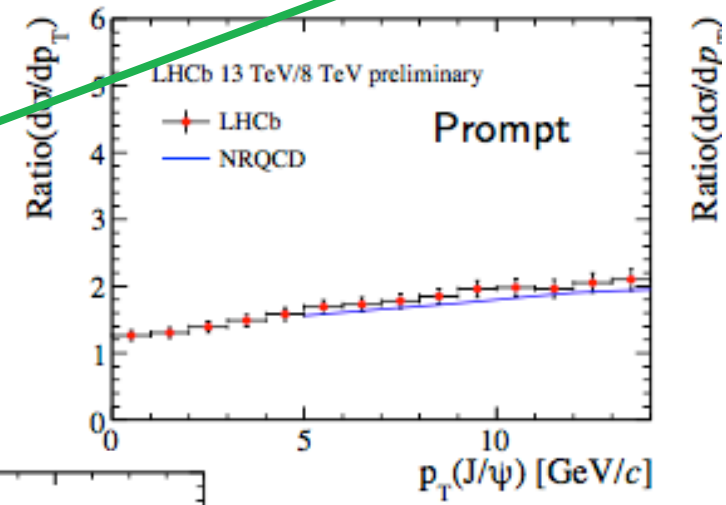
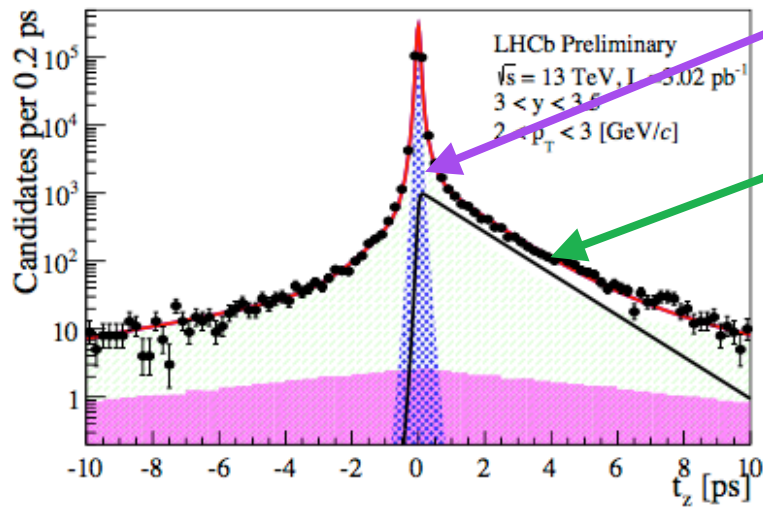
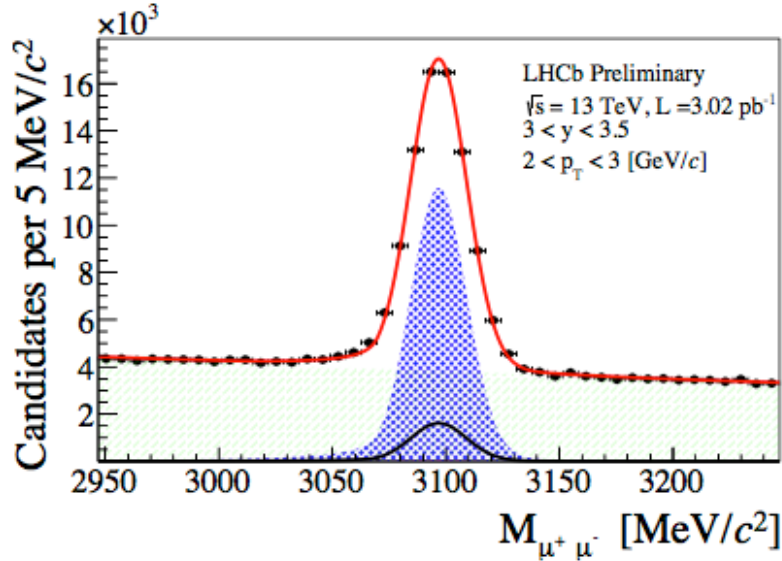
multi-jet background data-driven

# J/ψ production à $\sqrt{s}=13$ TeV par LHCb

Maison composé d'un quark charm et d'un anti-charmé avec  $m_{J/\psi}=3.0969$  GeV.

J/ψ se désintègre en paire  $\mu^+\mu^-$ .

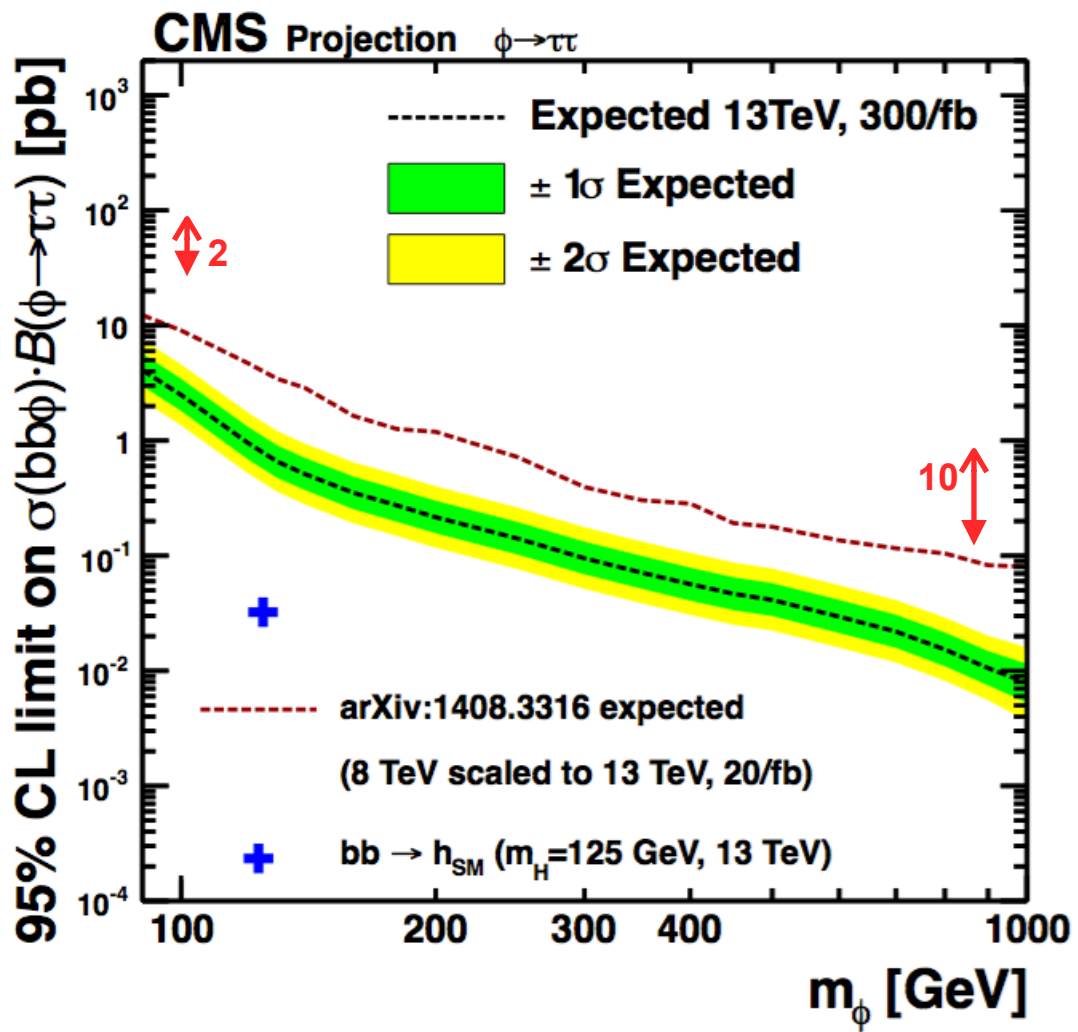
Produit dans les collisions pp **directement** ou dans la désintégration du quark b (**vertex déplacé**).



$$t_z = \frac{(z_{J/\psi} - z_{PV}) M_{J/\psi}}{p_z}$$

# Le run II

Etendre les recherches de particules au delà du modèle standard.  
 Peaufiner les mesures de sections efficaces des processus rares.  
 Raffiner les mesures de couplages



Secteur scalaire étendu présent dans de nombreux modèles BSM

Modèle à deux doublets de Higgs:

5 bosons de Higgs dont trois neutres ( $\Phi=h,H,A$ )

Recherche simultanée dans le mode  $\Phi \rightarrow \tau\tau$

Limites d'exclusion de la section efficace  $pp \rightarrow \Phi \rightarrow \tau\tau$ .



**FUTUR**

**HL-LHC et après**

# LES AMELIORATIONS (*UPGRADES*) POUR HL-LHC

Pourquoi ?

Mesure des couplages du Higgs à 2-5 % pour la plupart des processus, 10% pour les processus rares.

Accès à la deuxième générations de fermions au travers de désintégrations rares du Higgs:  $H \rightarrow \mu\mu$

Accès direct aux couplages de Yukawa du top au travers du processus rare  $ttH \rightarrow tt\gamma\gamma$

Mesure de l'auto-couplage du Higgs à 30% ?

Etendre la recherche pour le quark s-top jusqu'à une masse de  $\sim 1.5$  TeV

Etendre la gamme de masse de 1-2 TeV pour la production de particules seules ( $Z'$ , ..) vs le run III et atteindre  $\sim 10$  TeV.

# High Luminosity LHC

Aujourd'hui - 25 fb<sup>-1</sup>/expérience

ATLAS+CMS: 1400 événements Higgs après les coupures de selection (1M à la production)

Observé/mesuré *so far*: couplages aux W, Z et 3<sup>ème</sup> generation fe fermions t, b,  $\tau$  (ttH: indirectement au traverse de la boucle de fusion de gluons)

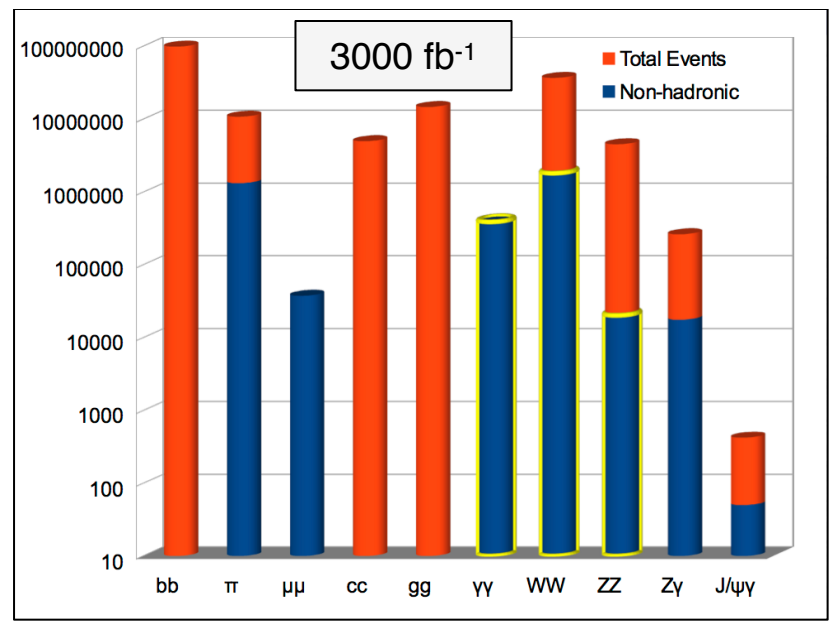
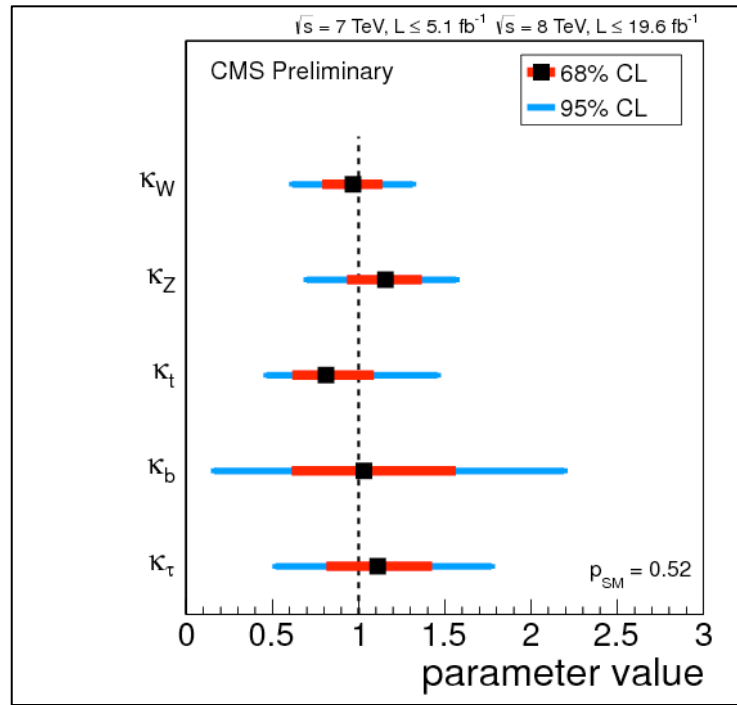
Typical precision: ~ 20%

HL-LHC - 3000 fb<sup>-1</sup>/expérience

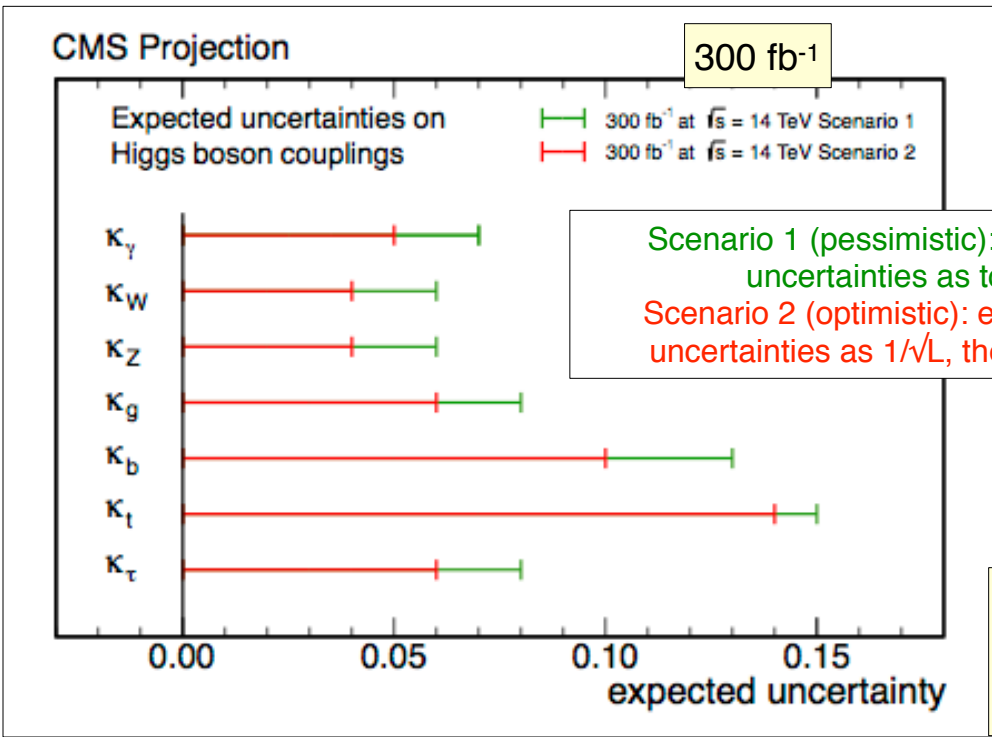
170M Higgs evts/expt à la production

3M sélectionnés pour les mesures de précisions

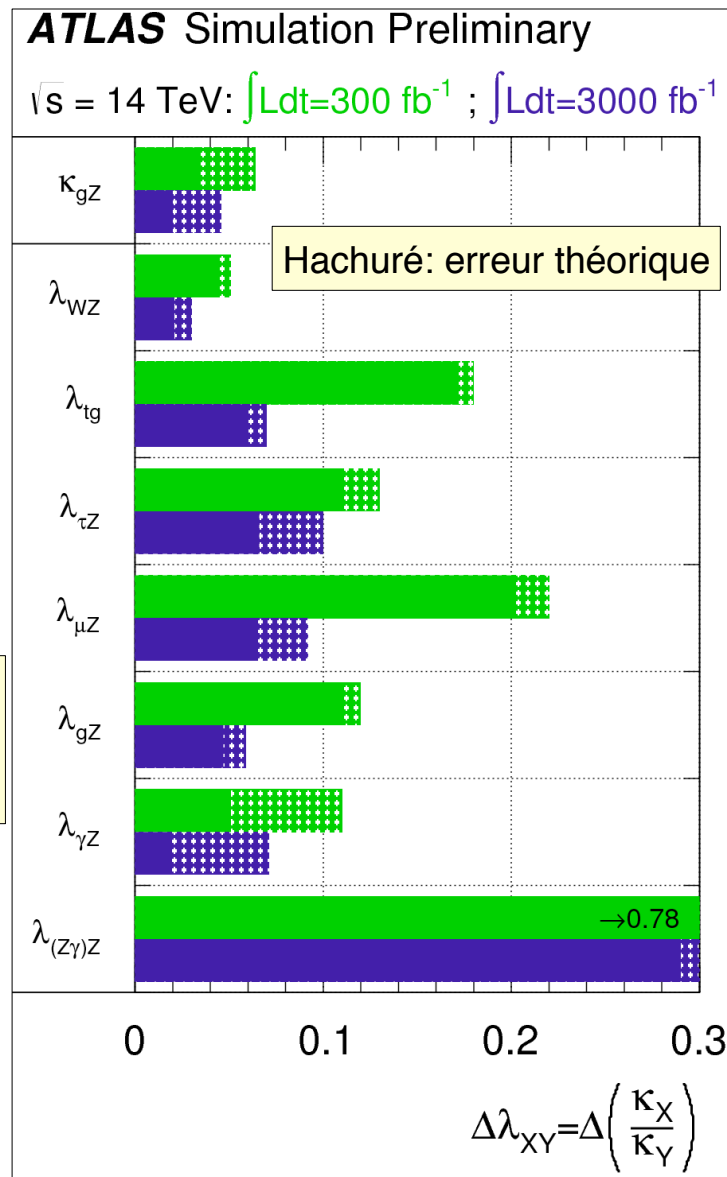
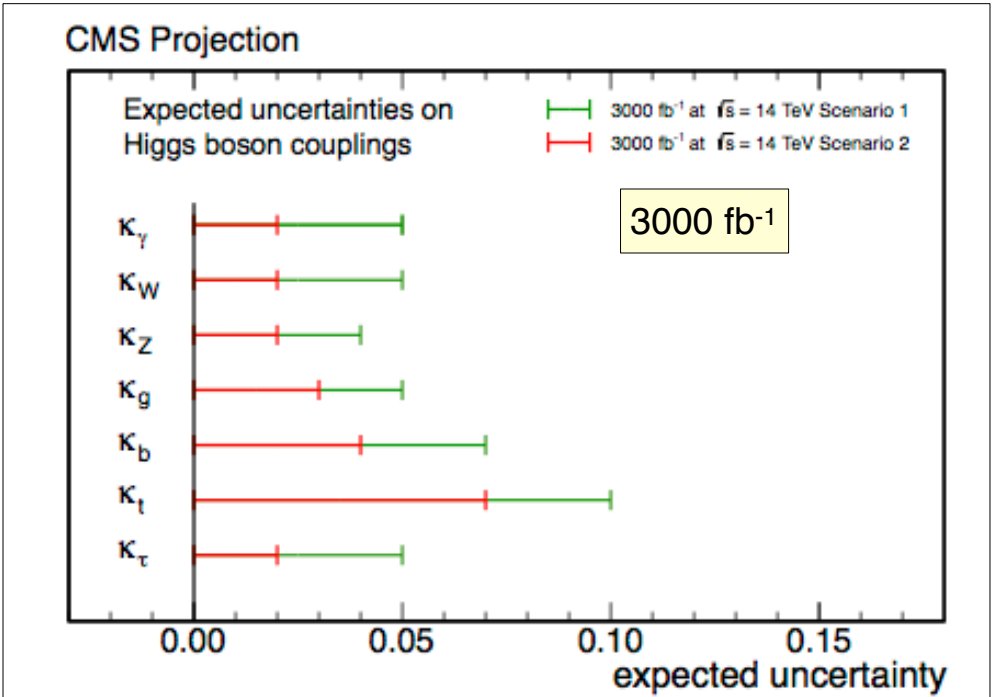
HL-LHC est une usine à Higgs  
 → Processus rares  
 → Précision sur les couplages 4-10 fois meilleure qu'aujourd'hui



# Les couplages du boson de Higgs

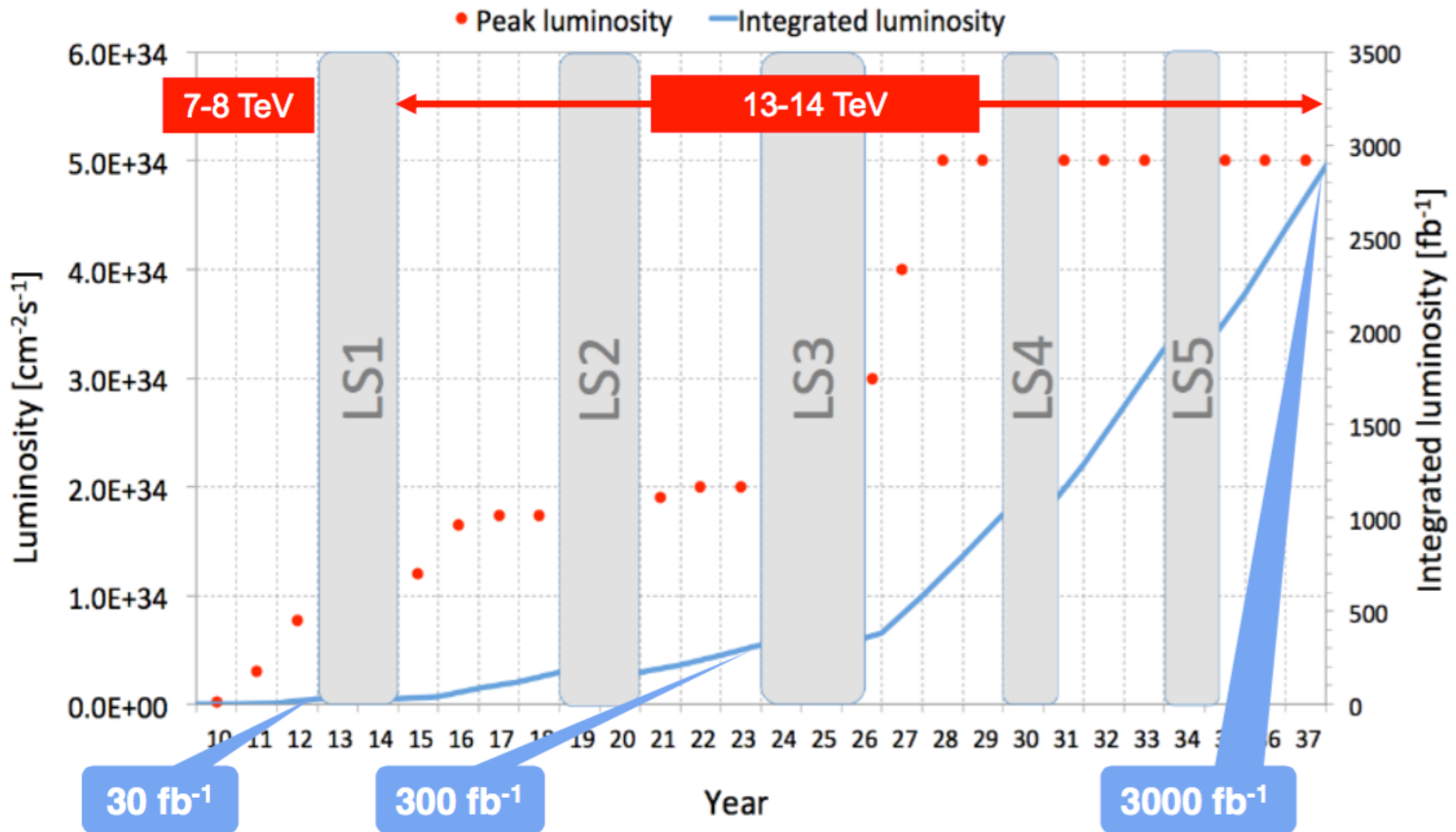


$k_i =$  couplage mesuré normalisé au MS  
 $\lambda_{ij} = k_i/k_j$



**Conclusion**  
 3000 fb<sup>-1</sup>: précision typique de 2-10% par expérience (sauf pour les modes très rares)  
 1.5-2x mieux qu'avec 300 fb<sup>-1</sup>  
 Crucial pour aussi réduire les erreurs théoriques

# LHC roadmap: Integrated luminosity



**LS1 = consolidation for maximizing energy reach of the LHC (8 to 14 TeV)**  
**LS2 = LIU for beam intensity upgrade**  
**LS3 = HL-LHC for luminosity upgrade**

# ATLAS et CMS pour HL-LHC

L'augmentation en luminosité prévue dépasse les contraintes de construction des détecteurs appliquées dans les années 1990

La luminosité cinq fois plus grande: empilement de 200 événements/croisement

Le taux de radiations élevé

Les trajectographes doivent être remplacés

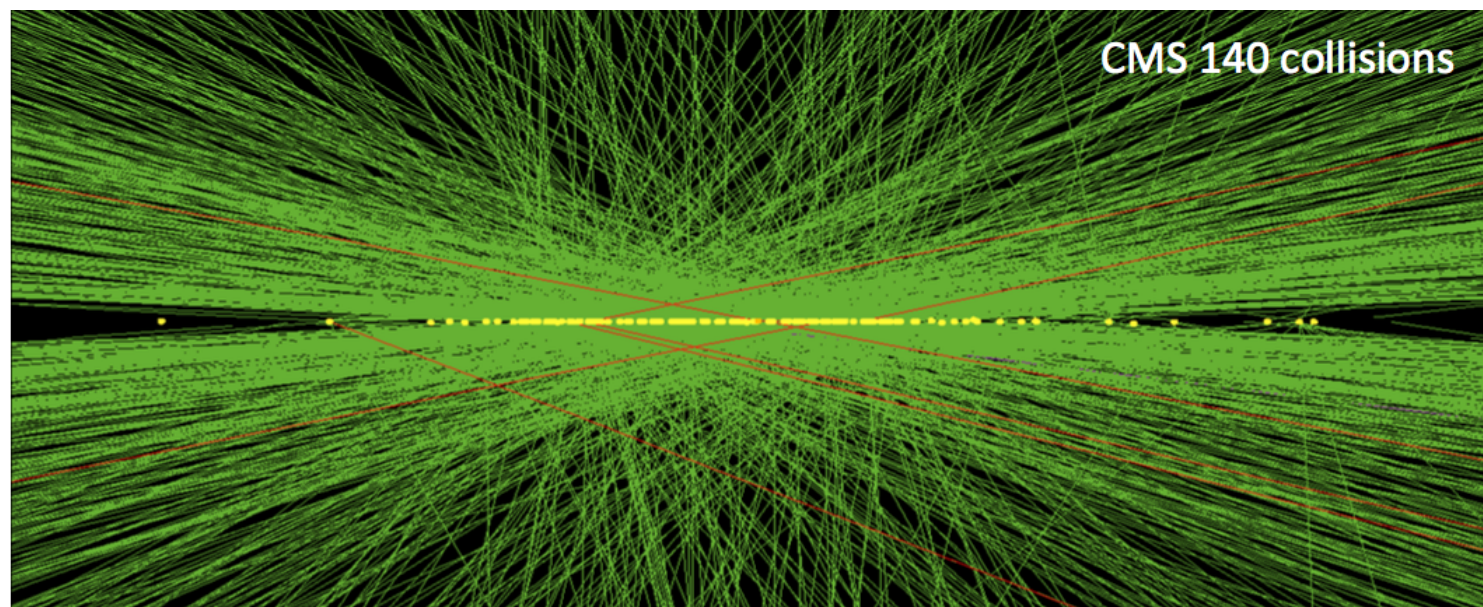
L'électronique doit aussi être changée (20 ans) pour permettre un traitement accéléré des données.

Des sections des calorimètres doivent être remplacées (CMS)

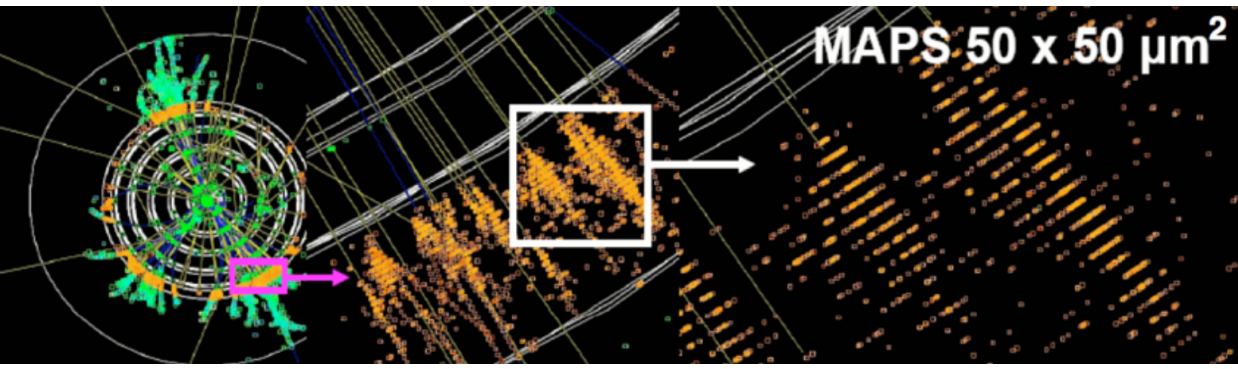
Les chambres à muons doivent être partiellement améliorées

Le système de déclenchement doit être raffiné pour identifier les traces de haute impulsion transverse dès le premier niveau.

Le Software et le calcul sont modernisés pour traiter plus de données.



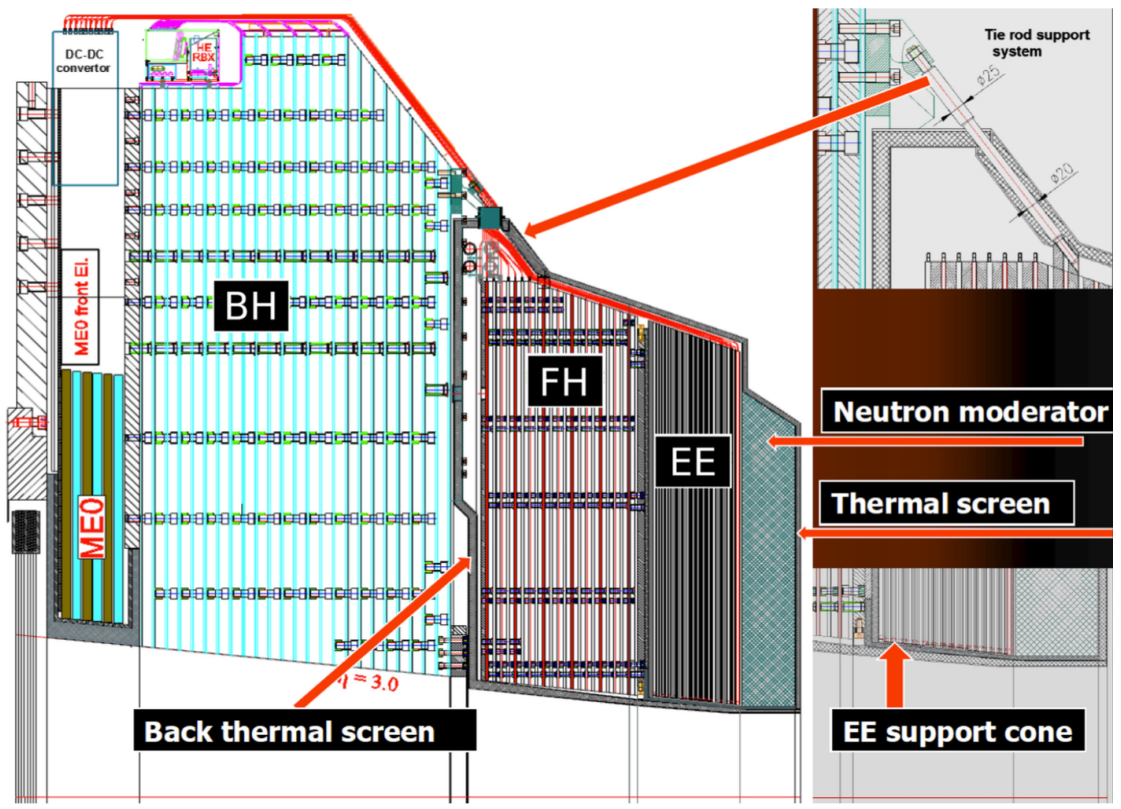
# Nouveau calorimètre pour CMS: ~trajectographe



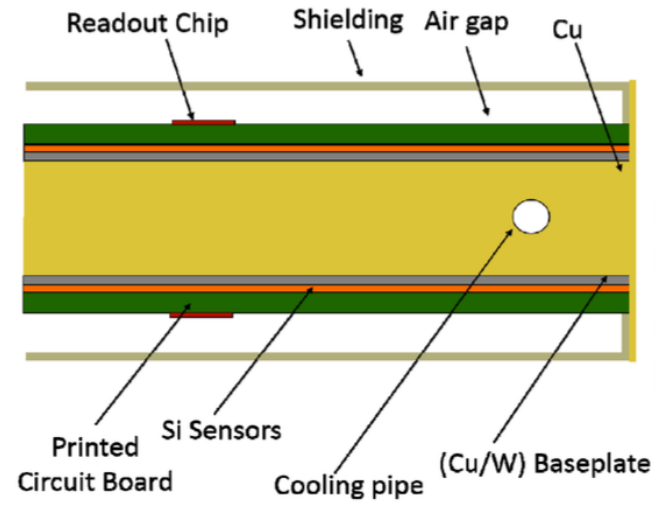
**Calorimètre très granulaire**  
 Technique développée dans le cadre des R&D pour les collisionneurs linéaires

Segmentation x résolution en temps ~10ps  
 → rejection des empilements à LHC

Calorimètre avant pour CMS à HL-LHC



	EE	FH	Total
Area of silicon (m <sup>2</sup> )	380	209	589
Channels	4.3M	1.8M	6.1M
Detector modules	13.9k	7.6k	21.5k
Weight (one endcap) (tonnes)	16.2	36.5	52.7
Number of Si planes	28	12	40



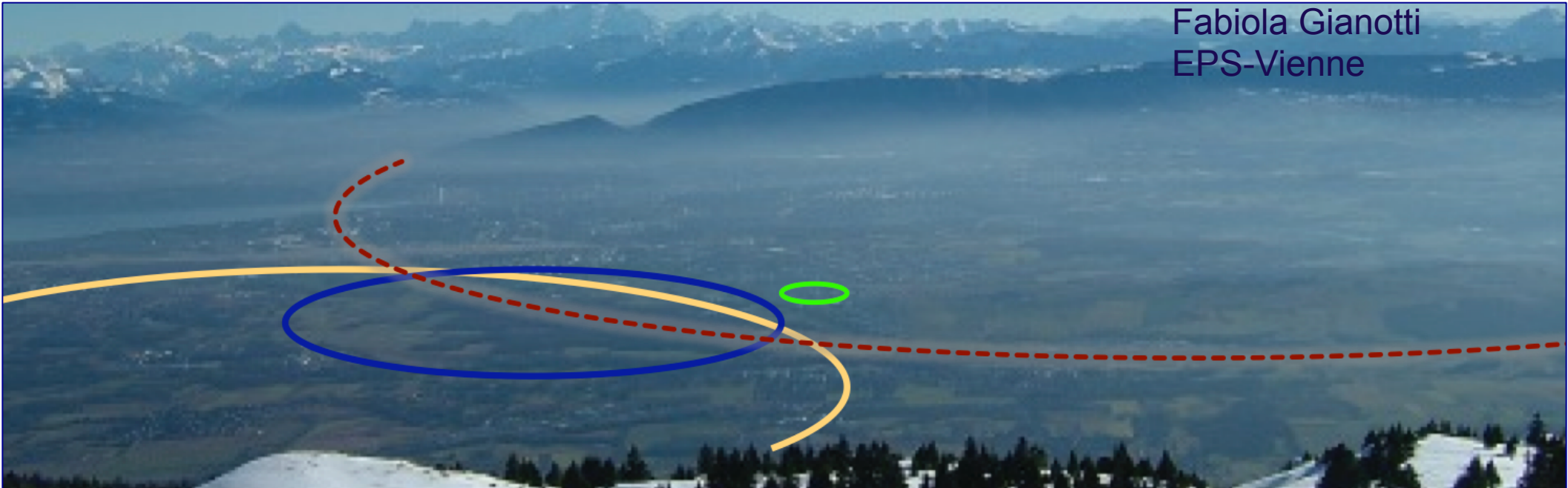
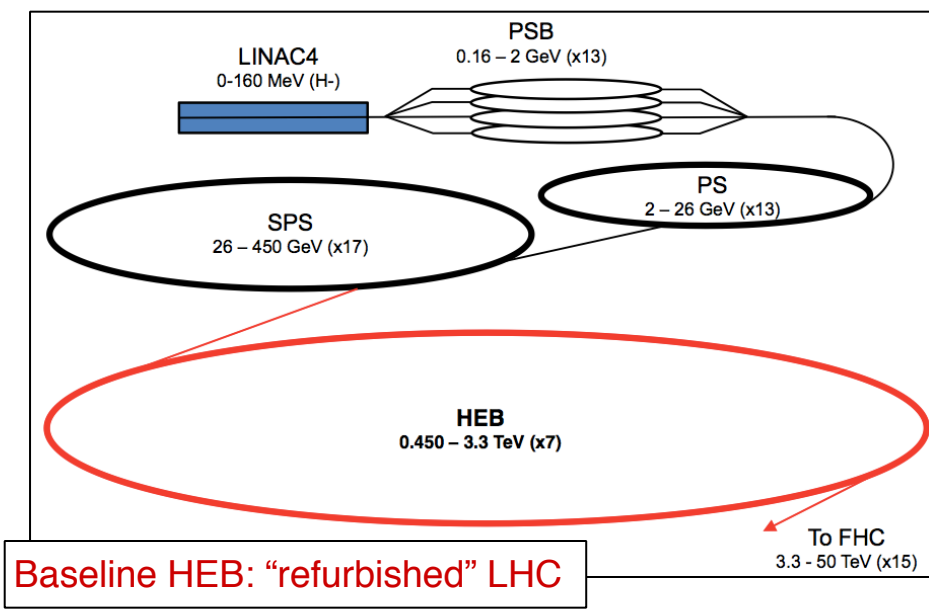
# Après LHC: poursuivre l'exploration à la limite en énergie et en intensité

Plusieurs projets sont à l'étude

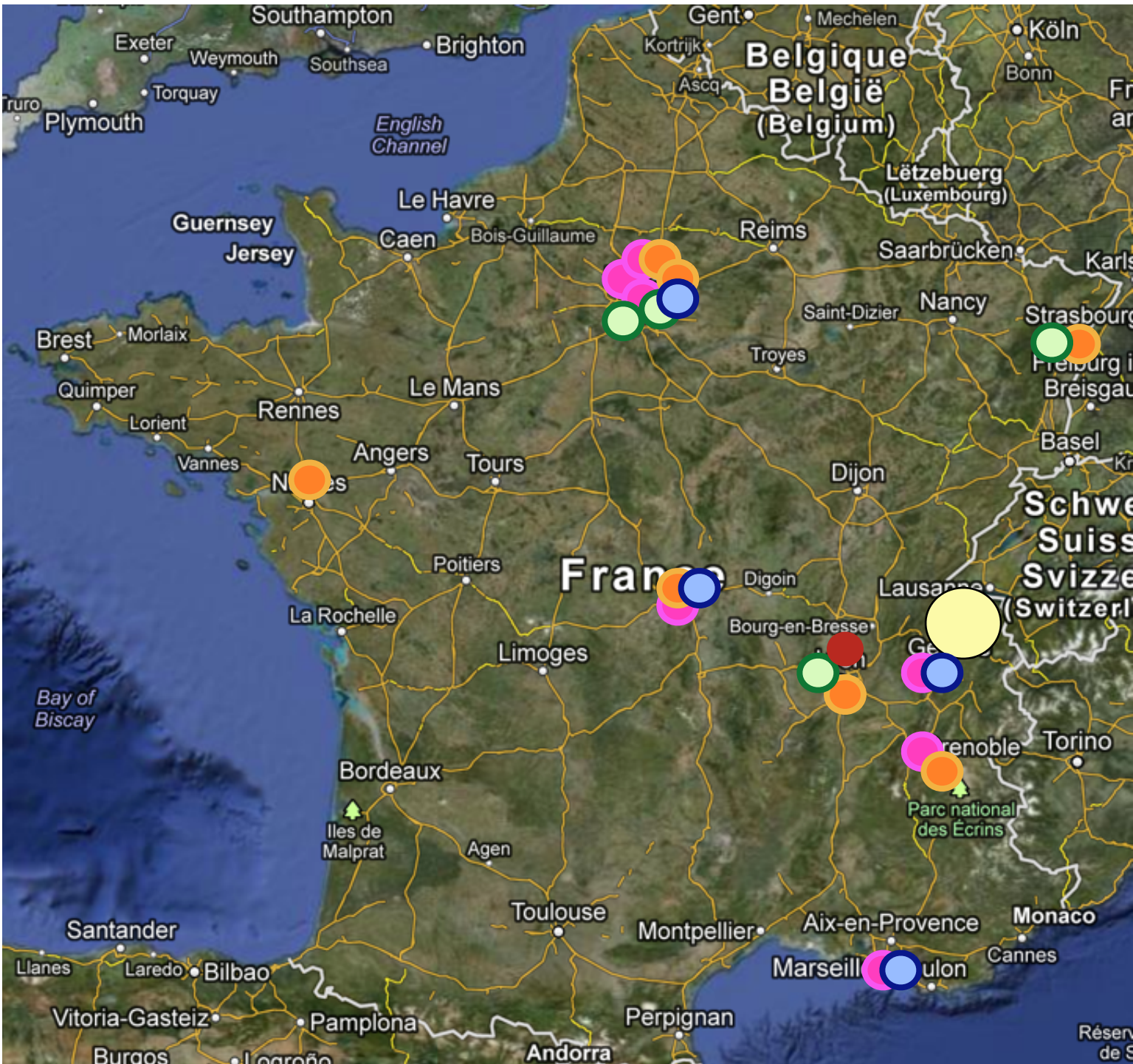
Collisionneur linéaire  $e^+e^-$

Collisionneur hadronique pp à 100 TeV!

Quand ? 2030-2040 ?







- ALICE
- ATLAS
- CMS
- LHCb
- CC-IN2P3

# A l'aube de la deuxième campagne du LHC

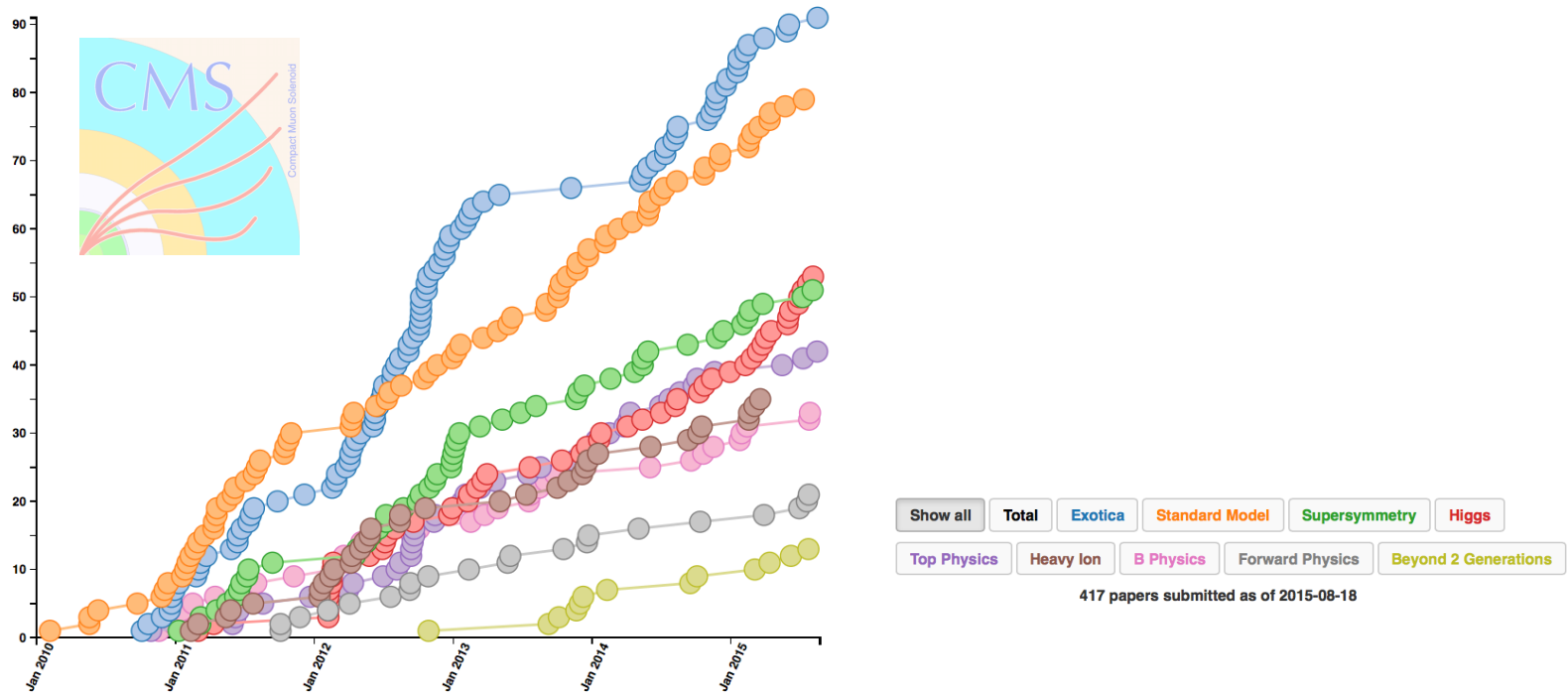
Les collisions p-p délivrées par LHC et enregistrées par ATLAS+CMS+LHCb ont apporté une moisson généreuse de résultats:

- Ingéniosité dans la conception des détecteurs puis rigueur pour le fonctionnement
- Performances éclatantes de l'accélérateur et des détecteurs
- Découverte du boson de Higgs  $m_H \sim 125$  GeV [cf Guillaume Unal jeudi à 17:15]
- Le modèle standard de la physique des particules n'a pas été mis en défaut
- Aucune indication significative au delà du MS
- Plus de 1000 publications dans les revues avec comité de lecture.

Collisions PbPb et pPb at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  et 5 TeV:

Etude du Plasma Quarks-Gluons par ALICE, ATLAS & CMS

Les quatre expériences ALICE, ATLAS, CMS et LHCb ont fonctionné avec des performances rarement atteintes: 99% des canaux opérationnels, 90% d'efficacité de prise de données



# A l'aube de la deuxième campagne du LHC

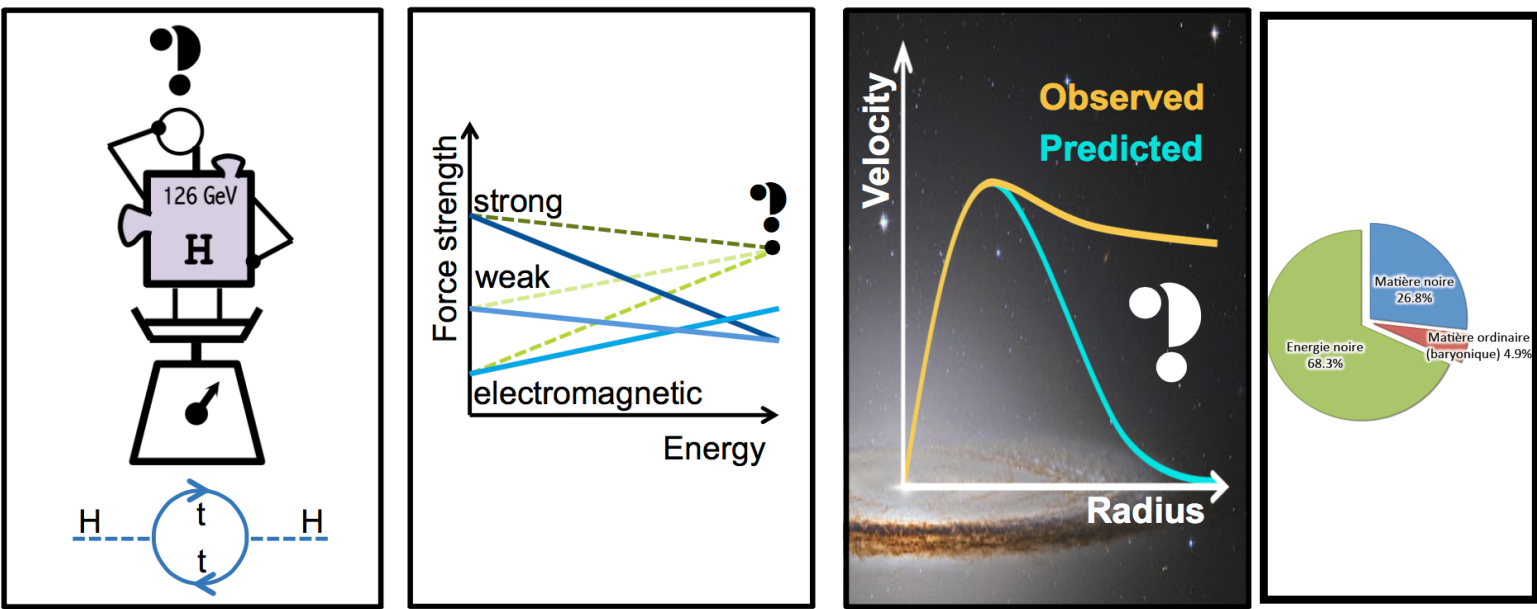
Cependant le potentiel du LHC a tout juste été effleuré

Le run II ouvre la porte vers un domaine en énergie et en luminosité jamais exploré: tous les coins de l'espace de phase seront passés au crible des analyses et de l'inventivité des physiciens impliqués

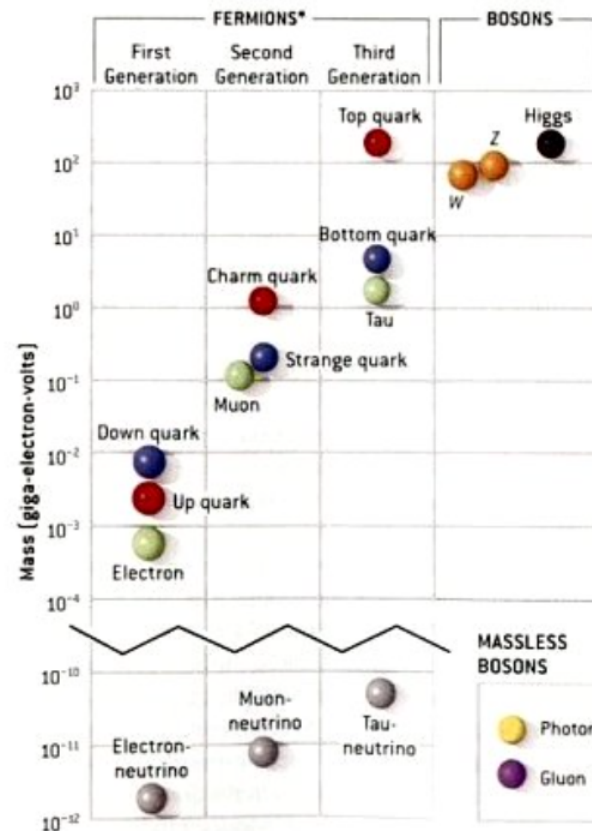
Le HL-LHC a déjà commencé: R&D, discussions, projections de physique

## Après LHC ?

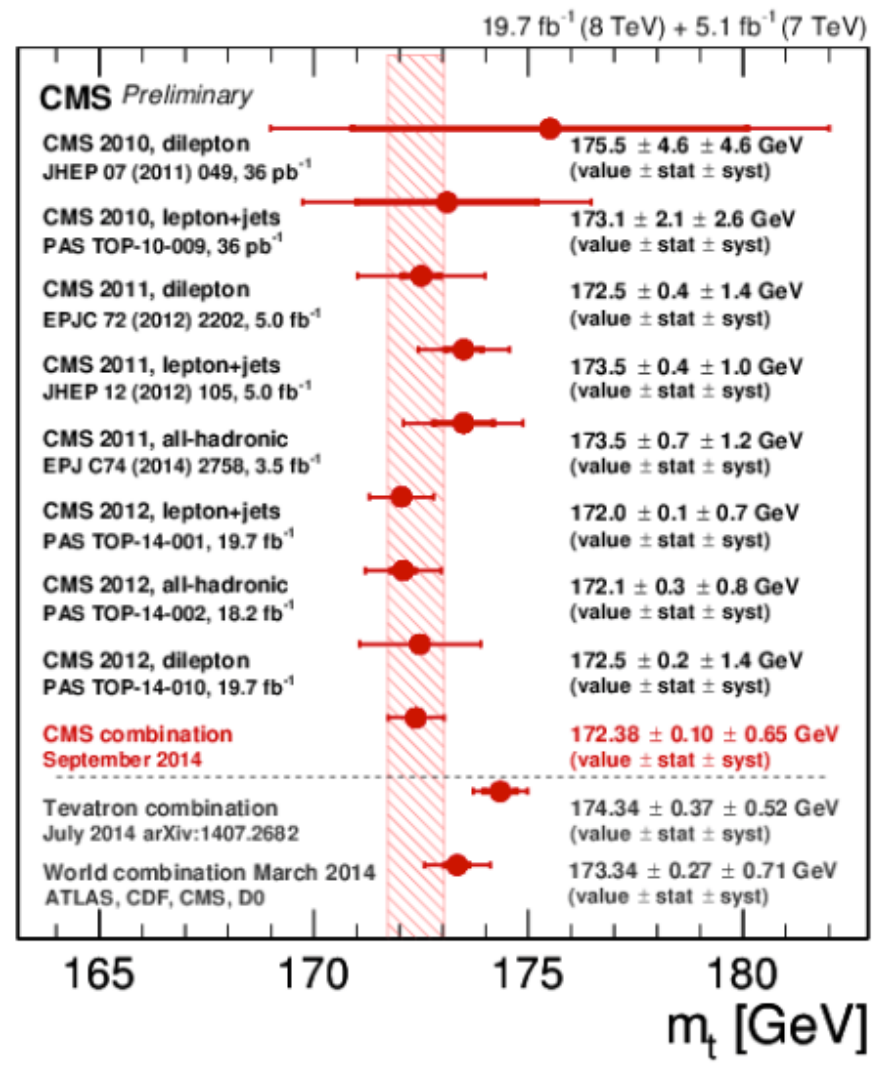
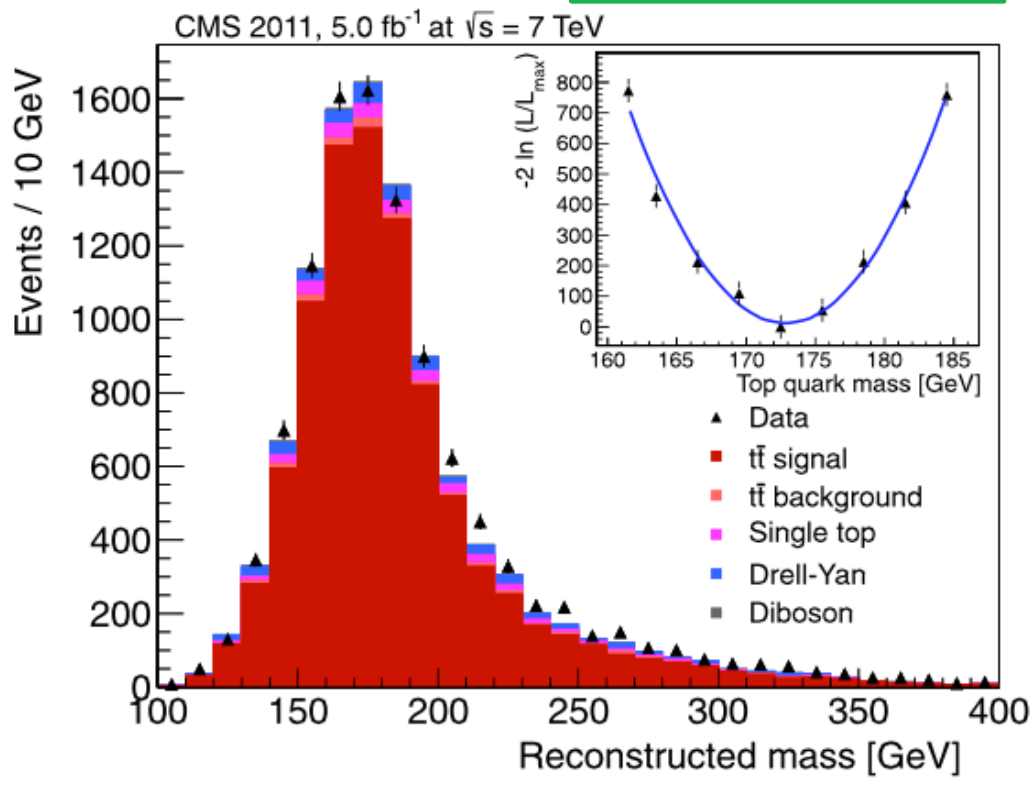
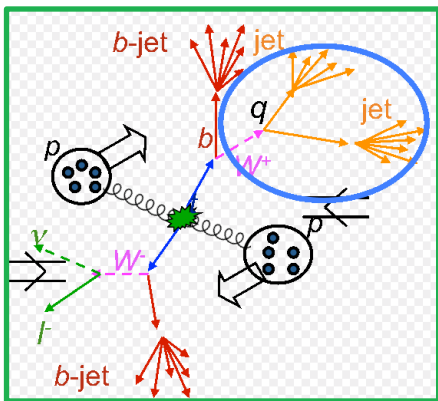
Etudes en cours pour continuer à sonder la structure profonde de la matière et tenter de répondre questions structurelles actuelles.



# Top Quark



# Mass du quark top



# Masse du top et masse du Higgs

