



IN2P3
Les deux infinis



UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

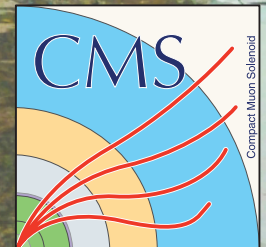
Nouvelles données et performances du détecteur CMS auprès du LHC à 13 TeV

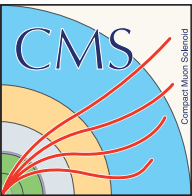
Olivier DAVIGNON pour CMS – France



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

XXIII^{ème} Congrès Général de la SFP
Institut Le Bel, Strasbourg – 24/08/15





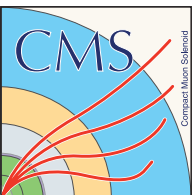
Sommaire

- ▣ **La physique au LHC et le détecteur CMS**
 - ❖ Prises de données au LHC à 7 et 8 TeV (2010-2012)
 - ❖ Description générale de CMS

- ▣ **Résultats marquants à 7 et 8 TeV (Run I)**

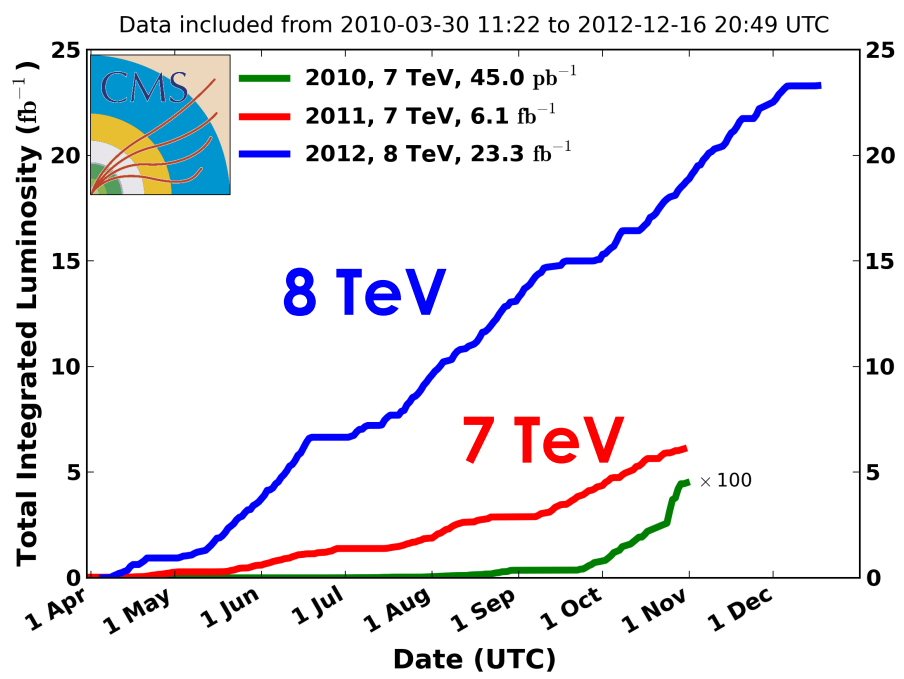
- ▣ **Premiers résultats de physique à 13 TeV (Run II)**
 - ❖ Actualisation des systèmes — Phase 0
 - ❖ Performances du détecteur au redémarrage à 13 TeV
 - ❖ Premiers résultats de physique

- ▣ **Perspectives**

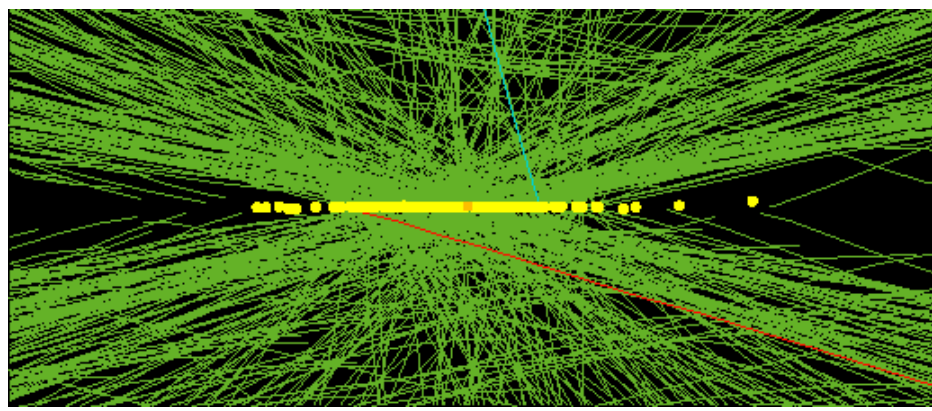
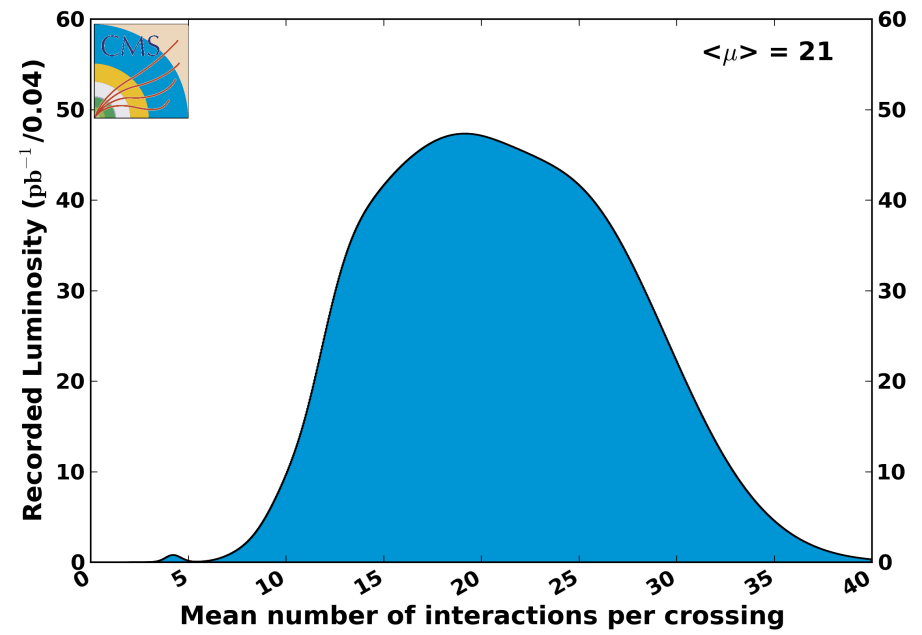


Prises de données au LHC (2010-2012)

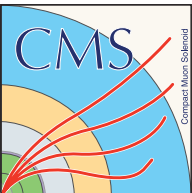
CMS Integrated Luminosity, pp



CMS Average Pileup, pp, 2012, $\sqrt{s} = 8$ TeV



- ▣ **Excellentes performances du LHC et de CMS**
- ▣ **Conséquence de la grande luminosité : collisions multiples par croisement de faisceaux (*pileup*)**



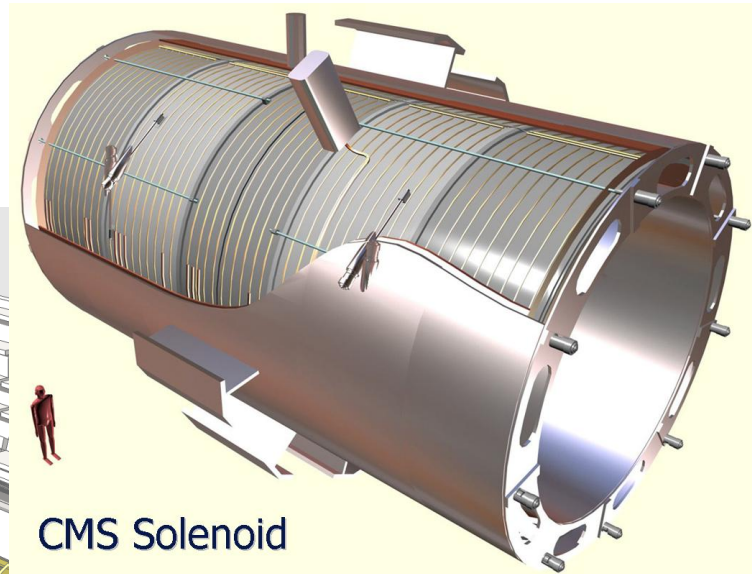
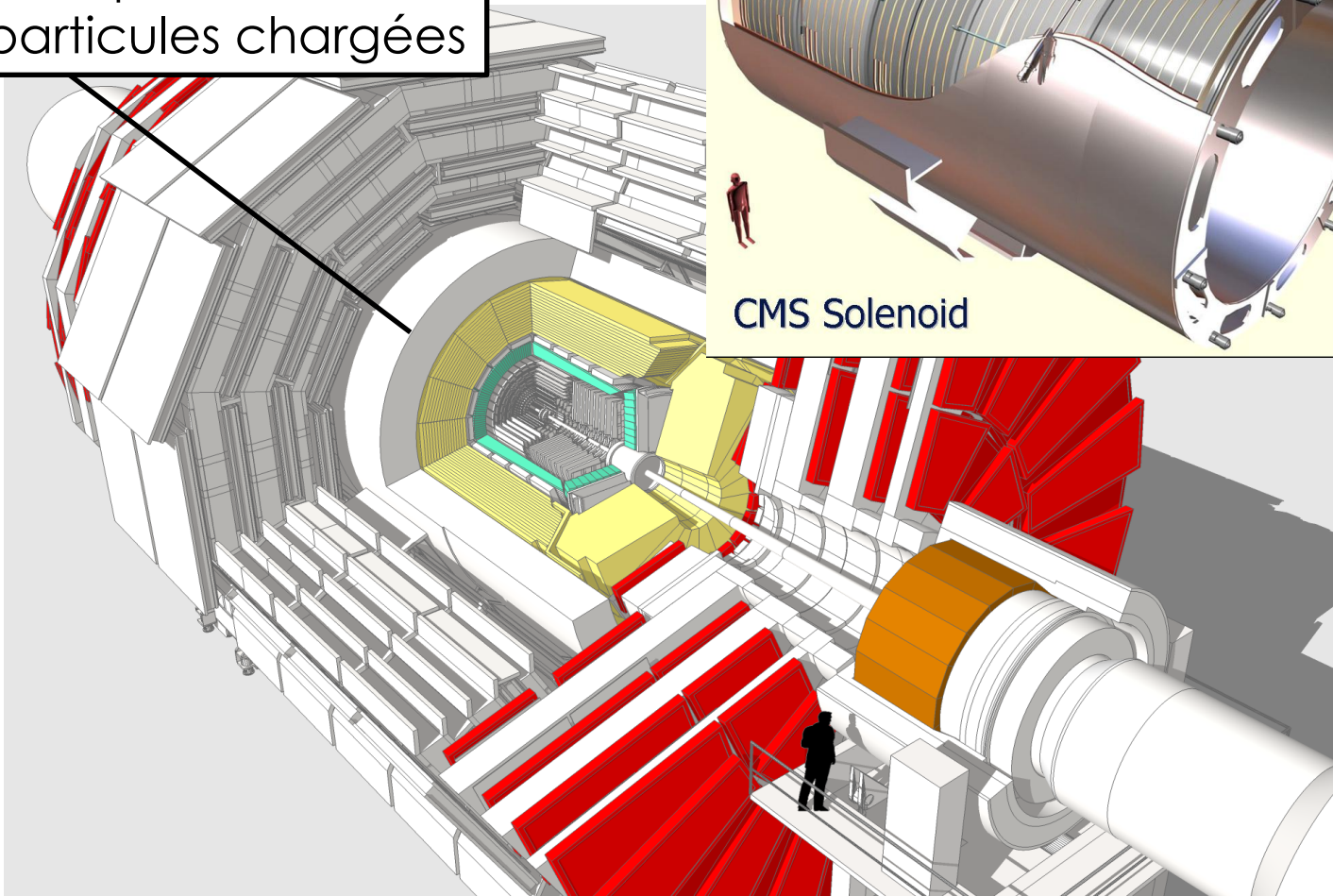
Le détecteur CMS

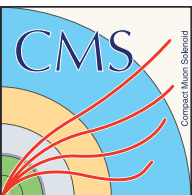
Solenoïde supra-conducteur

Champ magnétique: 3.8 T

→ Détecteur compact

→ Dévier les particules chargées

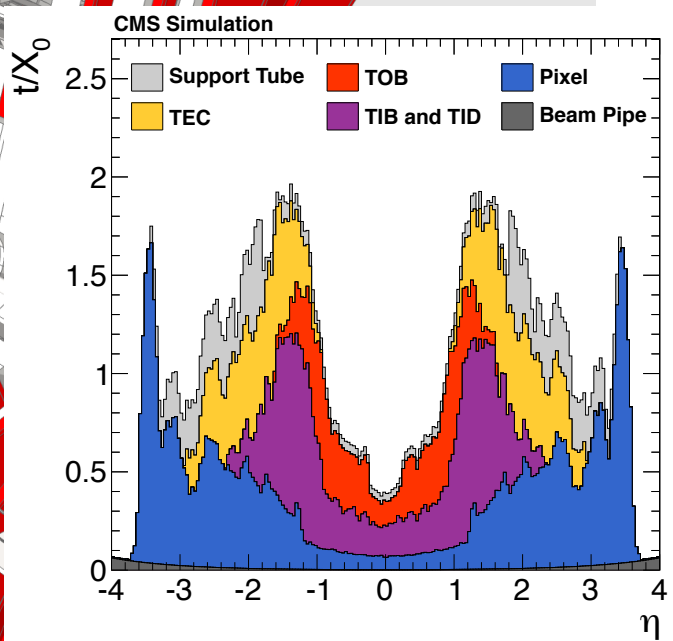
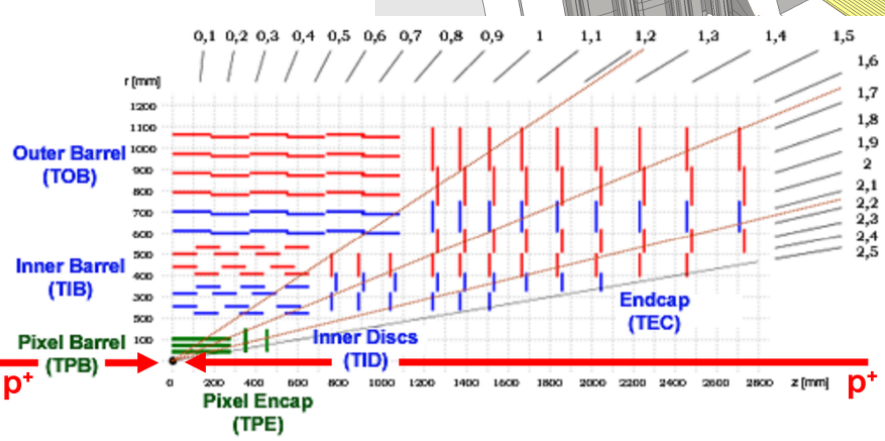
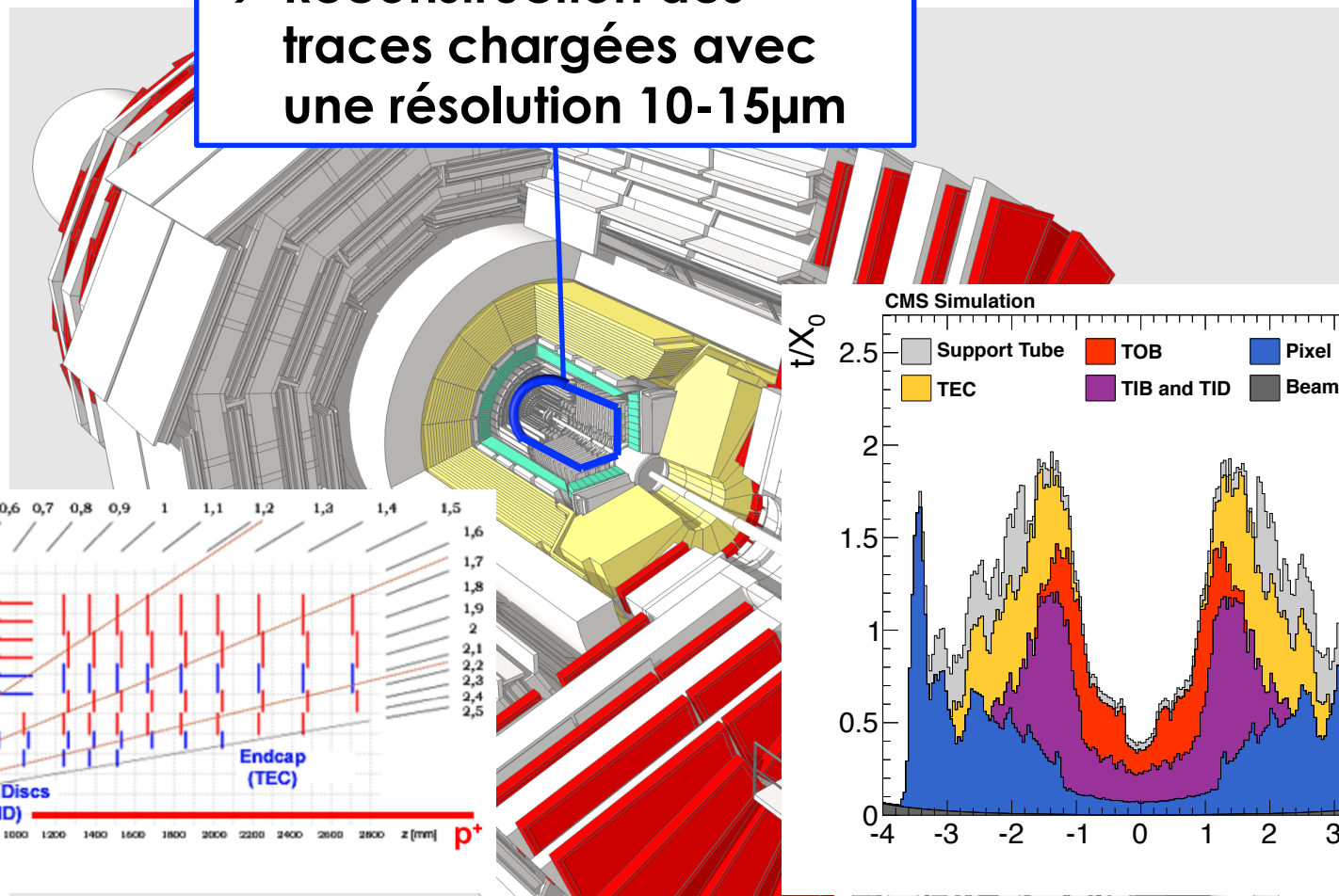


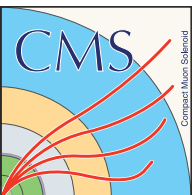


Le détecteur CMS

Trajectographe

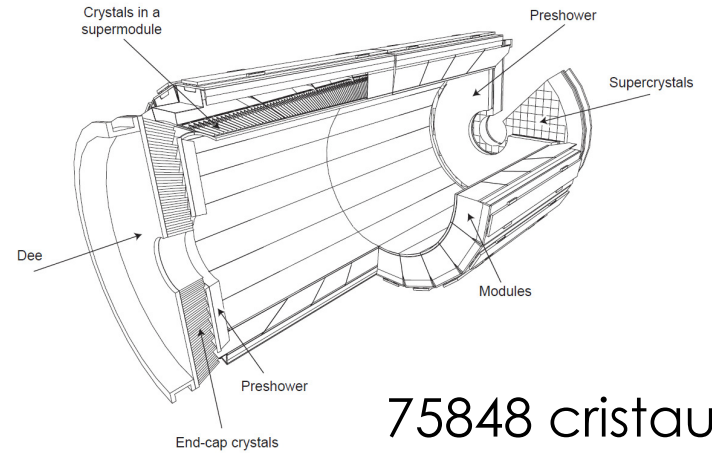
'Pixels' et pistes silicium
 → Reconstruction des traces chargées avec une résolution 10-15 μm





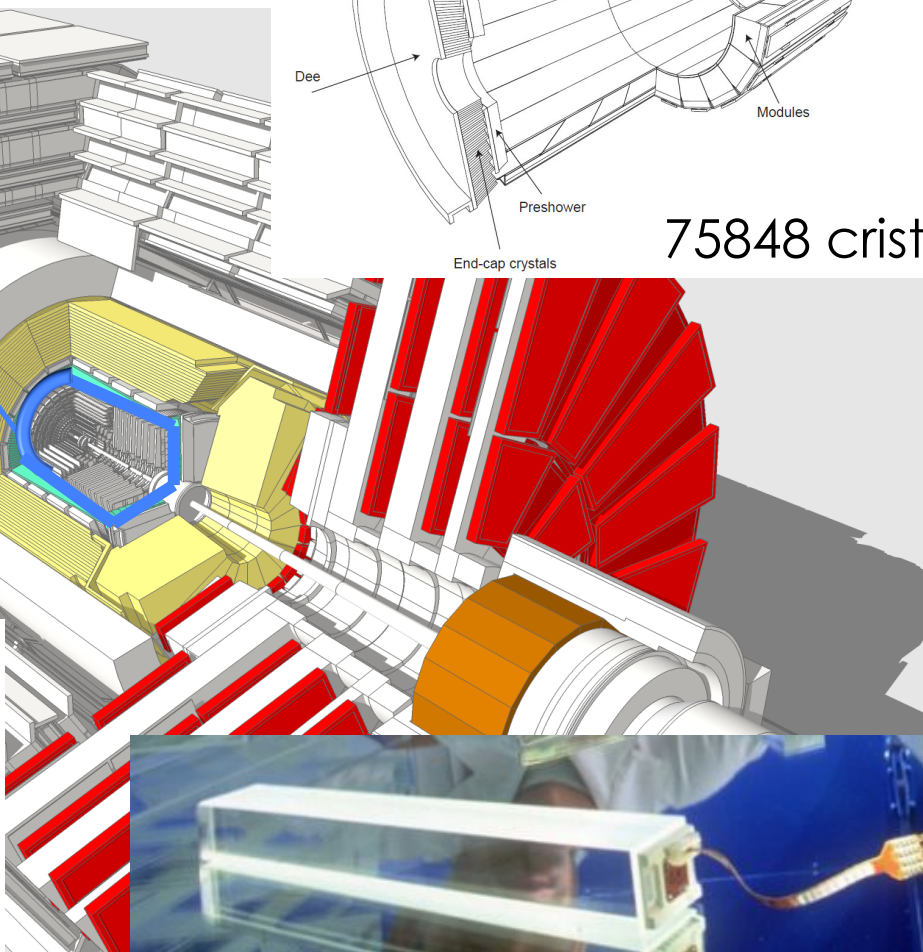
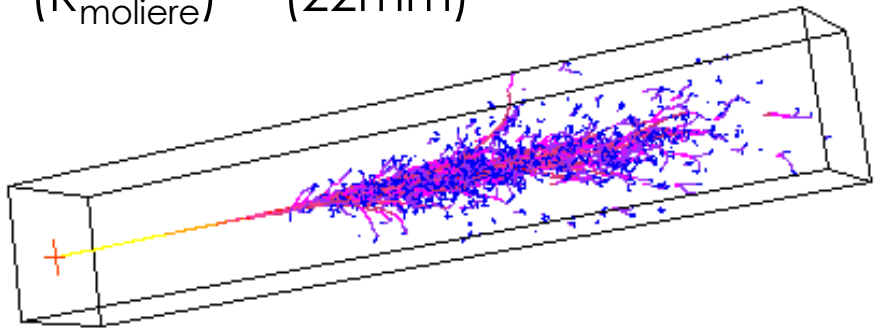
Le détecteur CMS

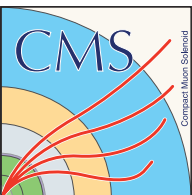
Calorimètre électromagnétique:
calorimètre homogène, cristaux scintillants (PbWO_4)
→ **Reconstruction des électrons et photons**
→ **Résolution excellente en énergie et position**



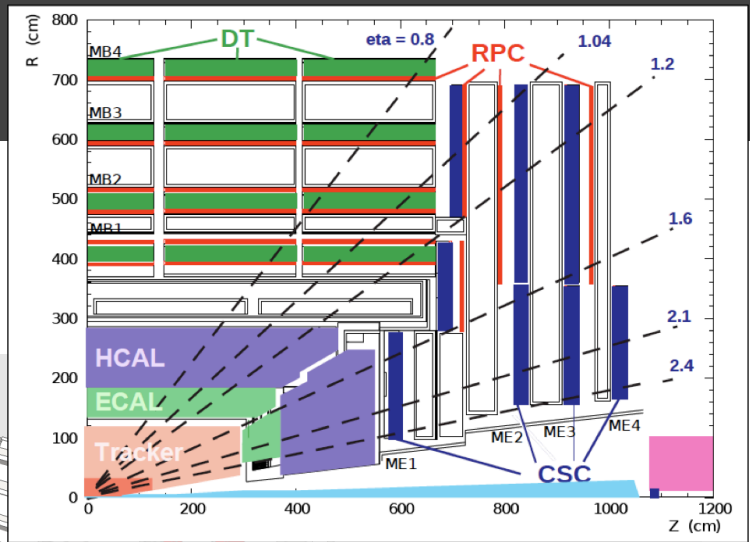
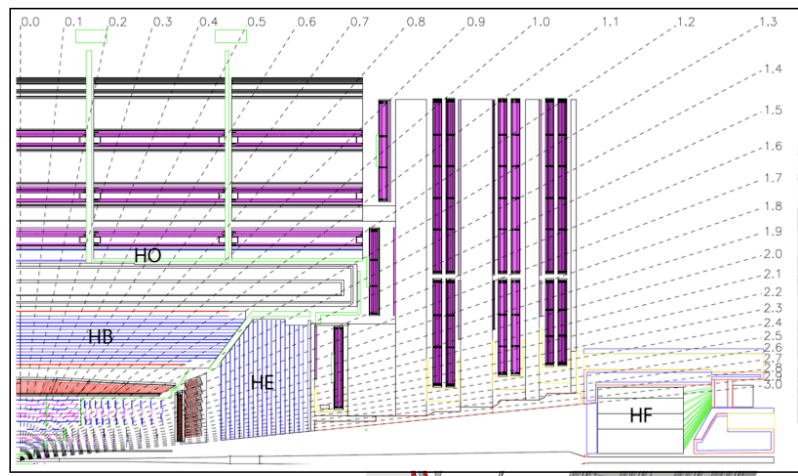
75848 cristaux

$26 X_0 \sim 23 \text{ cm}$
 $(R_{\text{moliere}})^2 \sim (22\text{mm})^2$



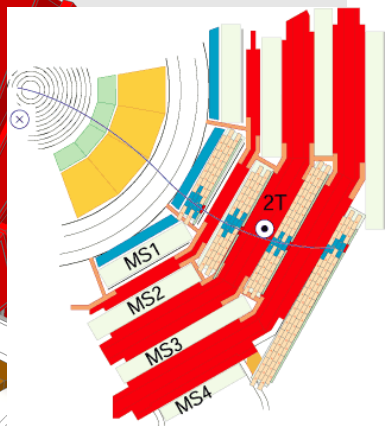


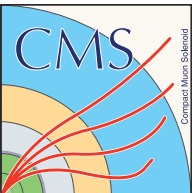
Le détecteur CMS



Calorimètre hadronique :
scintillateurs plastiques
 → Reconstruction des jets hadroniques (composantes chargées et neutres)

Chambres à muons
 Dans le retour de fer
 → Reconstruction des muons





Le détecteur CMS

Détecteur compact et hermétique : énergie transverse manquante mesurée (par exemple due à la présence de neutrinos)

$$E_T^{\text{Miss}} = -\sum p_T^{\text{vis}}$$

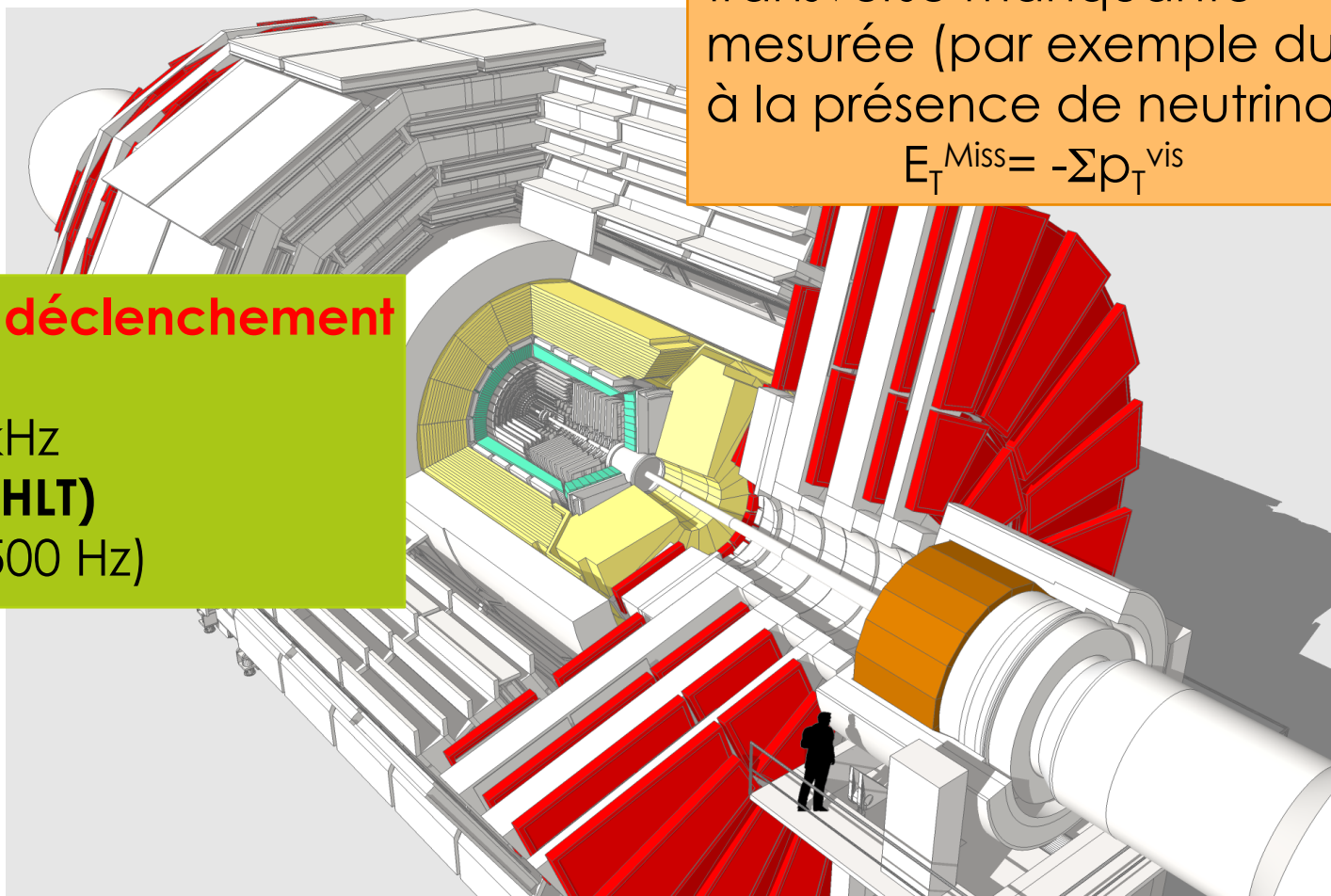
2 niveaux de déclenchement

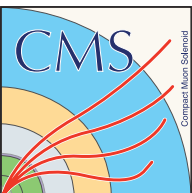
Niveau 1 (L1)

40 MHz → 100 kHz

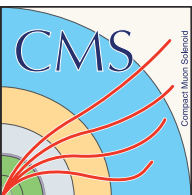
Haut niveau (HLT)

100 kHz → O(500 Hz)



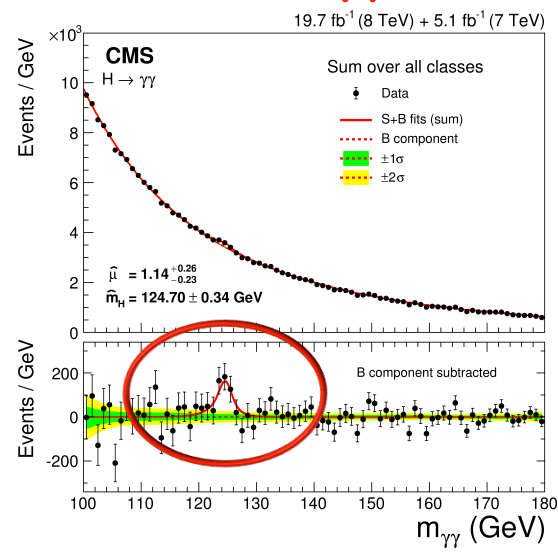


Résultats marquants du Run I

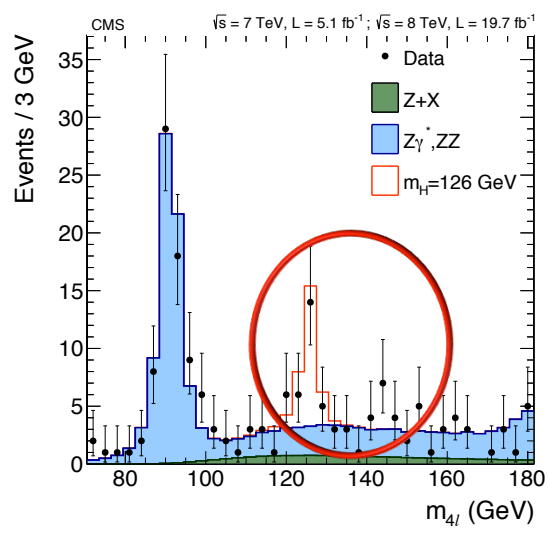


Canaux les plus sensibles dans la recherche du boson de Higgs

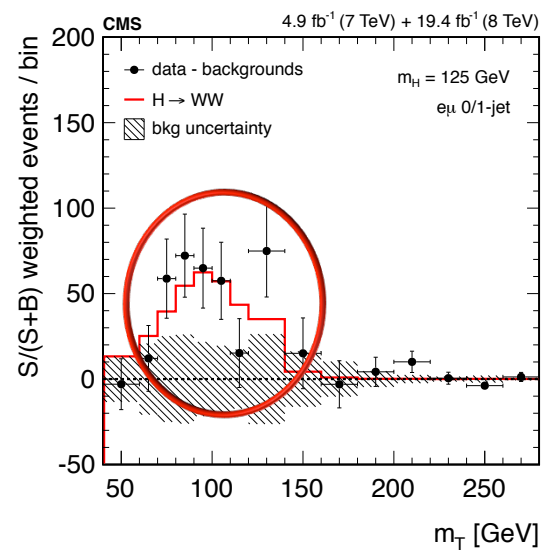
$H \rightarrow \gamma\gamma$



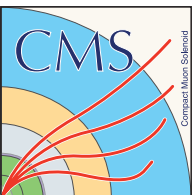
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4$ leptons



$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$

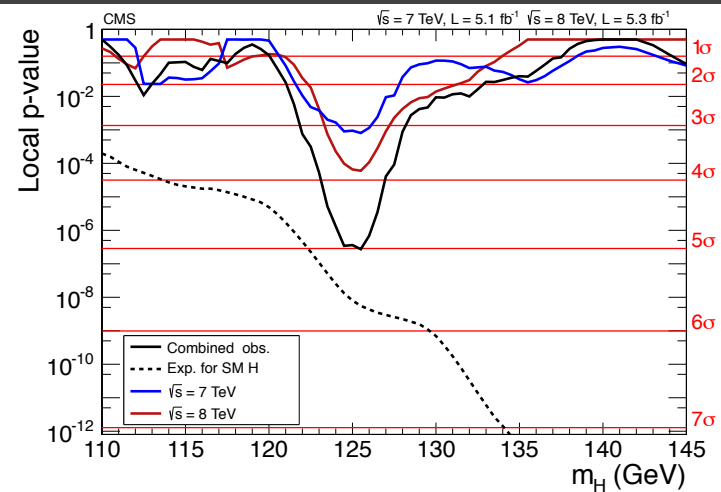


+ $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow bb$

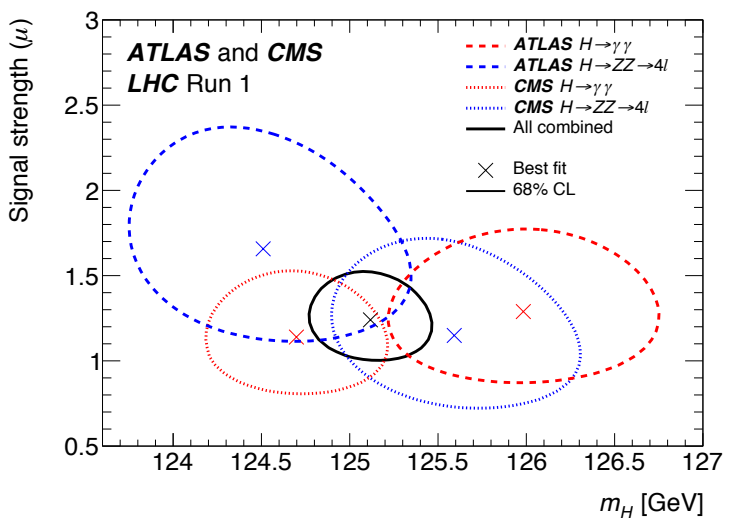


Découverte d'un boson de Higgs

- Mise en évidence d'une **nouvelle résonance**, avec un seuil $> 5\sigma$
 - ❖ Couple aux bosons W et Z
 - ❖ Couple aux fermions
 - ❖ Couple (indirectement) aux photons
- **Premier boson scalaire découvert dans la Nature. Pièce centrale de l'Univers tel que nous le connaissons. Propriétés mesurées :**

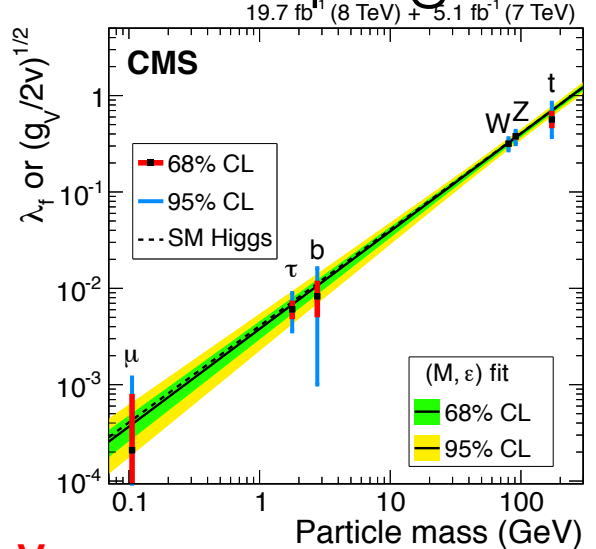


Masse

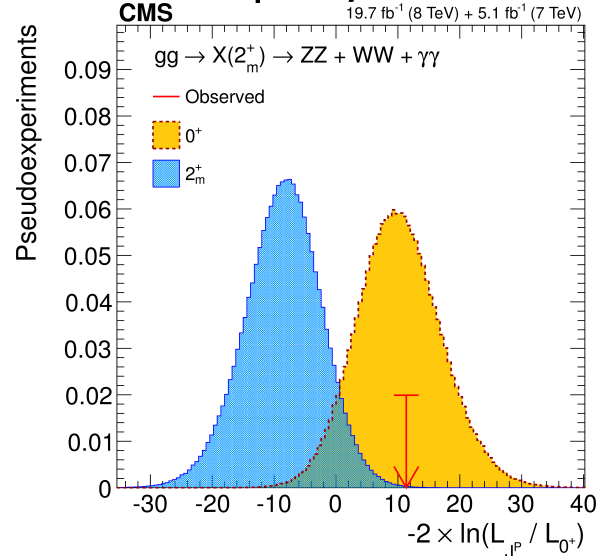


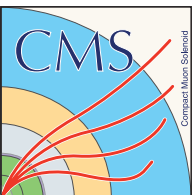
$125.09 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.}) \text{ GeV}$

Couplages



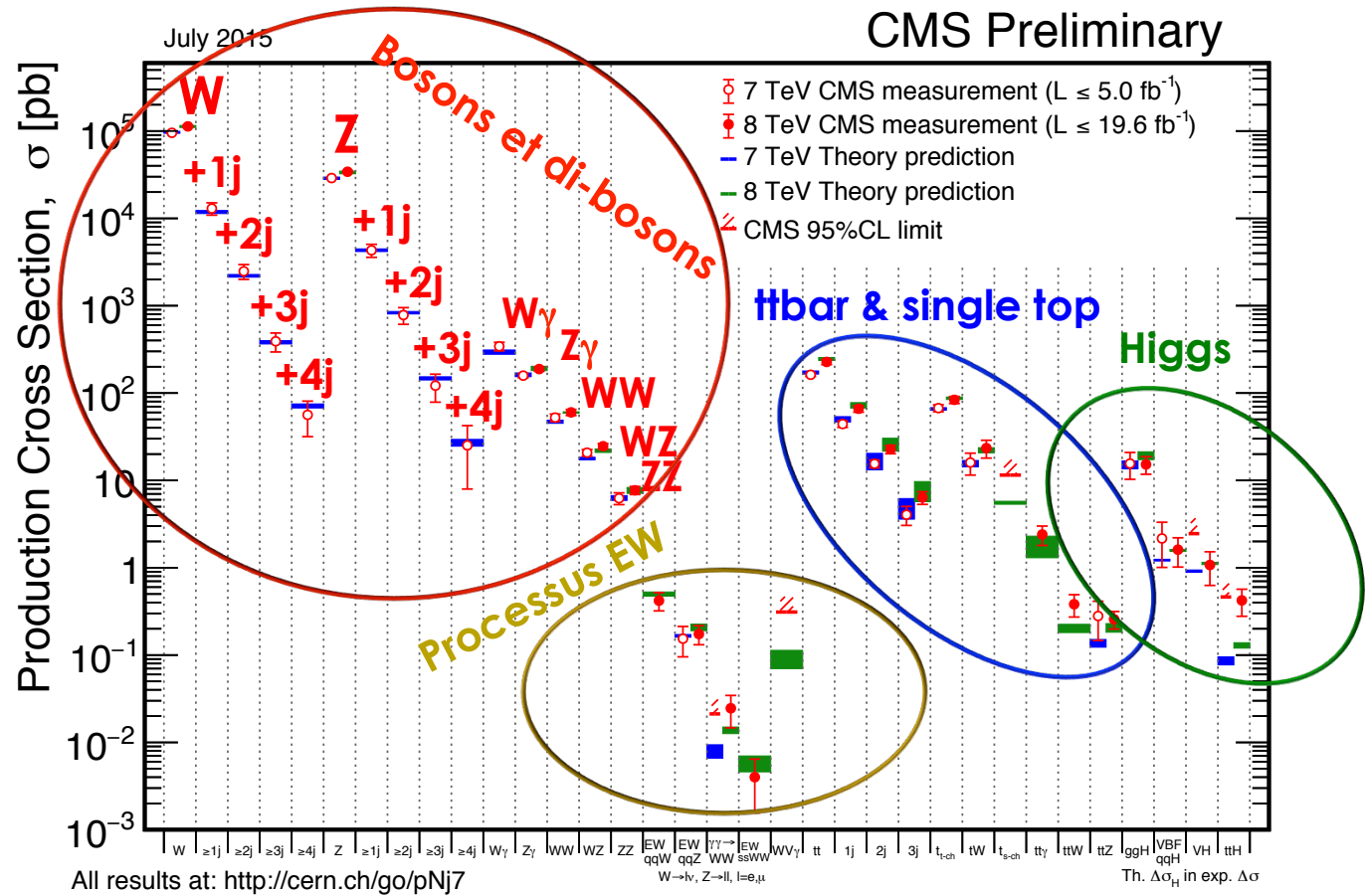
Spin/CP



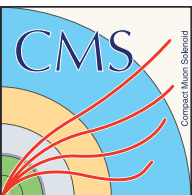


Chandelles standard

Section efficaces de processus connus du Modèle Standard

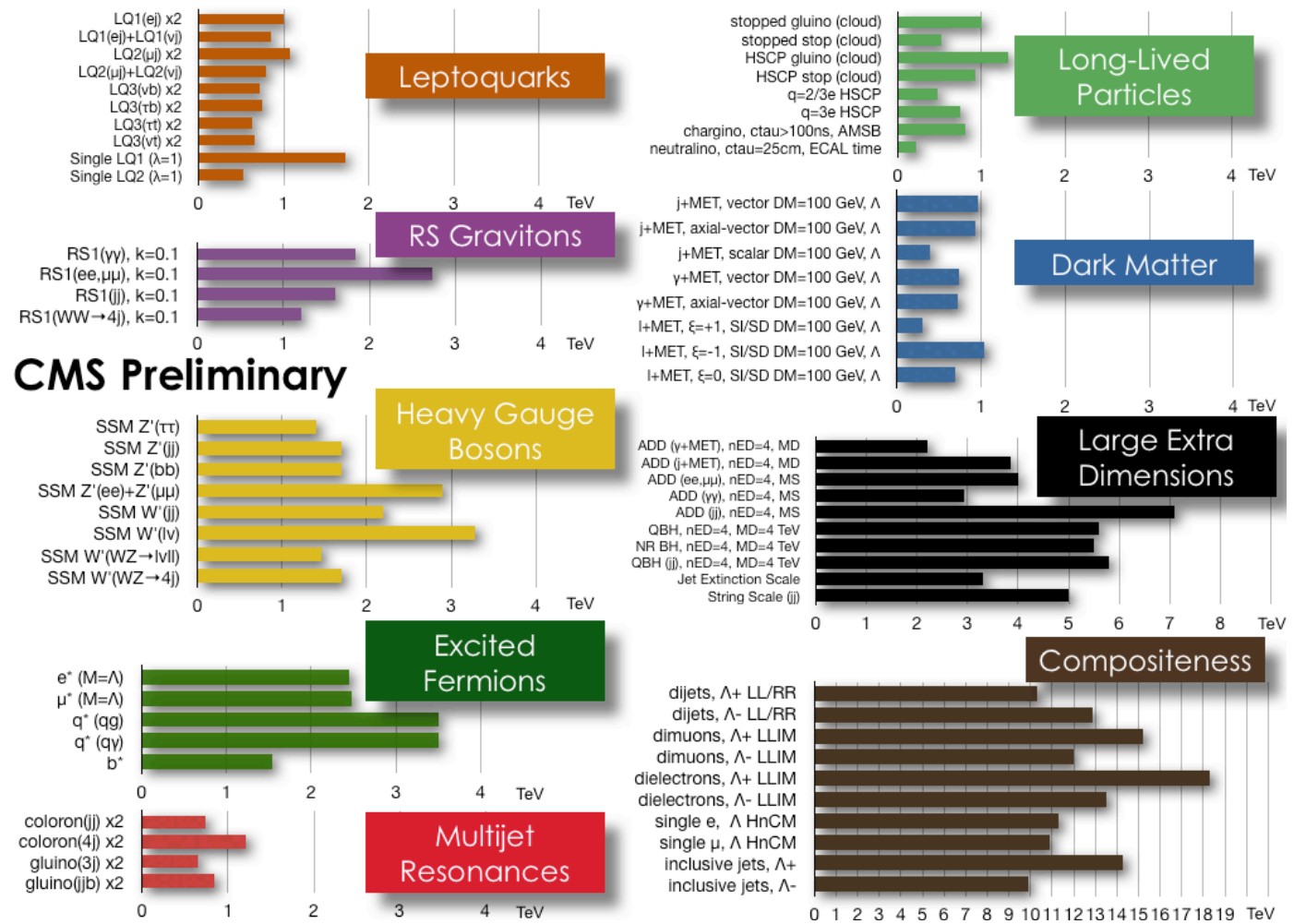


→ Validation impressionnante des riches prédictions du Modèle Standard à des énergies jusque là inégalées

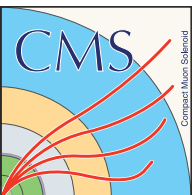


Recherche de nouvelle physique

- ▣ Recherche **directe** de nouvelle physique
- ➔ Production de nouvelles particules

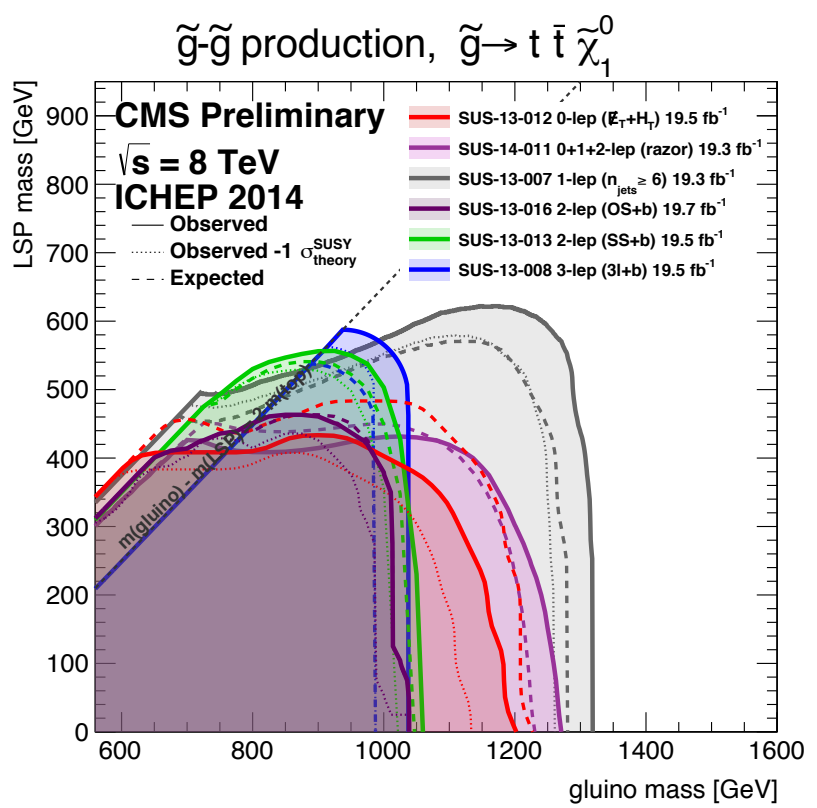


CMS Preliminary



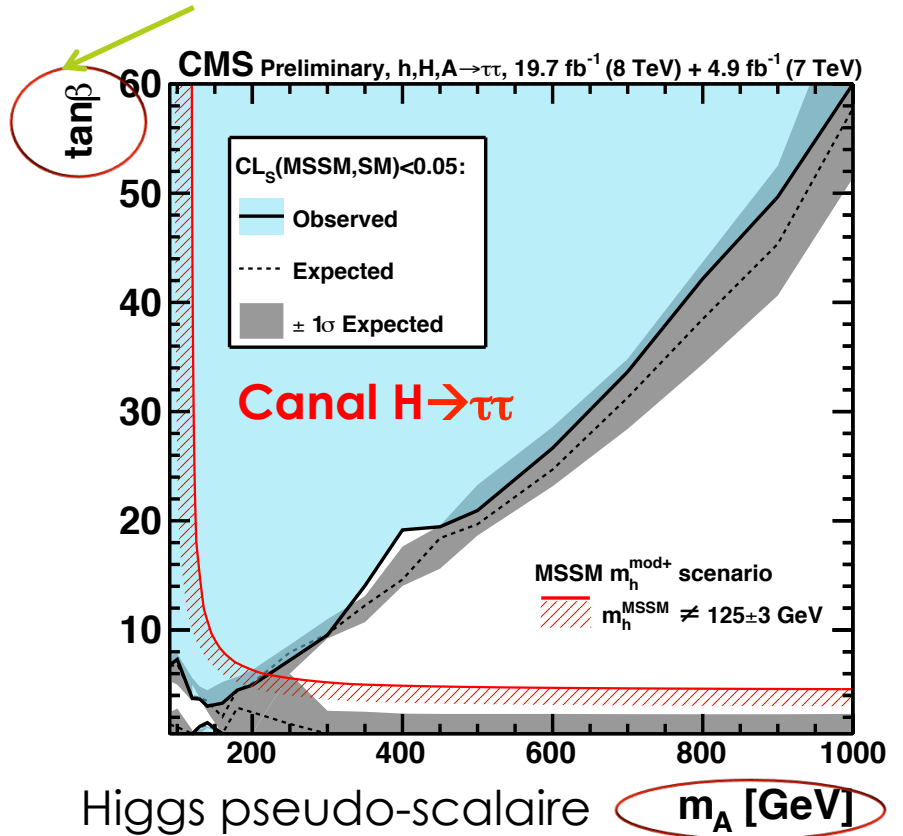
Recherche de la supersymétrie (SUSY)

Recherche de gluinos

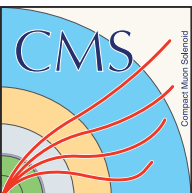


- Exclusion d'une partie du plan masse du gluino / masse de la particule la plus légère

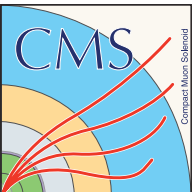
Secteur scalaire étendu : 2 v.e.v. + 5 bosons de Higgs



- Contraintes sur les extensions du modèle standard (tel que MSSM)

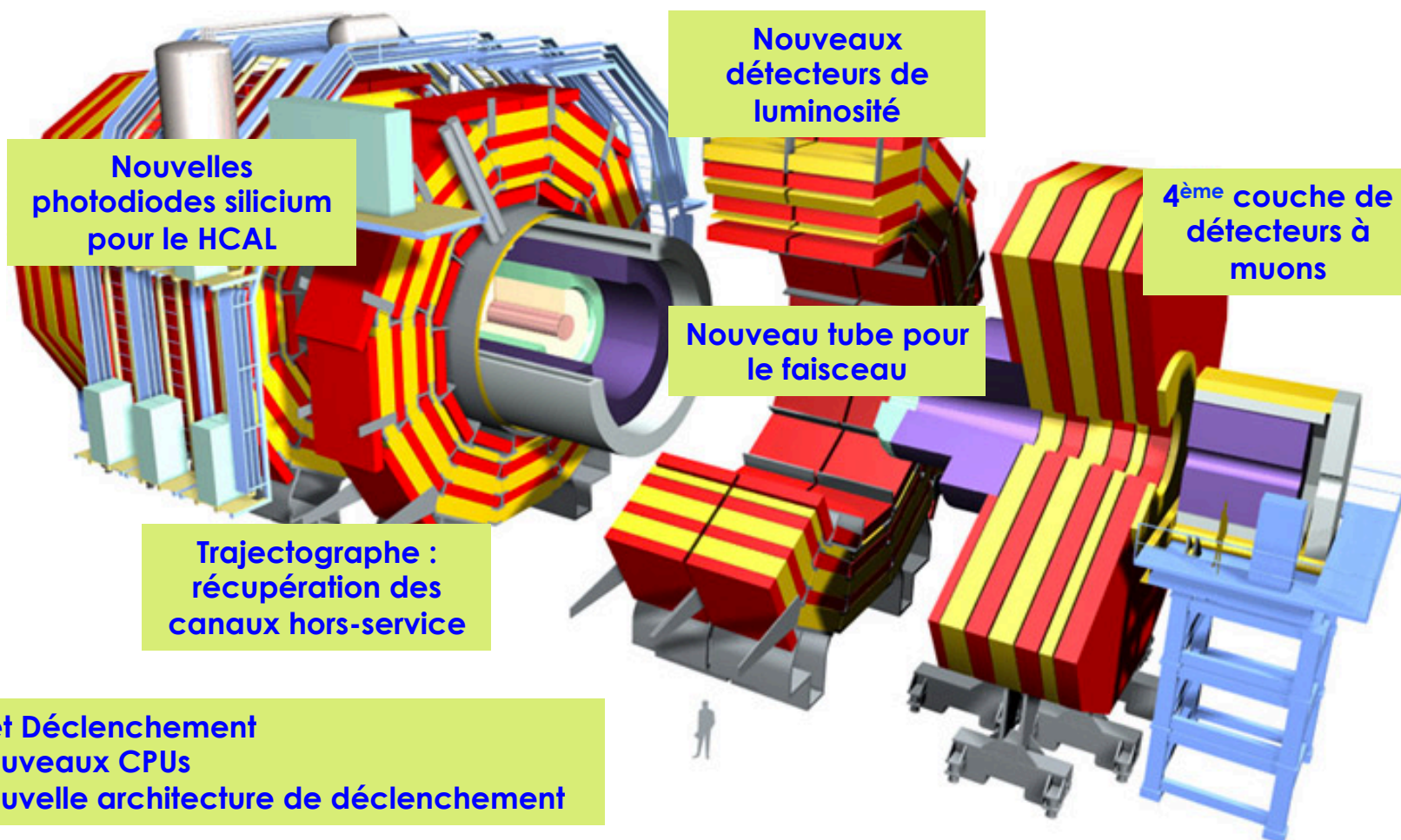


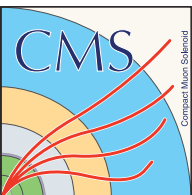
Résultats de physique à 13 TeV



Mise-à-jour de CMS

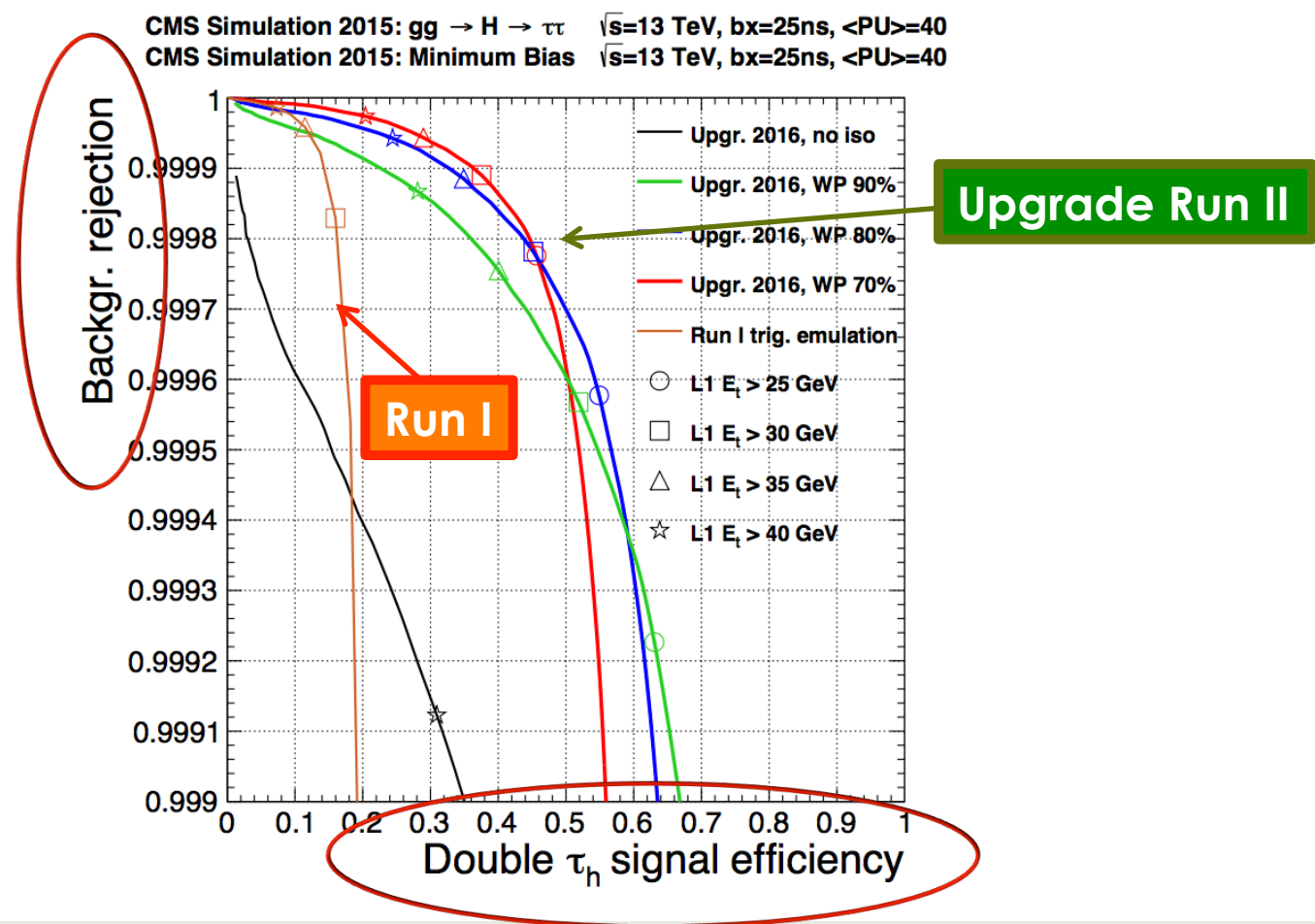
- **Mise-à-jour / remplacement de certains systèmes nécessaires pour la prise de données à plus haute luminosité**

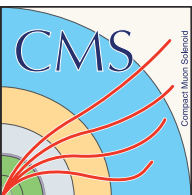




Mise-à-jour du trigger de τ de CMS

- Refonte de la stratégie de déclenchement sur les leptons tau au niveau 1
- ➔ Performances permettant de maîtriser le taux de déclenchement à grand efficacité de sélection des τ_h



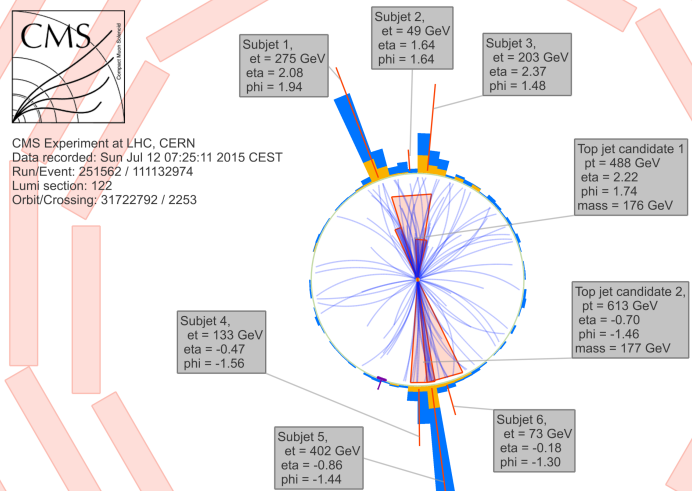


Des collisions à 13 TeV !

Le LHC a commencé les collisions à 13 TeV le 3 juin 2015

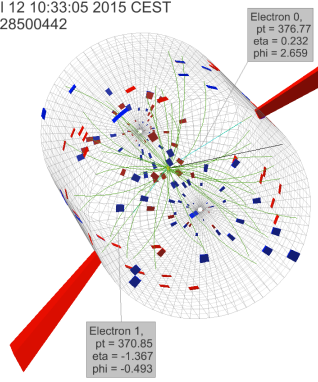


Candidat top-antitop

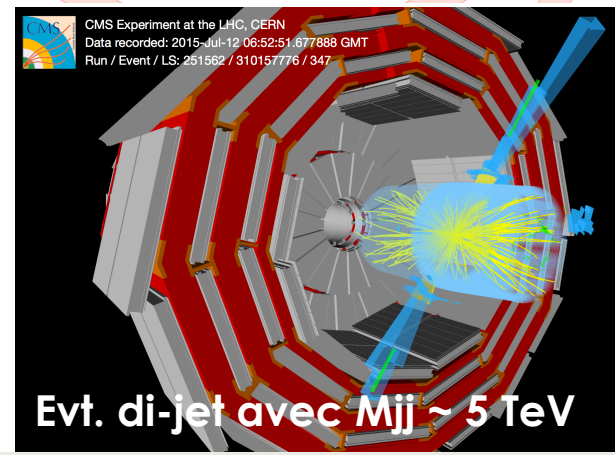
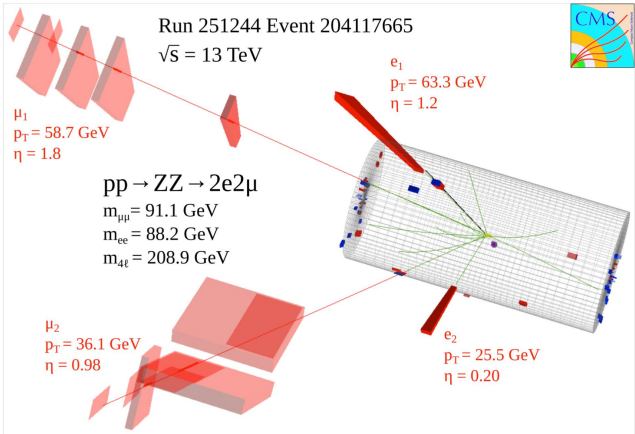


Evènement di-electron $M_{ee} \sim 999 \text{ GeV} !$

CMS Experiment at LHC, CERN
 Data recorded: Sun Jul 12 10:33:05 2015 CEST
 Run/Event: 251562 / 528500442
 Lumi section: 605

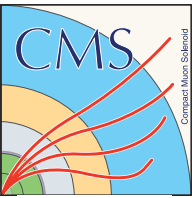


Candidat ZZ → 4 leptons



Evt. di-jet avec $M_{jj} \sim 5 \text{ TeV}$

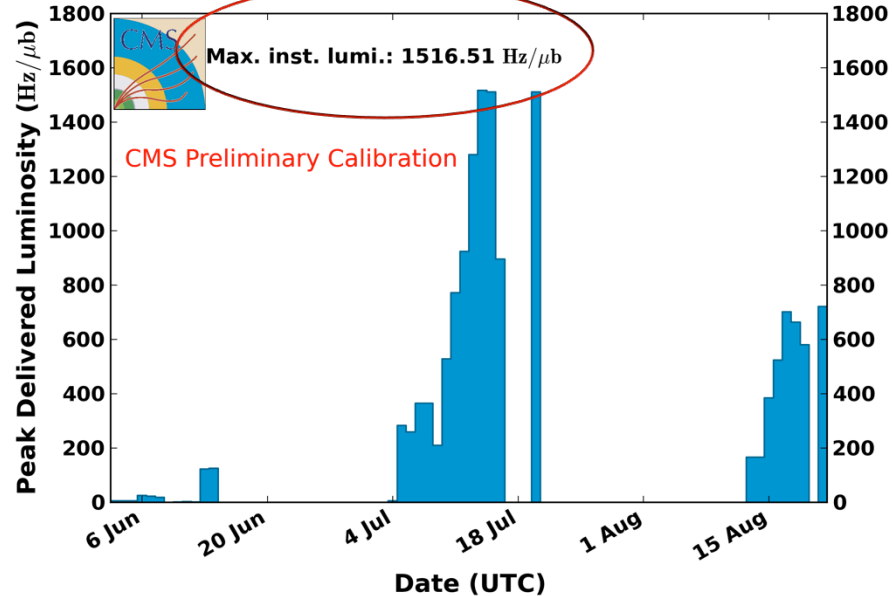




Performances LHC+CMS au redémarrage

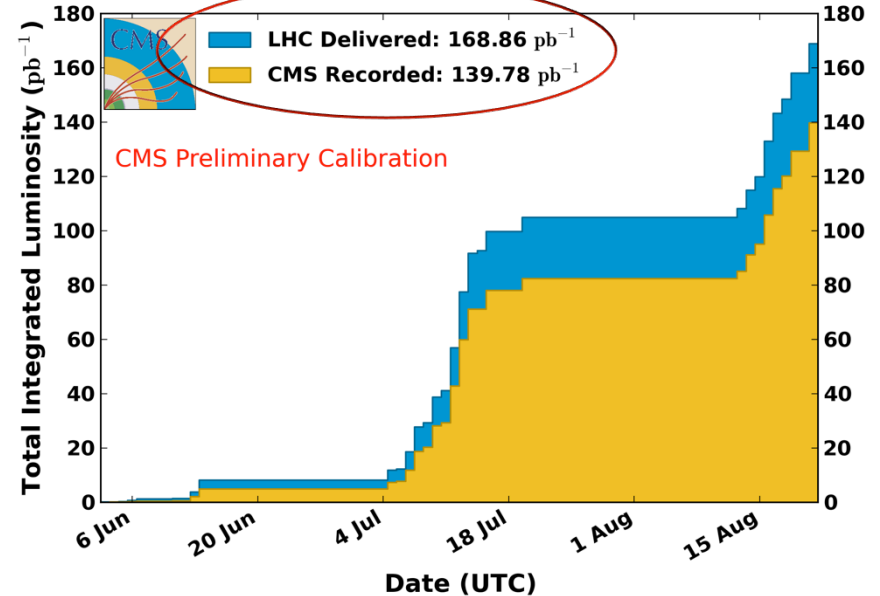
CMS Peak Luminosity Per Day, pp, 2015, $\sqrt{s} = 13$ TeV

Data included from 2015-06-03 08:41 to 2015-08-21 09:54 UTC



CMS Integrated Luminosity, pp, 2015, $\sqrt{s} = 13$ TeV

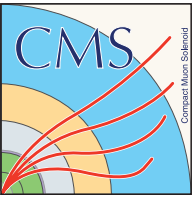
Data included from 2015-06-03 08:41 to 2015-08-21 09:54 UTC



Paramètres du LHC

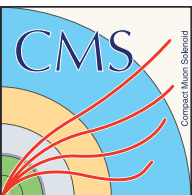
Energie des faisceaux	6.5 + 6.5 TeV (7+7 TeV nominal)
Nombre de paquets	~600 (2000 nominal)
Espacement en temps	25-50 ns
Luminosité pic	~1.517 pb $^{-1}$ s $^{-1}$

- Les **résultats** montrés ici sont basés sur une **luminosité intégrée** ≤ 40 pb $^{-1}$ (~3 fois plus de statistique a été intégrée depuis)



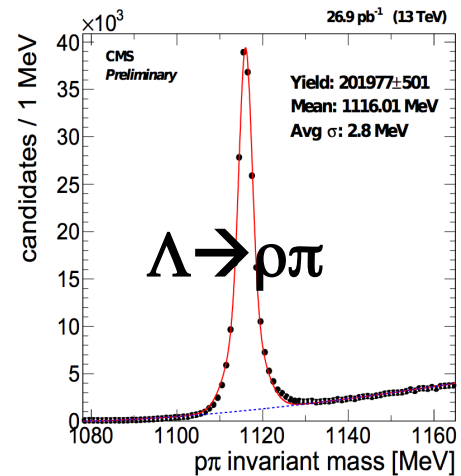
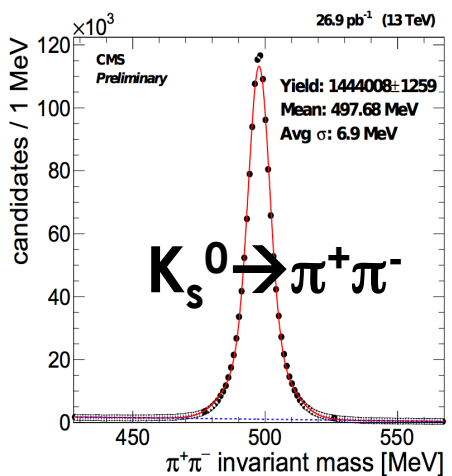
Le refroidissement de l'aimant de CMS

- **Après l'arrêt du LHC en 2013-2014, le redémarrage de l'aimant supraconducteur de CMS a été compliqué par un problème sur le système de refroidissement à Hélium liquide.**
- **Ces retards sur les opérations du système de cryogénie sont dus à un problème dans l'étanchéité des compresseurs utilisés pour mettre l'Hélium (chaud) sous pression.**
- **Au moment où je parle, l'aimant peut être utilisé, mais ses opérations sont limités dans le temps due à une maintenance qui doit être fréquente.**
- **Un programme complet est entrepris pour ré-établir les conditions de fonctionnement nominales. Ces activités sur le système de cryogénie vont être synchronisées avec le programme de l'accélérateur afin de permettre des prises de données les plus longues possibles.**
- **Un programme de consolidation et de réparation est mis en place et devrait avoir lieu dans les prochaines semaines et à la fin de l'année (maintenance régulière de quelques mois)**

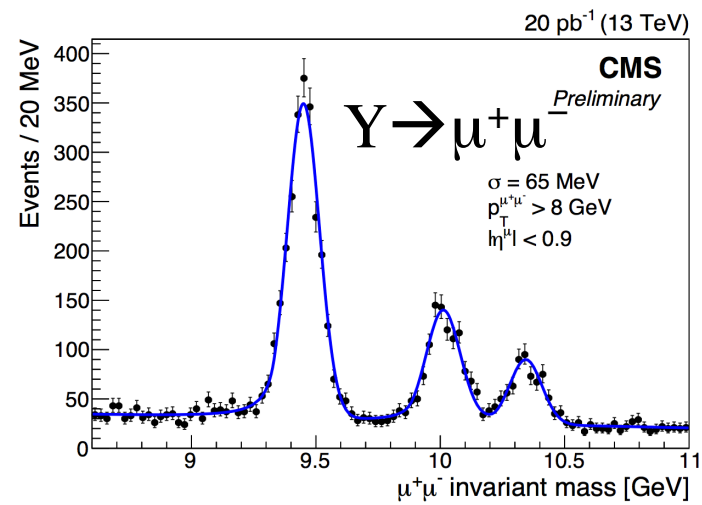


Performances : mesure de résonances connues

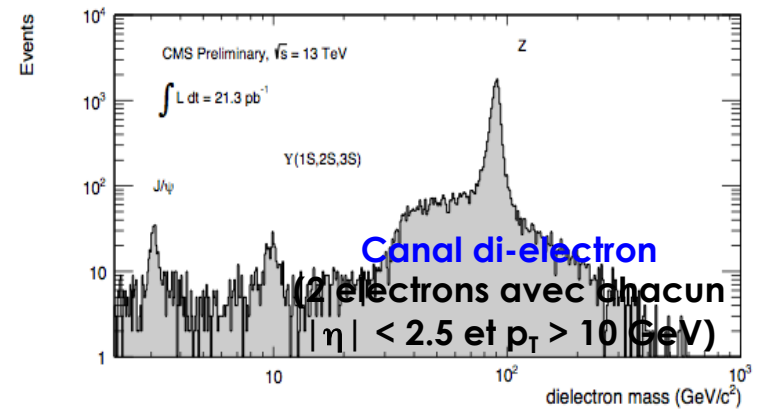
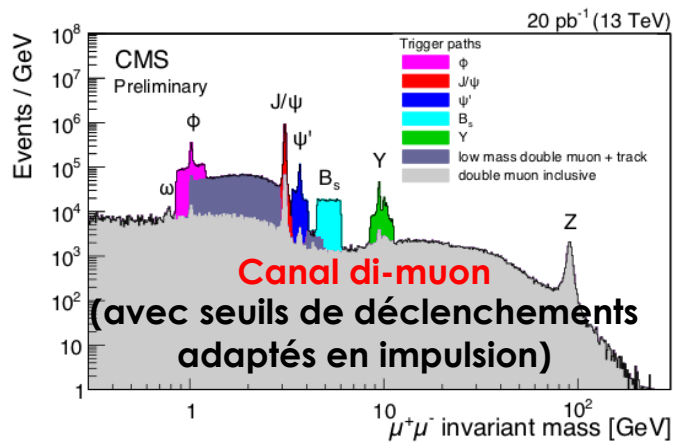
Reconstruction des K_s^0 et des Λ

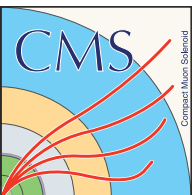


Reconstruction des $Y(nS)$

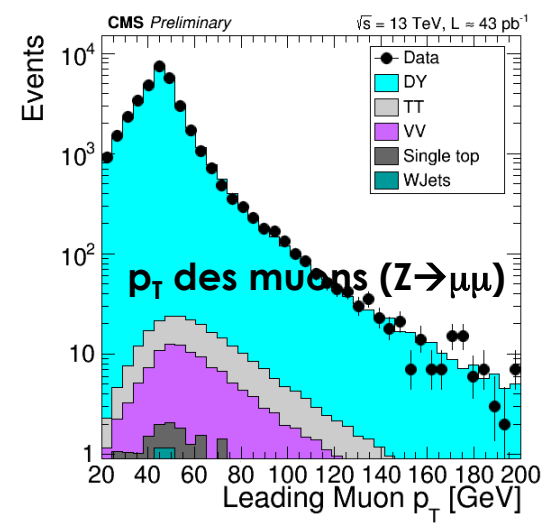
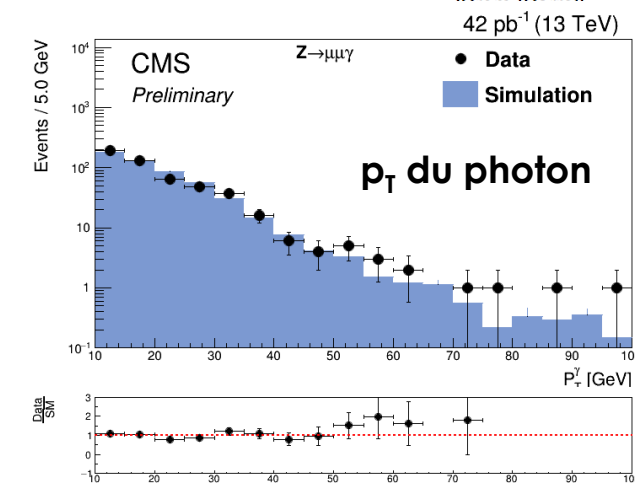
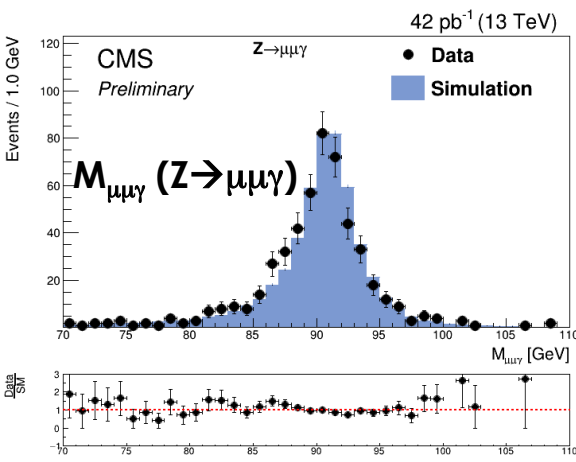
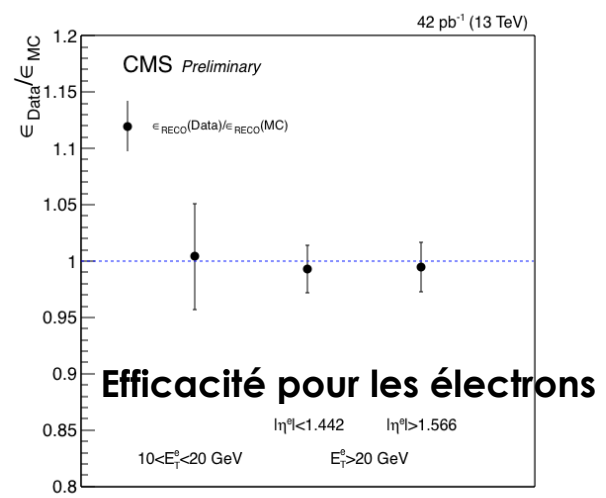
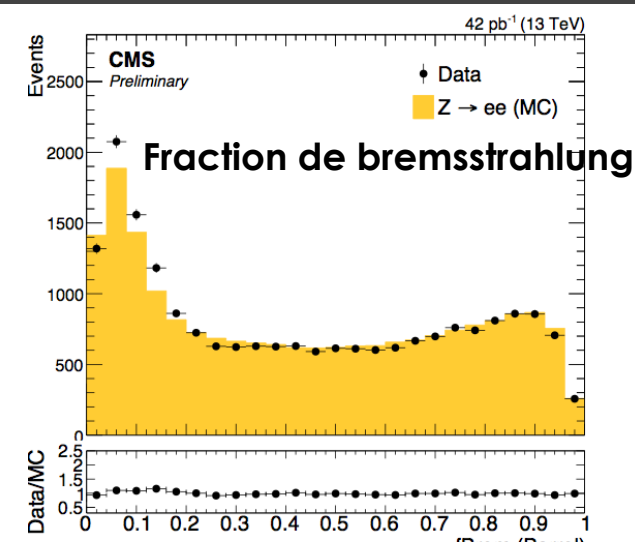
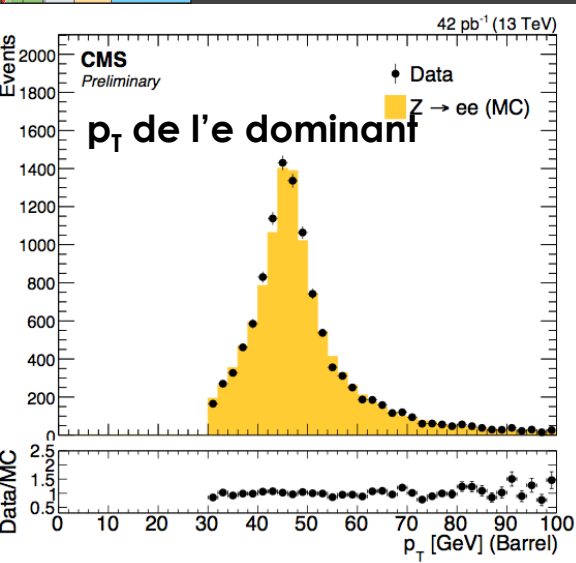


Chandelles standard

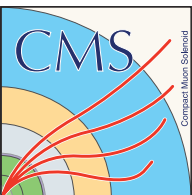




Comparaison à la simulation (e/γ/μ)

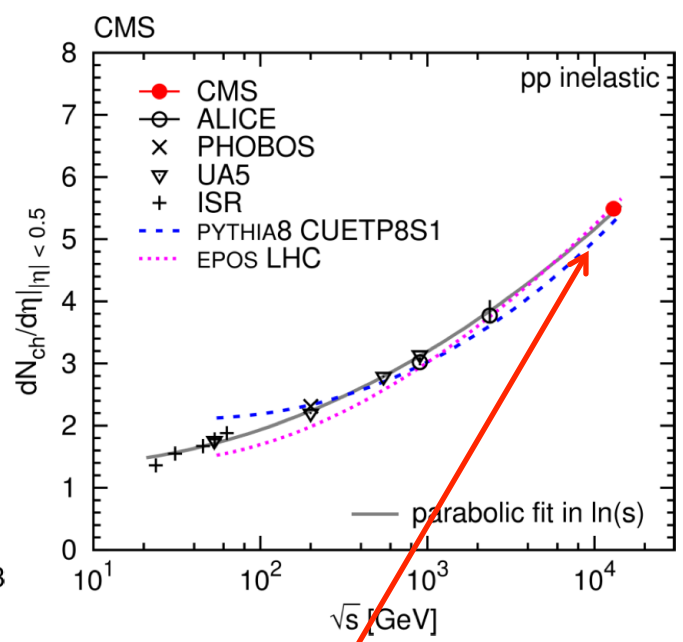
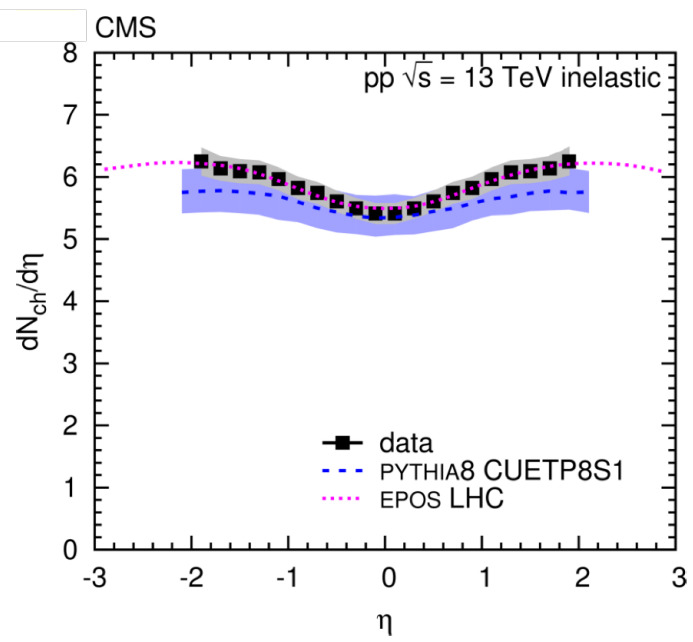


→ le détecteur fonctionne bien et la simulation est en accord avec les données



Multiplicité de hadrons chargés

■ **Mesure permettant de contraindre les simulations** – évènement sous-jacent, empilement et interactions multiples des protons

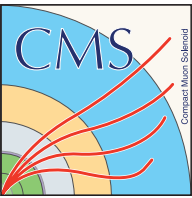


Premier papier du LHC Run II

❖ Première mesure de la multiplicité moyenne de hadrons chargés
 → **Données en accord avec la simulation** (PYTHIA et EPOS LHC)

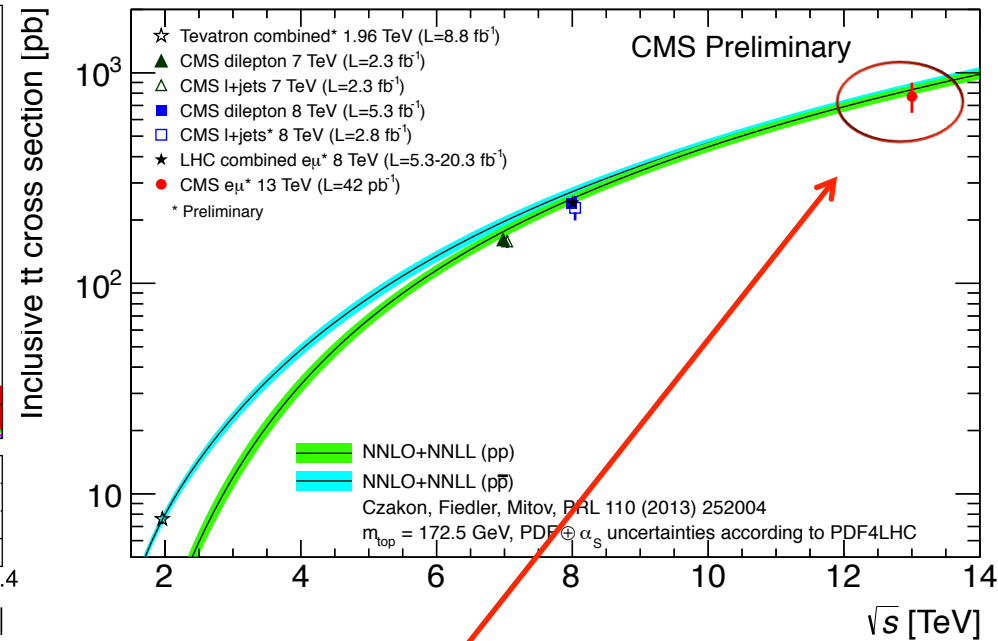
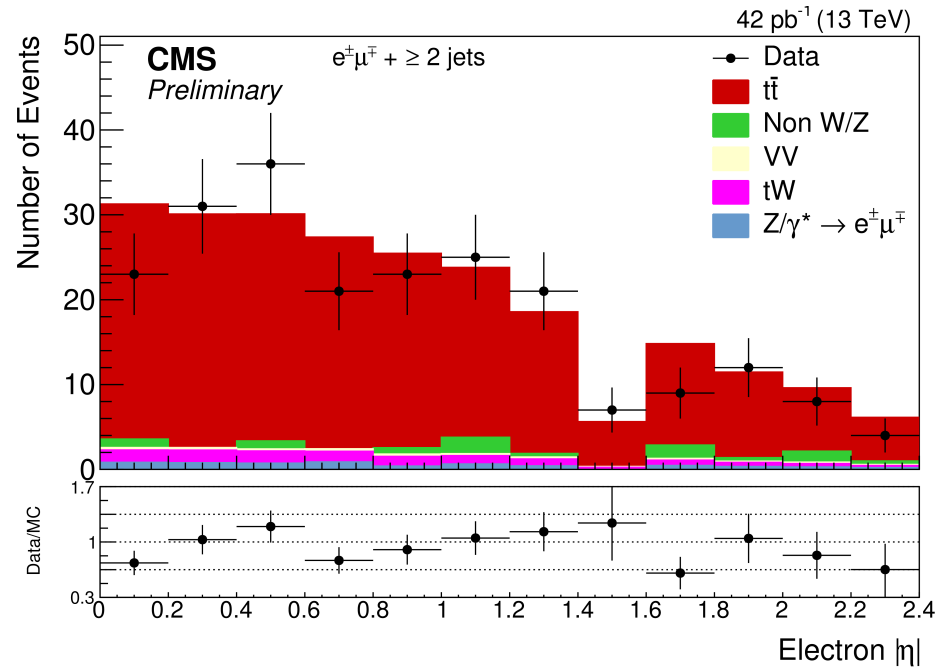
13 TeV !

❖ $dN_{ch}/d\eta |_{|\eta| < 0.5} = 5.49 \pm 0.01 \text{ (stat)} \pm 0.17 \text{ (syst)}$



Section efficace $t\bar{t}$

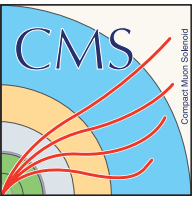
- 1^{ère} mesure à CMS de la **section efficace de production de paires $t\bar{t}$** à 13 TeV
- Canal: $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow e\nu_e b + \mu\nu_\mu b$



❖ Mesure obtenue après estimation de l'acceptance et de l'efficacité de sélection

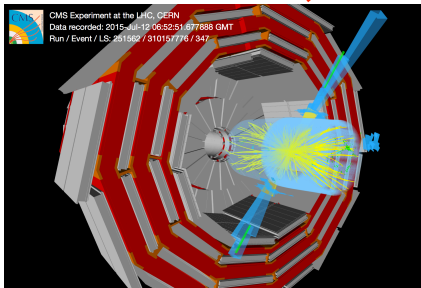
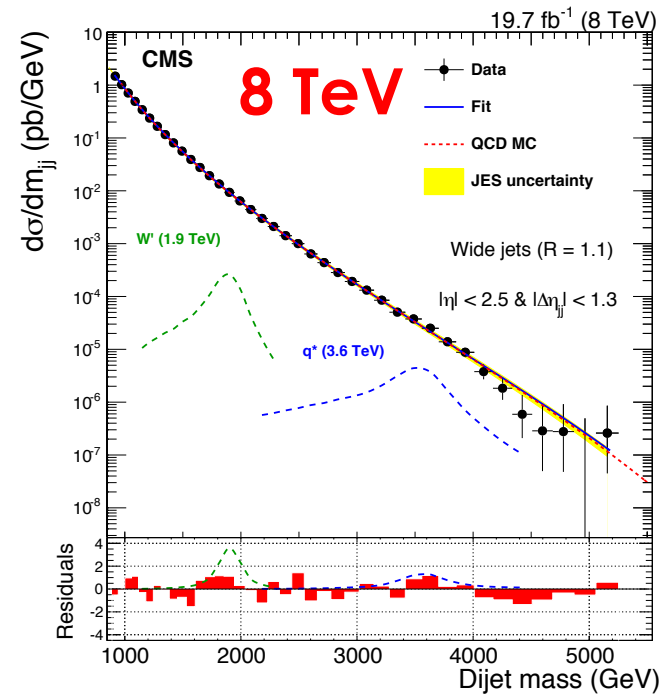
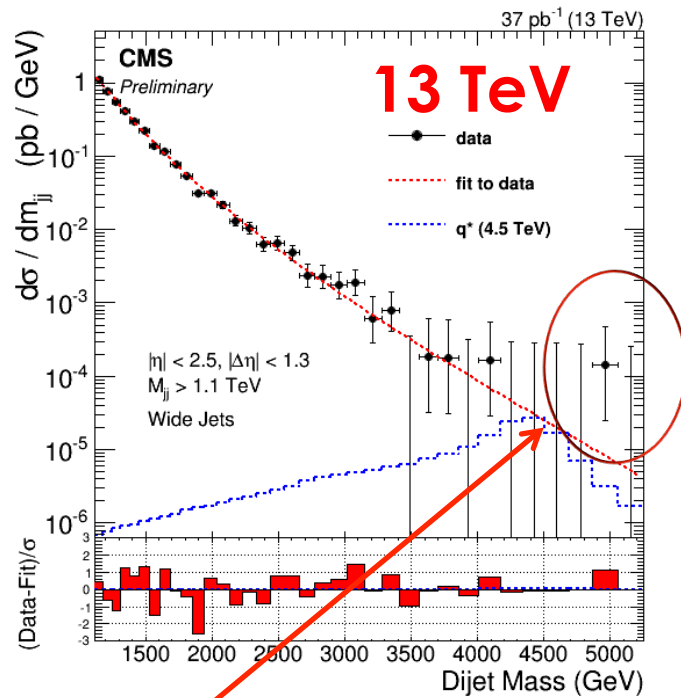
❖ $\sigma_{t\bar{t}} = 772 \pm 60$ (stat) ± 62 (syst) ± 93 (lumi) pb

❖ Section efficace multipliée par ~ 3 par rapport à 8 TeV !

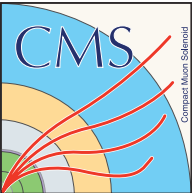


Résonance di-jet à haute masse

- **Canal de recherche de nouvelle physique** produite par QCD
 - Particule lourde ($> \text{TeV}$) se désintégrant en paire de jets de très hautes énergies

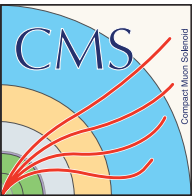


- ❖ **Avec ces 37 pb⁻¹ à 13 TeV, sensibilité déjà équivalente à celle à 8 TeV !**



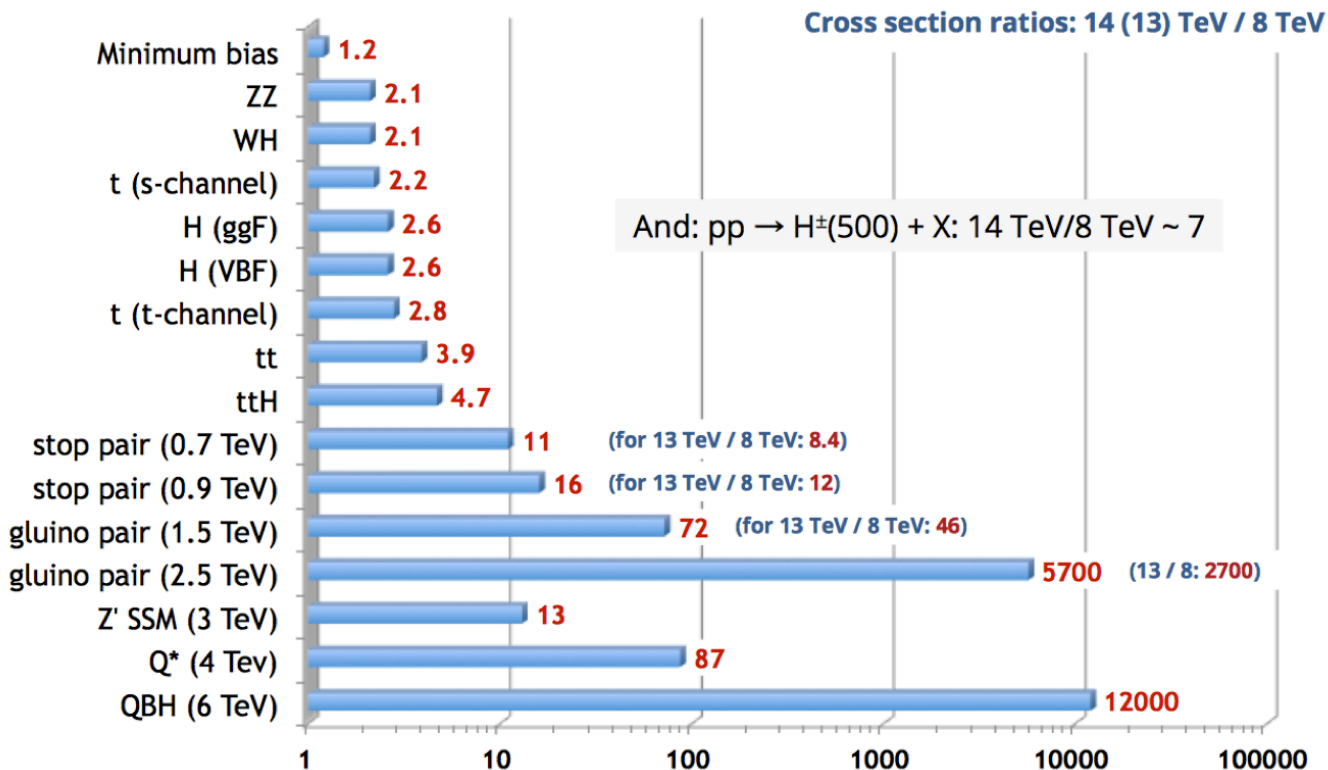
Perspectives à 13 ou 14 TeV

Dans les riches années à venir...

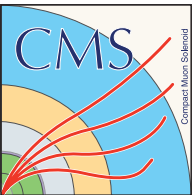


Potentiel de découverte à 13 TeV

- La sensibilité à une potentielle Nouvelle Physique va être radicalement augmentée avec les collisions à 13 TeV

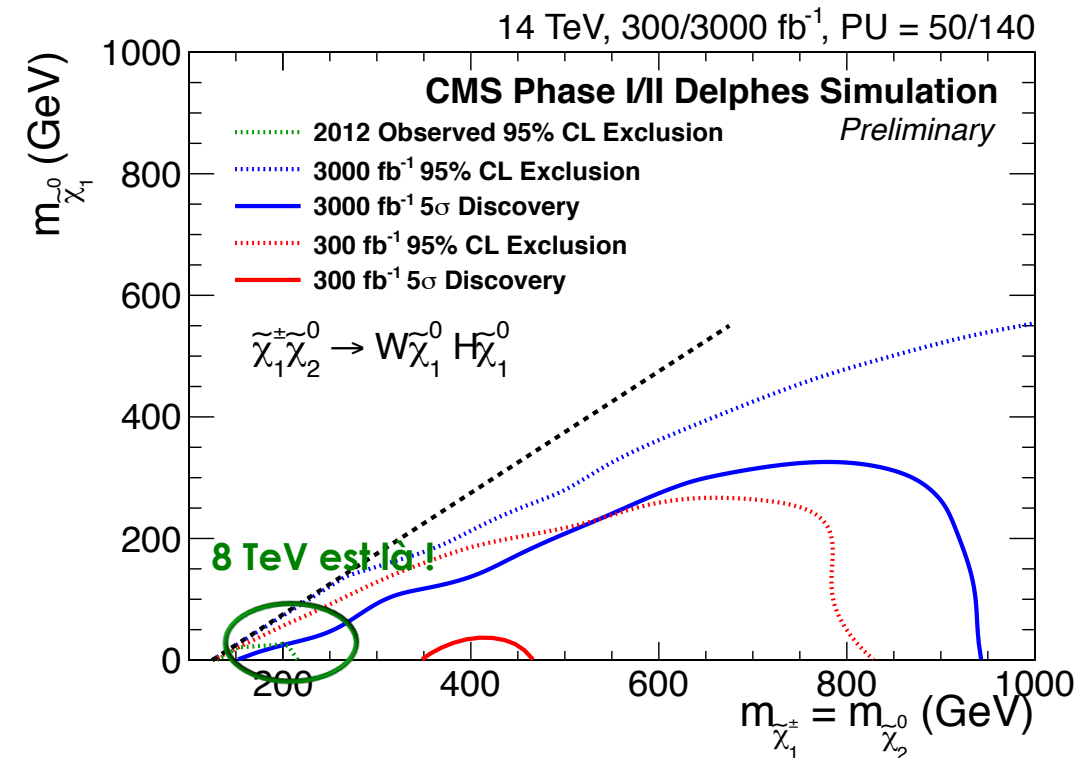


- Recherche de résonances à hautes masses facilitée par le bras de levier permis par l'augmentation de l'énergie dans le centre de masse
- Réduction de la luminosité nécessaire pour une découverte

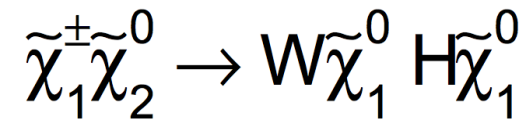


Recherche directe de la supersymétrie

- La **supersymétrie** prévoit un **riche spectre de particules supplémentaires**, généralement suffisamment lourdes pour avoir échappé à la détection
- Les recherches directes à 13 TeV vont couvrir une bien plus grande partie du spectre autorisé



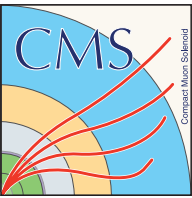
- Exemple de recherche utilisant le boson de Higgs comme portail vers la nouvelle physique :



- Etat final:

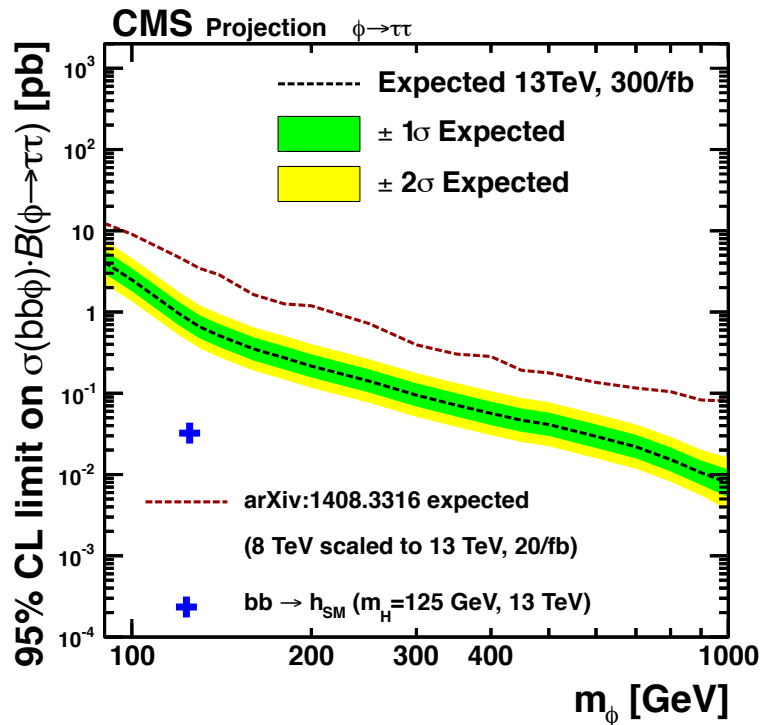
$$W \rightarrow l\nu, H \rightarrow b\bar{b} + \text{MET}$$

→ La découverte (ou l'exclusion) de la supersymétrie sera désormais beaucoup plus rapide

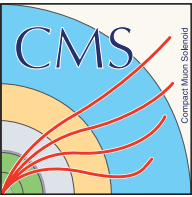


Recherche de secteur scalaire étendu

- De nombreux modèles prédisent un **secteur scalaire étendu**
- Le modèle à deux doublets de Higgs prévoit 5 bosons de **Higgs** physique, dont **3 neutres** ($\Phi = h, H, A$)
- Il est possible de rechercher simultanément ces 3 bosons neutres dans le canal $h, H, A \rightarrow \tau\tau$ (apparition de 3 résonances dans le spectre $m_{\tau\tau}$)



- ❖ Limites d'exclusion de la section efficace $pp \rightarrow \Phi \rightarrow \tau\tau$ à 95% de niveau de confiance
- ❖ En passant de 8 TeV à 13 TeV, l'exclusion attendue est améliorée à basse masse (facteur ~ 2) et à haute masse (facteur ~ 10)



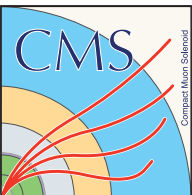
Conclusions

- Le LHC est une machine dont le potentiel commence à peine à être exploité
 - L'expérience **CMS** a contribué à des *mesures et découvertes majeures* en physique des hautes énergies

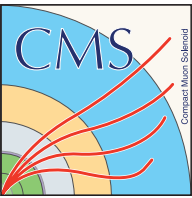
- En particulier, le **Run I** a été marqué par la *découverte d'un boson de Higgs*
 - L'origine de la *masse des particules élémentaires* est en voie d'être *complètement élucidée*
 - Les *implications* de cette découverte sont *gigantesques* dans notre compréhension de la physique des constituants fondamentaux

- Le redémarrage du LHC pour le **Run II** va permettre l'exploration d'un **domaine en énergie et en luminosité totalement inconnu de la physique**
 - Le boson de Higgs se comporte t-il exactement comme prédit par le **Modèle Standard** ?
 - Existe t-il une nouvelle physique à l'échelle du TeV, comme motivée par de nombreux modèles ?

**Qui sait ce que la Nature nous réserve ?
Le futur de la physique des hautes énergies sera écrit au LHC.**

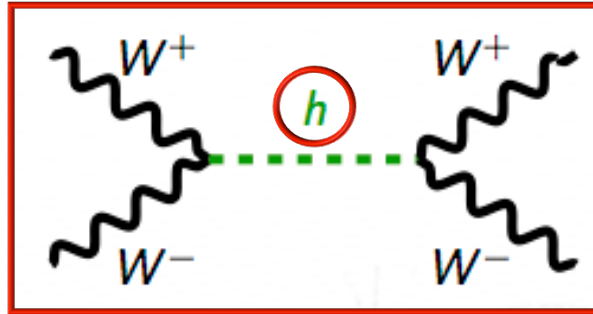
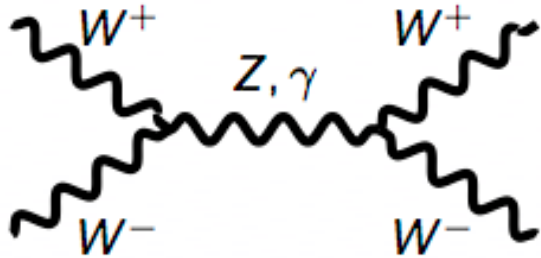


Backup



Diffusion di-bosons à haute énergie

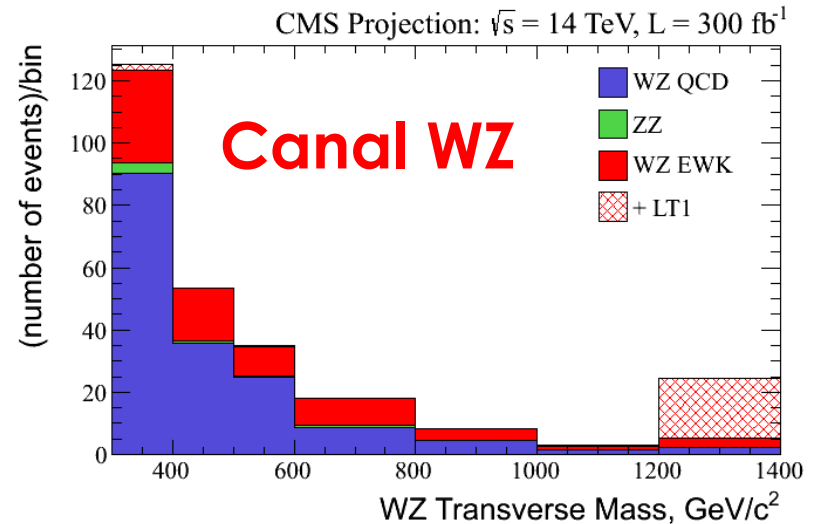
- La mesure section efficace de diffusion à haute masse de bosons W, Z polarisés longitudinalement (**Vector Boson Scattering = VBS**) est **cruciale pour comprendre la nature de la brisure de symétrie électrofaible** (réalisée à travers le mécanisme de Higgs)



Ce diagramme est essentiel pour l'unitarité de la théorie

- A des énergies 8 TeV, très difficile à accéder [section efficace trop faible]

- 13 TeV : premières mesures de la production électrofaible de paires de bosons de jauge au TeV
- En perspective : mesure de la VBS



Planning du LHC

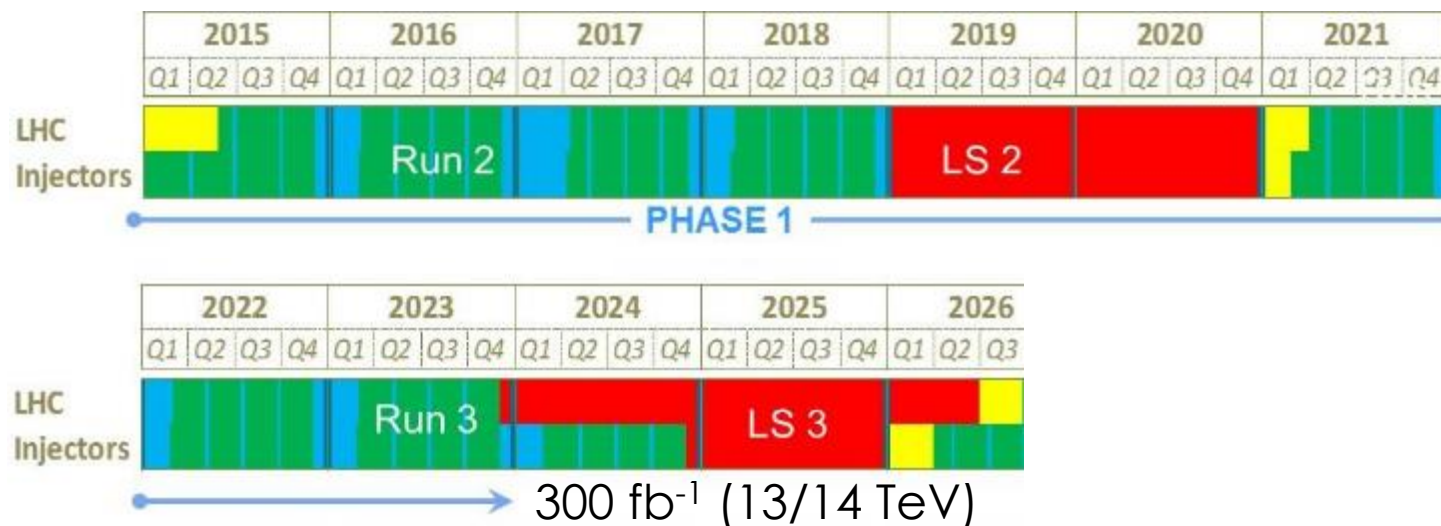
Objectifs chiffrés pour la luminosité

2015 : 5-8 fb⁻¹

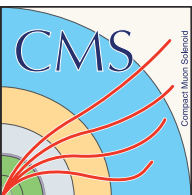
Run2: ~120-140 fb⁻¹

300 fb⁻¹ avant LS3

25 fb⁻¹ (7+8 TeV)

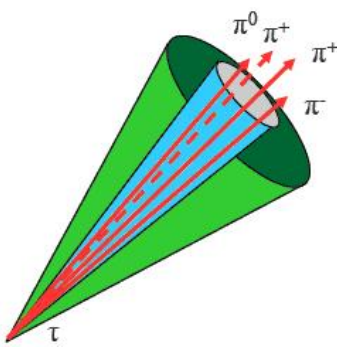


Après LS3, HL-LHC (vers 3000 fb⁻¹)

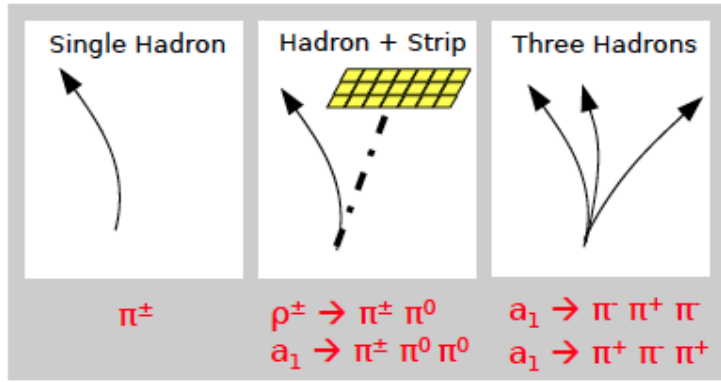


Mise-à-jour du trigger de τ de CMS

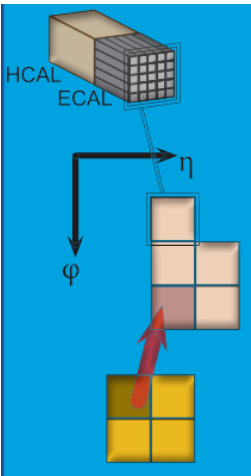
Les τ sont les leptons les plus lourds \rightarrow peuvent se désintégrer hadroniquement



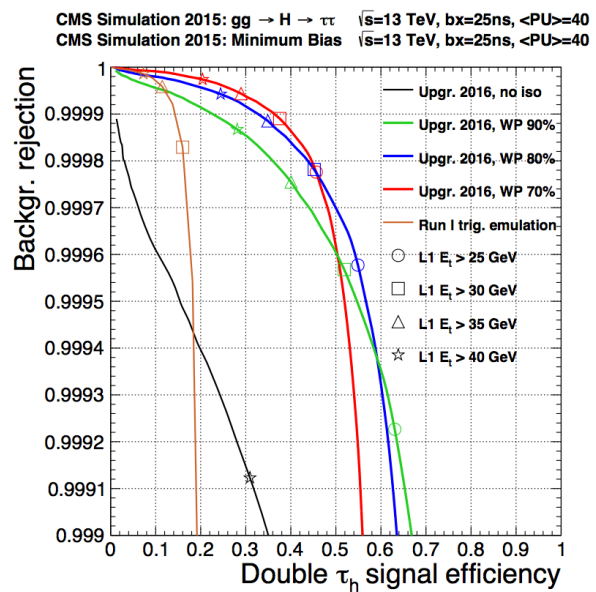
- τ_h : jet induit
- 1-prong
 - 1-prong + $\pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma)$
 - 3-prong



Système de déclenchement sur les objets τ_h revisité pour le Run II



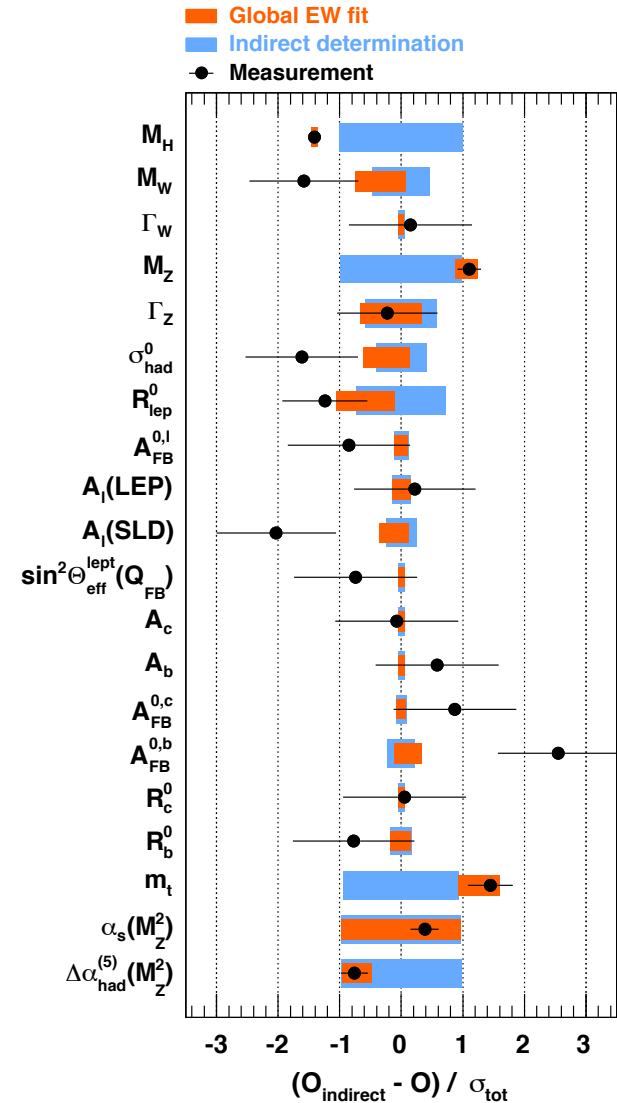
- ❖ Granularité augmentée \rightarrow meilleure réjection du bruit de fond
 - ❖ Dépôts dans le calorimètre amassés pour reconnaître ces topologies particulières
 - ❖ Veto sur les amas de type bruit de fond
 - ❖ Utilisation de l'isolation
- \rightarrow Performances permettant de maîtriser le taux de déclenchement à grand efficacité de sélection des τ_h

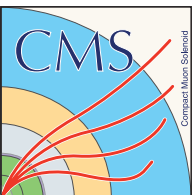


Ajustement du secteur électrofaible

- Permettent de comparer les mesures directes et les prédictions indirectes par ajustement d'un grand nombre de mesures

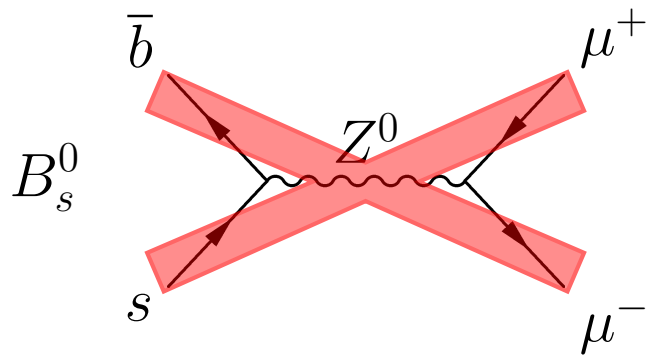
- Excellent accord
- Faibles tensions





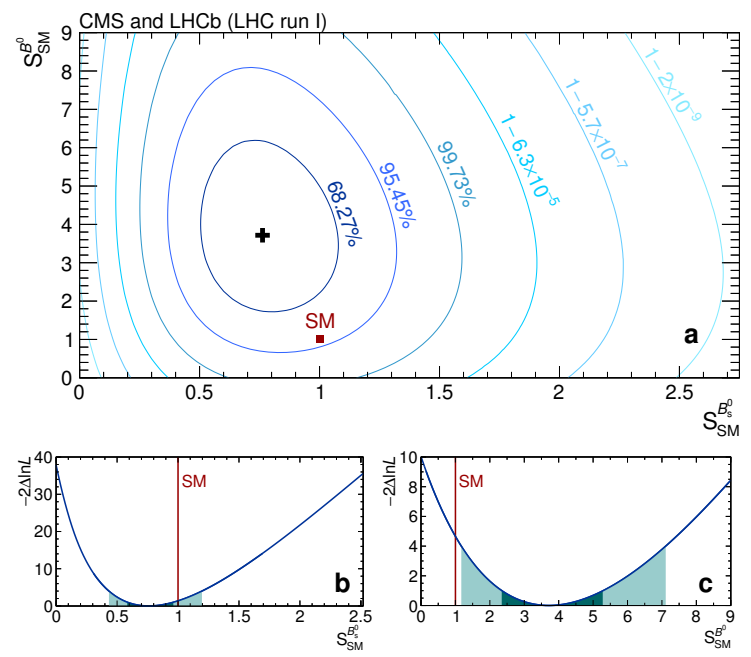
$B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (LHCb + CMS)

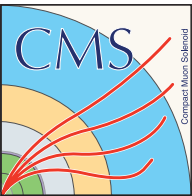
$$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



- $B_s \rightarrow \mu\mu$ est interdit au niveau des arbres dans le Modèle Standard: rapport d'embranchement petit
- Des contributions de Nouvelle Physique peuvent venir l'augmenter
- Mesure indirectement sensible à des particules supplémentaires

- LHC+CMS = première évidence expérimentale de la désintégration (BR $\sim 2.8 \times 10^{-9}$)
- Mesure compatible avec les prédictions du Modèle Standard (violation de la saveur minimale)
- Pas encore de Nouvelle Physique !





Mise-à-jour de CMS

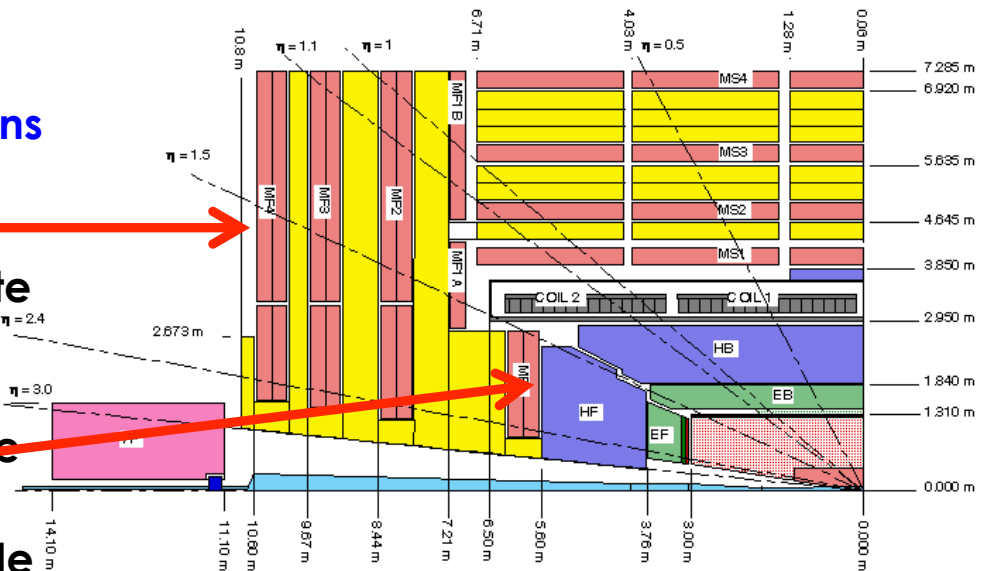
- **Mise-à-jour / remplacement de certains systèmes nécessaires pour la prise de données à plus haute luminosité**

- **Effectués en 2013-2014:**

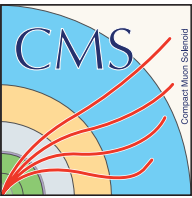
- ① **Remplacement du tube à vide pour le faisceau au niveau de CMS**
- ② **Remplacement des Photodiodes Hybrides du calorimètre hadronique par des Photodiodes Silicium → meilleure segmentation dans la profondeur de gerbe (+ remplacement des Photomultiplicateurs à simple voie par des phototubes à plusieurs anodes)**

- ③ **Couverture complète pour les muons**

- ❖ Nouveaux CSC [Cathode Strip Chambers] & RPC [Resistive Plate Chambers] sur la 4^{ème} couche
- ❖ Electronique de lecture plus performante pour la 1^{ère} couche



- ④ **Mise à jour du trigger d'électrons, de photons et de taus au niveau 1**

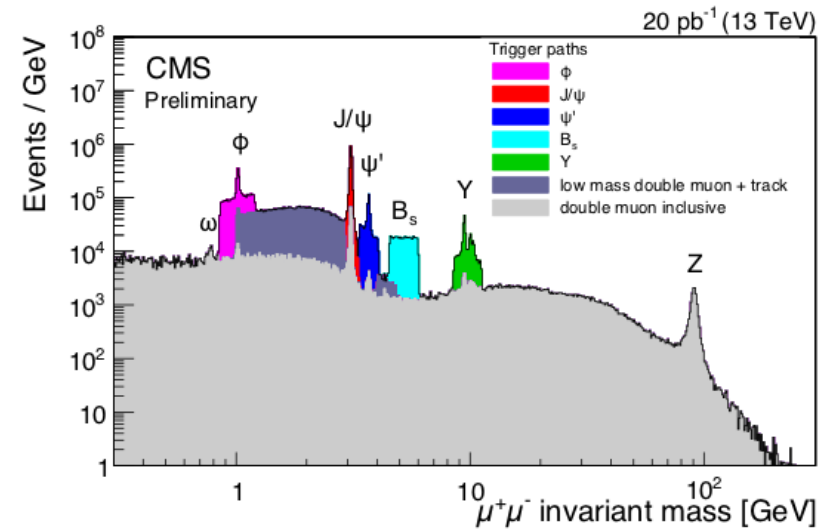


Chandelles standard

Redécouverte des résonances connues : J/ψ , Z , etc.

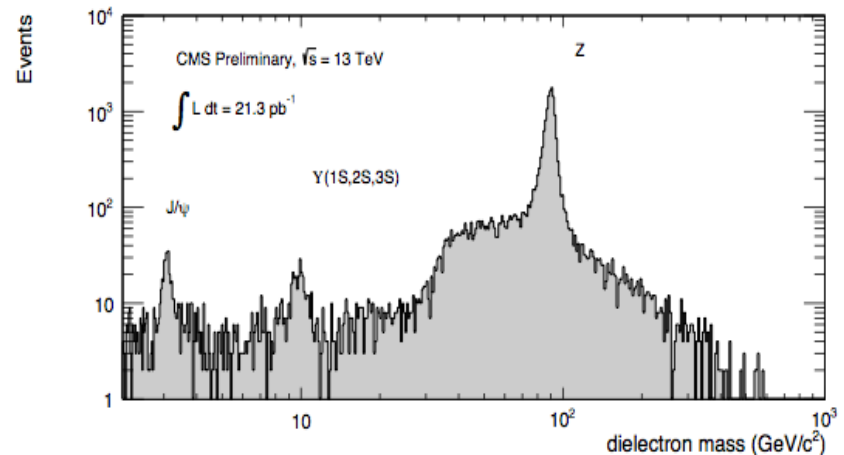
Canal di-muon

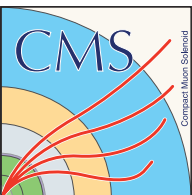
(avec seuils de déclenchements adaptés en impulsion)



Canal di-electron

(2 électrons avec chacun $|\eta| < 2.5$ et $p_T > 10$ GeV)





Masse du boson W, masse du quark top

Masses du boson W et du quark top

- Paramètres essentiels dans le secteur électrofaible (à des énergies ~100 GeV)
- Corrections radiatives sur la masse du boson de Higgs

Mesure de la **masse du top** au LHC : mesure aussi précise au LHC qu'au TeVatron

Masse du boson W : précision dominée pas le TeVatron

