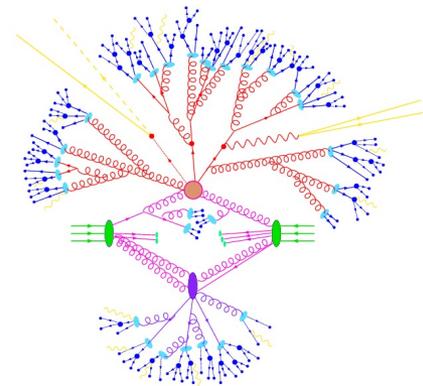
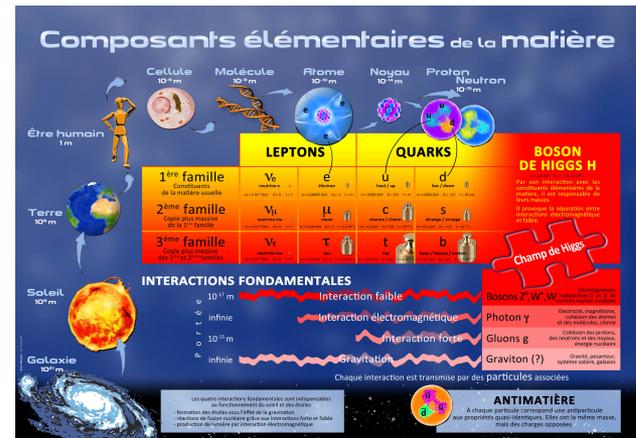


Résumé de l'épisode précédent

- **Modèle Standard**
 - Contenu en particules
 - Interactions fondamentales
 - Mécanisme de Higgs
- **Outils pour l'étudier** : accélérateurs, principe des détecteurs
- Retour sur le Modèle Standard
- Complémentarité des collisionneurs
- Le LHC et ses détecteurs
- **La physique au LHC**
 - cohérence du Modèle Standard



Retour sur le Modèle Standard

Mécanisme de Higgs publié en 1964,
interactions EM et faible unifiées en 1967,
bosons Z et W découverts en 1983.

En parallèle :
lepton τ découvert en 1974,
quark b découvert en 1977.

→ établissement du Modèle Standard
19 paramètres libres indépendants :

3 constantes de couplage : forte, EM, faible

2 paramètres dans le potentiel de Higgs

1 paramètre de QCD

9 couplages de Yukawa [dans le MS $m(\nu)=0$]

3 angles de mélange et 1 phase dans la *matrice CKM*

	LEPTONS		QUARKS	
1 ^{ère} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m \approx 2 \cdot 10^{-9}$ GeV, $Q=0$, $1=+1$	e électron $m = 0,000511$ GeV, $Q = -1$, $1 = -1/2$	u haut / up $m = 0,002$ GeV, $Q = 2/3$, $1 = +2/3$	d bas / down $m = 0,005$ GeV, $Q = -1/3$, $1 = -1/3$
2 ^{ème} famille Copie plus massive de la 1 ^{ère} famille	ν_μ neutrino mu $m \approx 2 \cdot 10^{-9}$ GeV, $Q=0$, $1=+1$	μ muon $m = 0,106$ GeV, $Q = -1$, $1 = -2/3$	c charme / charm $m = 1,3$ GeV, $Q = 2/3$, $1 = 2/3$	s étrange / strange $m = 0,1$ GeV, $Q = -1/3$, $1 = -1/3$
3 ^{ème} famille Copie plus massive des 1 ^{ère} et 2 ^{ème} familles	ν_τ neutrino tau $m \approx 2 \cdot 10^{-9}$ GeV, $Q=0$, $1=+1$	τ tau $m = 1,78$ GeV, $Q = -1$, $1 = -2/3$	t top $m = 173$ GeV, $Q = 2/3$, $1 = 2/3$	b beau / beauty / bottom $m = 4,2$ GeV, $Q = -1/3$, $1 = -1/3$

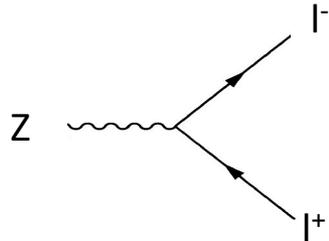
« secteur électrofaible »

« secteur des saveurs »
(des quarks)

Il faut tester le MS le plus précisément possible dans tous ses « secteurs »

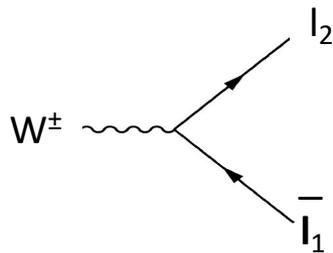
Universalité de la saveur des leptons

(Lepton Flavour Universality, LFU)



$$\text{BR}(Z \rightarrow e^+e^-) = \text{BR}(Z \rightarrow \mu^+\mu^-) = \text{BR}(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$$

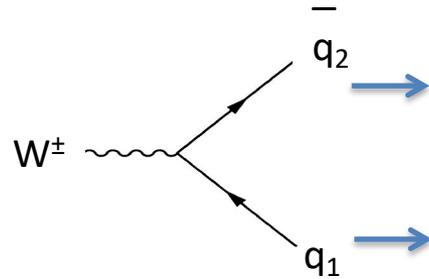
$$\text{BR}(Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e) = \text{BR}(Z \rightarrow \nu_\mu \bar{\nu}_\mu) = \text{BR}(Z \rightarrow \nu_\tau \bar{\nu}_\tau)$$



neutrino e	neutrino μ	neutrino τ
V_e	V_μ	V_τ
0	0	0
↑	↑	↑
électron	muon	tau
e	μ	τ
↓	↓	↓
-1	-1	-1

$$\text{BR}(W^+ \rightarrow e^+\nu_e) = \text{BR}(W^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu) = \text{BR}(W^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau)$$

La matrice de Cabbibo-Kobayashi-Maskawa



quark up	quark charm	quark top
u $+\frac{2}{3}$	c $+\frac{2}{3}$	t $+\frac{2}{3}$
quark down	quark strange	quark bottom
d $-\frac{1}{3}$	s $-\frac{1}{3}$	b $-\frac{1}{3}$

quark up	quark charm	quark top
u $+\frac{2}{3}$	c $+\frac{2}{3}$	t $+\frac{2}{3}$
quark down	quark strange	quark bottom
d $-\frac{1}{3}$	s $-\frac{1}{3}$	b $-\frac{1}{3}$

quark up	quark charm	quark top
u $+\frac{2}{3}$	c $+\frac{2}{3}$	t $+\frac{2}{3}$
quark down	quark strange	quark bottom
d $-\frac{1}{3}$	s $-\frac{1}{3}$	b $-\frac{1}{3}$

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{red} & \text{cyan} & \text{purple} \\ \text{cyan} & \text{red} & \text{green} \\ \text{purple} & \text{green} & \text{red} \end{pmatrix}$$

prix Nobel 2008



Makoto Kobayashi



Toshihide Maskawa

La matrice de CKM

Matrice unitaire 4 paramètres libres : A, λ, ρ et η

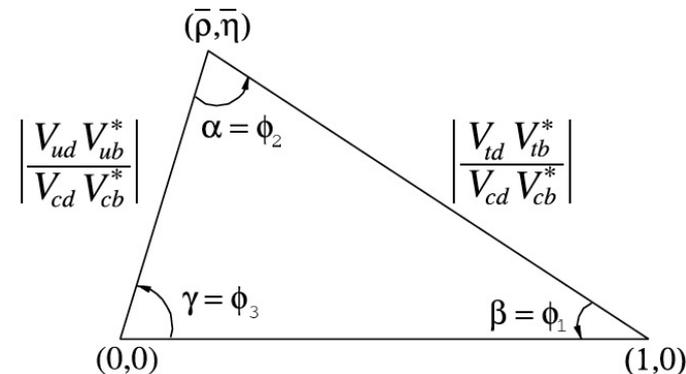
$$V_{\text{CKM}} = \begin{matrix} \text{u} \\ \text{c} \\ \text{t} \end{matrix} \begin{pmatrix} \text{d} & \text{s} & \text{b} \\ 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$$\lambda = 0.22537 \pm 0.00061, \quad A = 0.814^{+0.023}_{-0.024}, \\ \bar{\rho} = 0.117 \pm 0.021, \quad \bar{\eta} = 0.353 \pm 0.013$$

Sa structure explique la « violation de CP » (paramètre η), qui elle même pourrait expliquer l'asymétrie matière-antimatière

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

Triangle d'unitarité



COMPLÉMENTARITÉ DES COLLISIONNEURS

1989 : démarrage expériences LEP

Démarrage BaBar (PEP II) : 1999

2001 : démarrage expériences Tevatron run II

2009 : démarrage expériences LHC

Démarrage Belle II (superKEKB) : 2019

Principaux buts de physique des expériences depuis 30 ans

Démarrage des expériences **LEP** (1989)

le neutrino τ , le quark top et le boson de Higgs n'ont pas encore été découverts

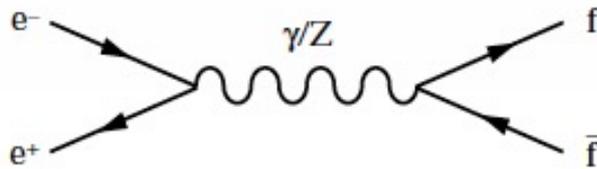
- étude des hadrons B (mésons et baryons)
- mesures de précision des bosons Z et W
- recherche du quark top
- recherche du boson de Higgs
- recherche *directe* de particules non standard

En vert : les buts atteints, en rouge, les buts non atteints

Physique au LEP (run 1)

- LEP 1 : collisions e^+e^- à $E_{cm} \sim m(Z) = 91 \text{ GeV} \rightarrow$ « usine à Z » :

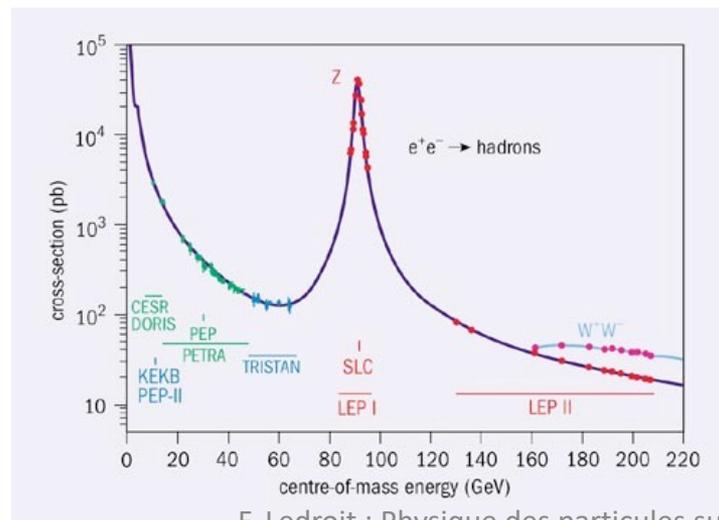
17×10^6 collisions enregistrées de 1989 à 1995



$f = e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, u, d, s, c, b$

- Faible durée de vie du Z (Δt) \Rightarrow grande incertitude sur E de production (ΔE) puisque $\Delta E \Delta t \sim \hbar \rightarrow$ largeur naturelle d'une particule :

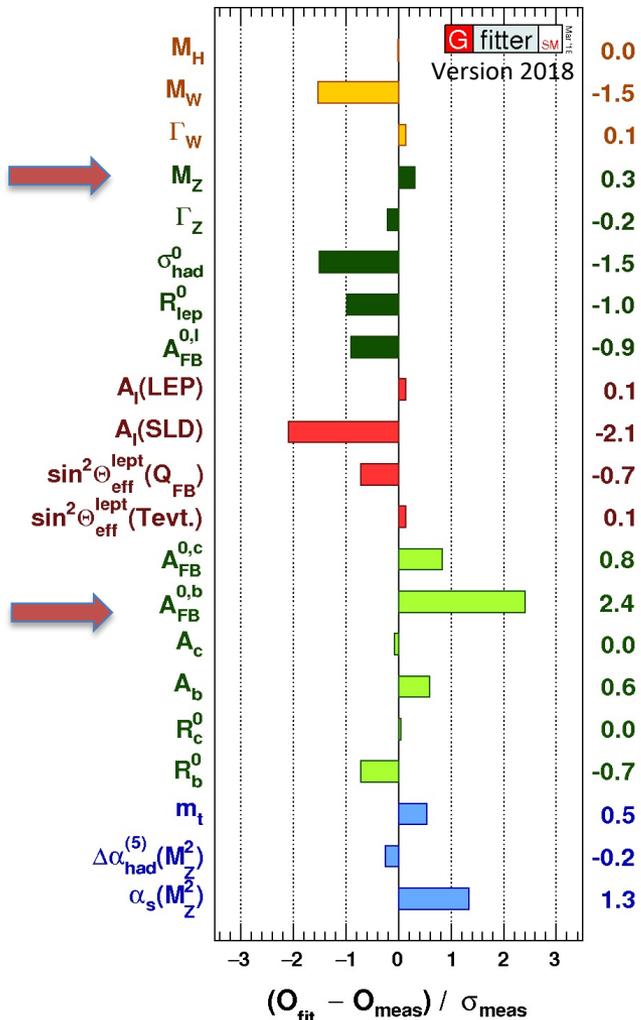
Courbe de « résonance »



Echelle logarithmique

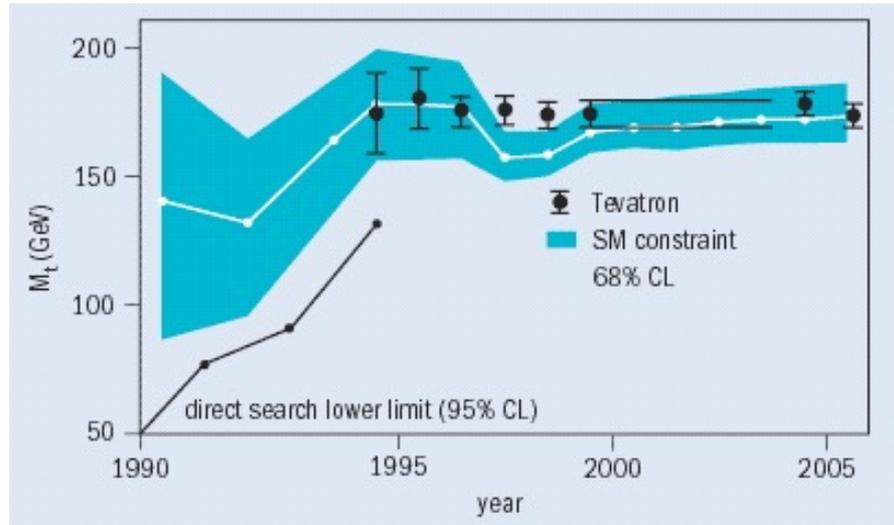
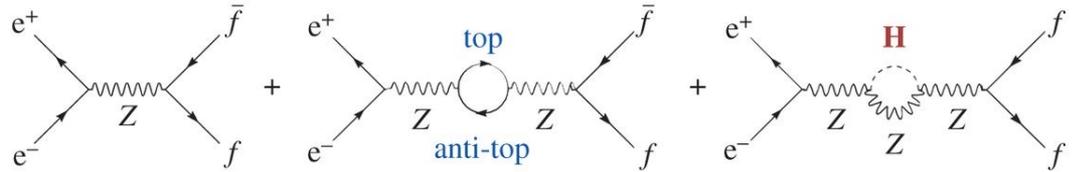
Physique « de précision » au LEP

La mesure de nombreuses observables permet de tester la **cohérence** du secteur électrofaible du Modèle Standard (4 paramètres) → un 'pilier' du MS



Effets quantiques du quark top et du boson de Higgs

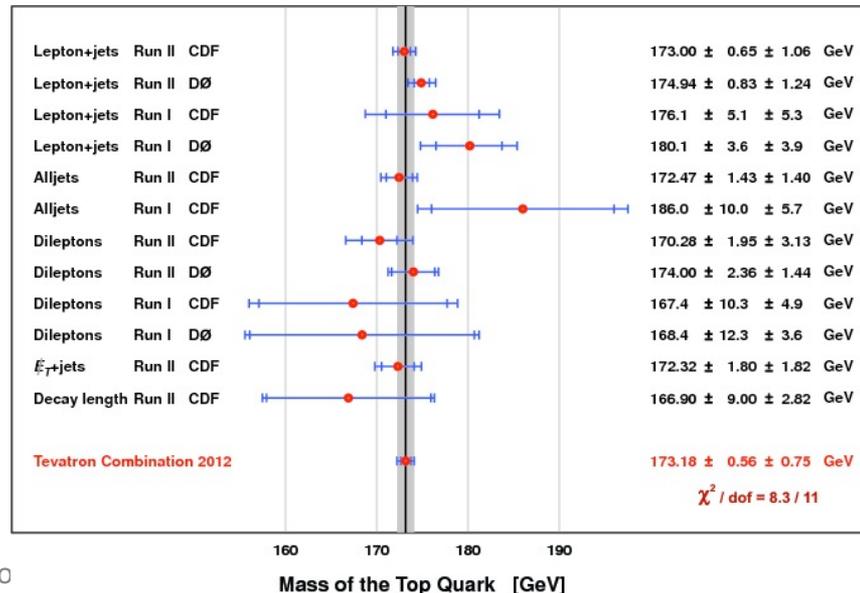
Exemples :



Principaux buts de physique des expériences sur collisionneur

Expériences **Tevatron** (run I, 1986, run II, 2001)

- étude des hadrons B (mésons et baryons)
- (mesures de précision des bosons Z et W)
- recherche du quark top → **découvert en 1994 !**
- recherche du boson de Higgs
- recherche *directe* de particules non standard



Principaux buts de physique des expériences sur collisionneur

Expériences ATLAS et CMS (**LHC**, 2009)

- étude des hadrons B (mésons et baryons)
- (mesures de précision des bosons Z et W)
- recherche étude du quark top
- recherche du boson de Higgs → cours 3
- recherche *directe* de particules non standard → cours 4

Principaux buts de physique des expériences sur collisionneur

Expérience BaBar (**PEP-II**, 1999)

Expérience LHCb (**LHC**, 2009)

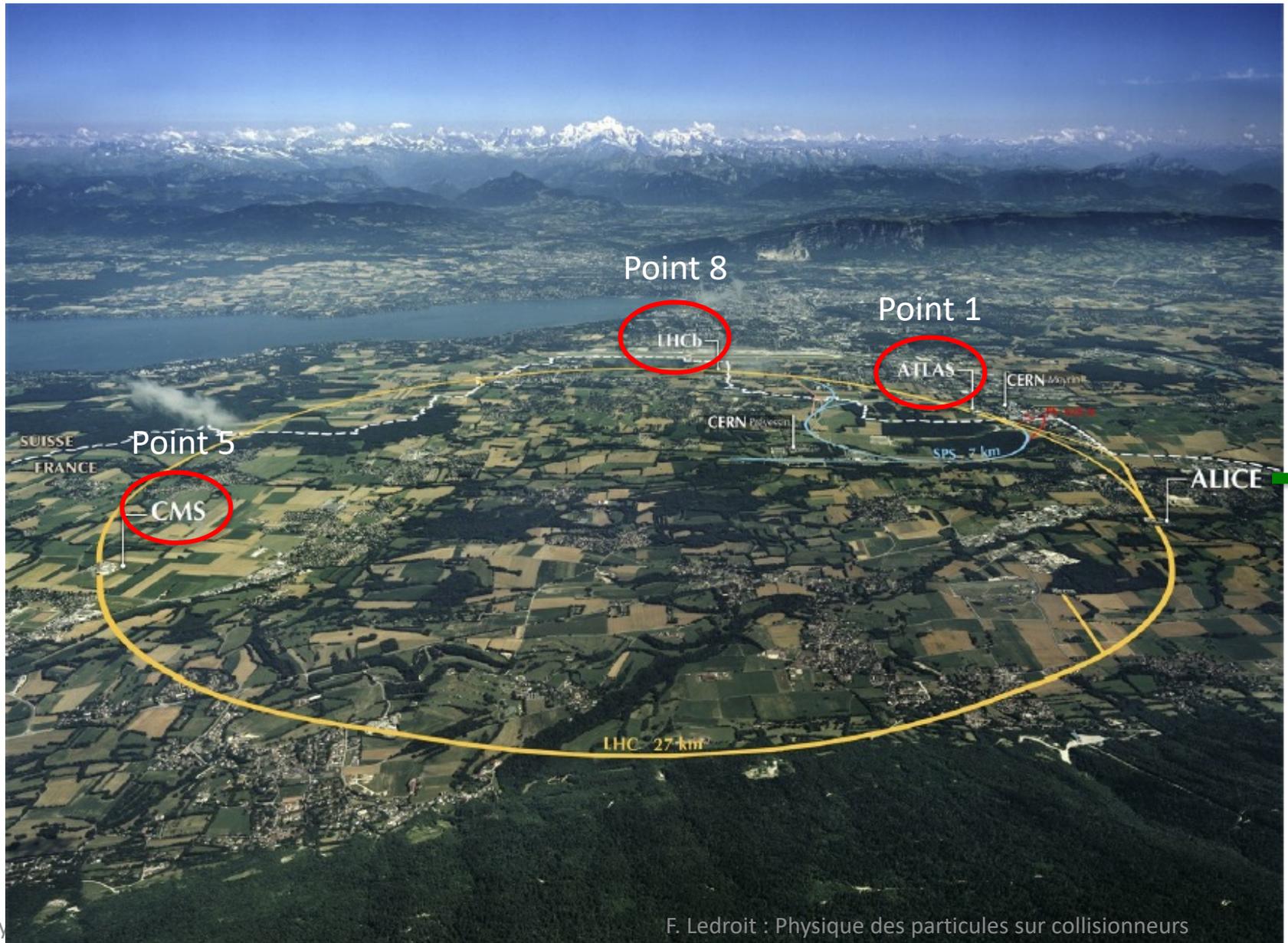
Expérience Belle II (**superKEKB**, 2019)

- étude des hadrons B → secteur des saveurs
- recherche *indirecte* de particules non standard
- BaBar et Belle ne peuvent étudier que les mésons B les plus légers

Particle, $I(J^P)$	Mass (in MeV/c ²)	Lifetime $\tau = 1/\Gamma$ (in 10 ⁻¹² s)
$B_d^0 = (bd)$, $I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$	5279.4 ± 0.5	1.536 ± 0.014 & ($c\tau = 460\mu\text{m}$)
$B^- = (bu)$, $I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$	5279.0 ± 0.5	1.671 ± 0.018 & ($c\tau = 501\mu\text{m}$)
$B_s^0 = (bs)$, $I(J^P) = 0(0^-)$	5369.6 ± 2.4	1.461 ± 0.057 & ($c\tau = 438\mu\text{m}$)
$\Lambda_b^0 = (bud)$, $I(J^P) = 0(1/2^+)$	5624.0 ± 9.0	1.229 ± 0.080 & ($c\tau = 368\mu\text{m}$)

LE LHC ET SES DÉTECTEURS

Le LHC vu du ciel



Voir le cours de C. Hadjidakis

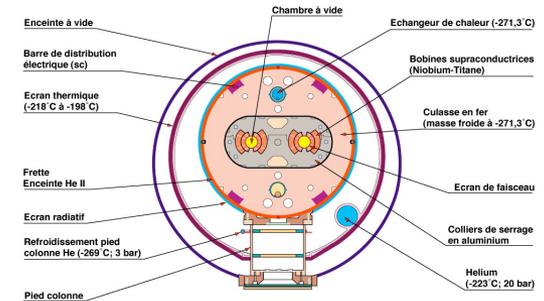


Paramètres nominaux du LHC

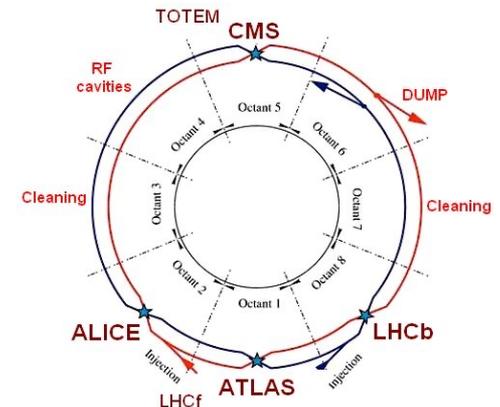
Caractéristique	Valeur
Circonférence	26 659 m
Température d'exploitation des dipôles	1,9 K (-271.3°C)
Nombre d'aimants	9593
Nombre de dipôles principaux	1232
Nombre de quadripôles principaux	392
Nombre de cavités radiofréquence	8 par faisceau
Énergie nominale, mode protons	7 TeV
Champ magnétique dipolaire maximal	8.33 T
Distance min. entre les paquets	~7 m
Luminosité nominale	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Nombre de paquets par faisceau de protons	2808
Protons par paquet (au départ)	$1,1 \times 10^{11}$
Nombre de tours par seconde	11 245
Nombre de collisions par seconde	600 millions*

* avec l'empilement, sinon 40 millions

Dipôle LHC: Coupe transversale



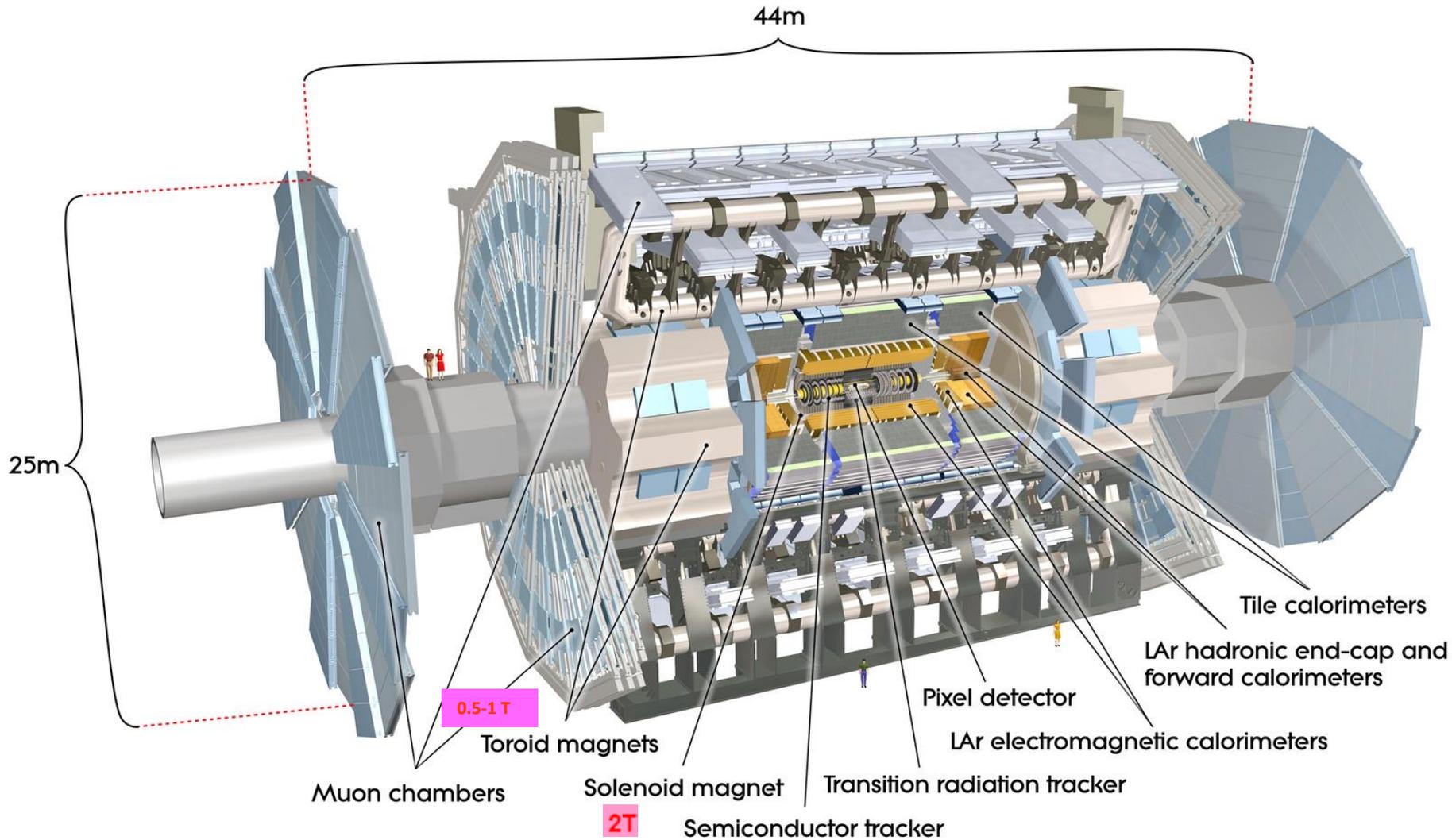
CERN AC - HES17



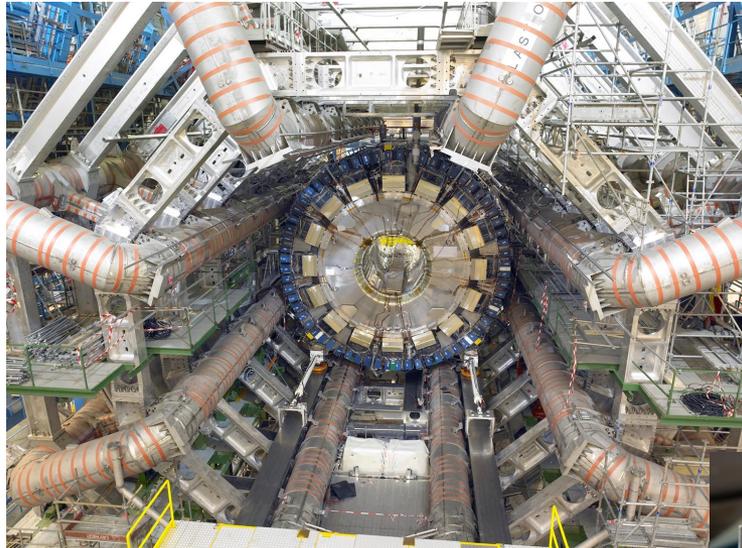
ATLAS

Collaboration de
~ 3000 physiciens

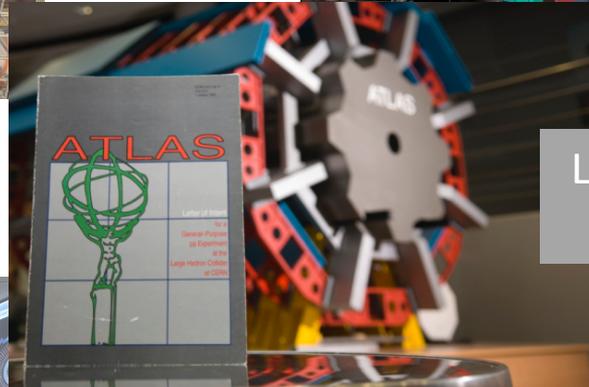
Expérience généraliste



ATLAS



Point 1



LOI (Lettre d'intention)
1 octobre 1992



Salle de comptage

Environ 95
physiciens
de l'IN2P3

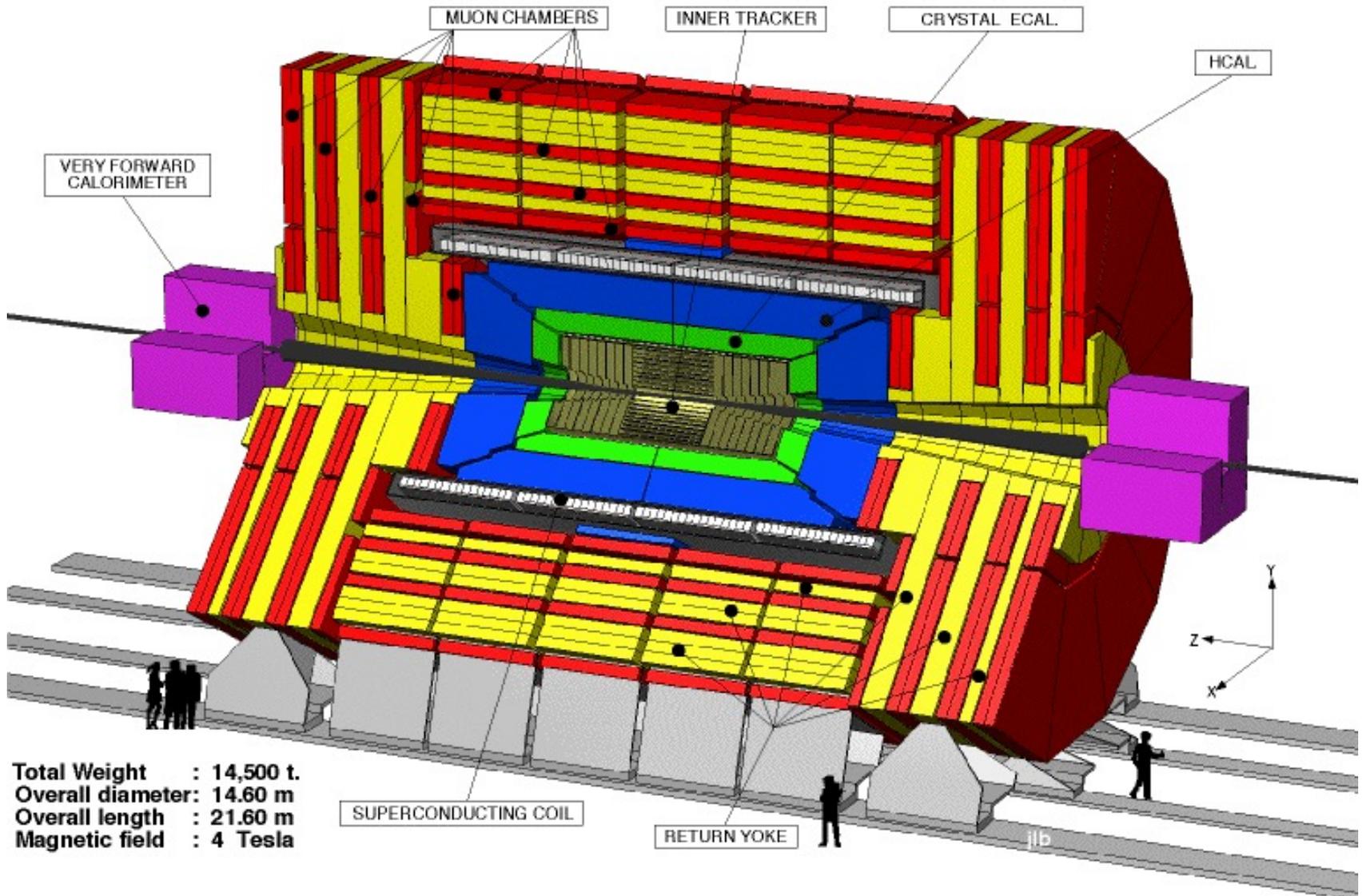


Bâtiment 40

CMS

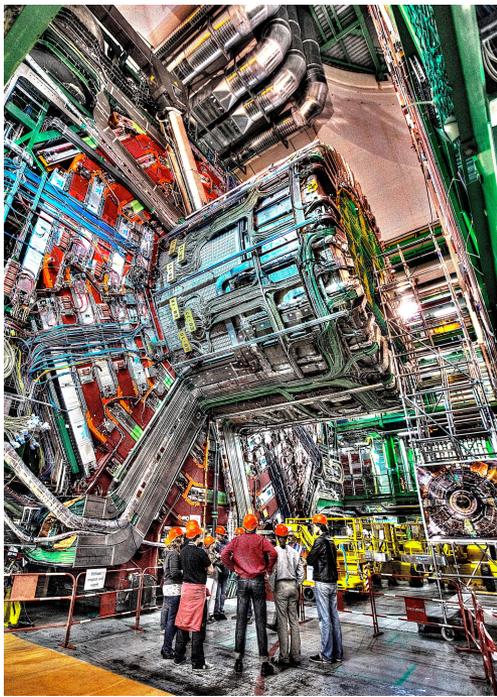
Expérience généraliste

Collaboration de
~ 3000 physiciens



CMS

Environ 45
physiciens
de l'IN2P3



LOI (Lettre d'intention)
1 octobre 1992



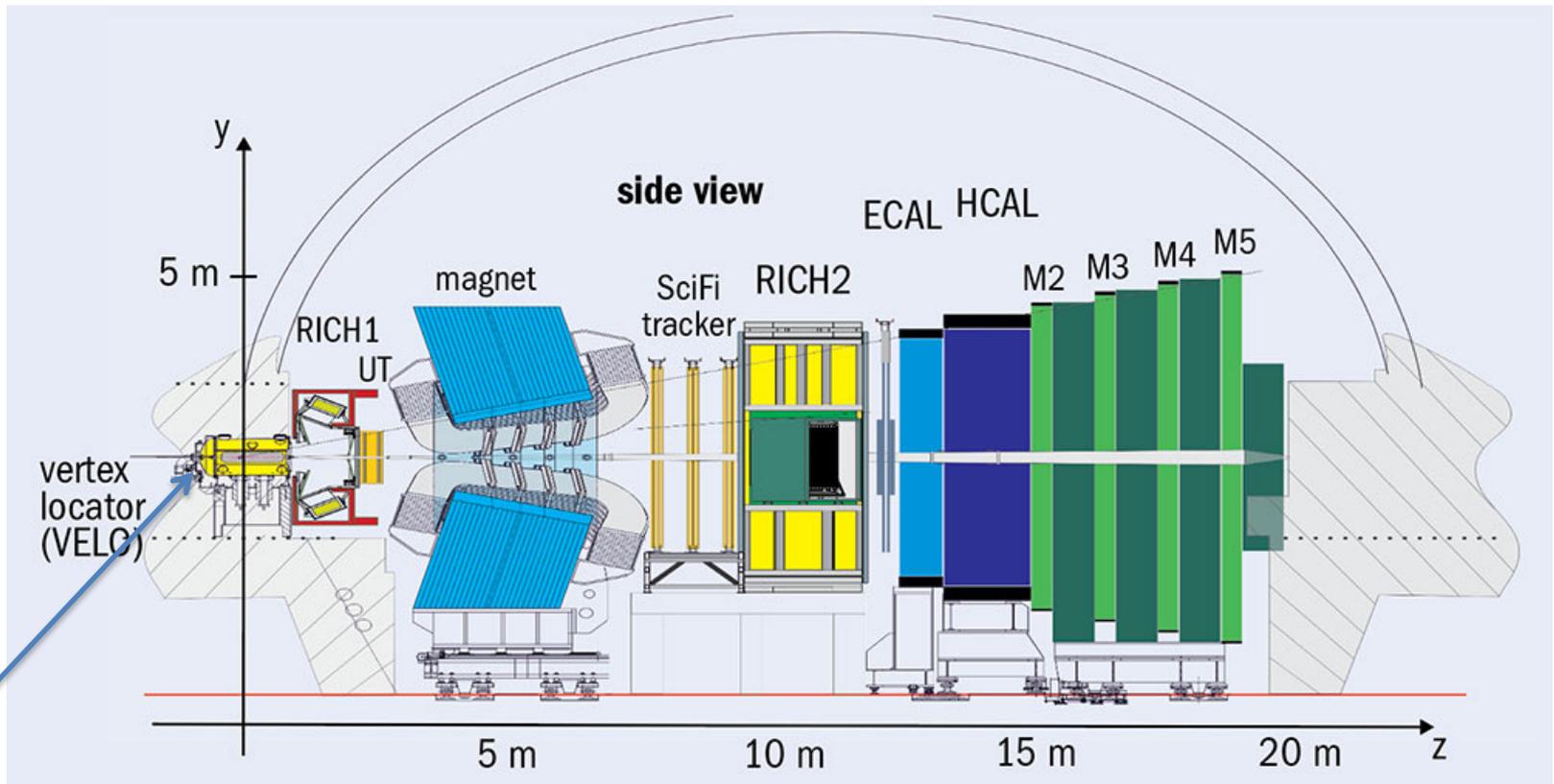
Salle de comptage



Bâtiment 40

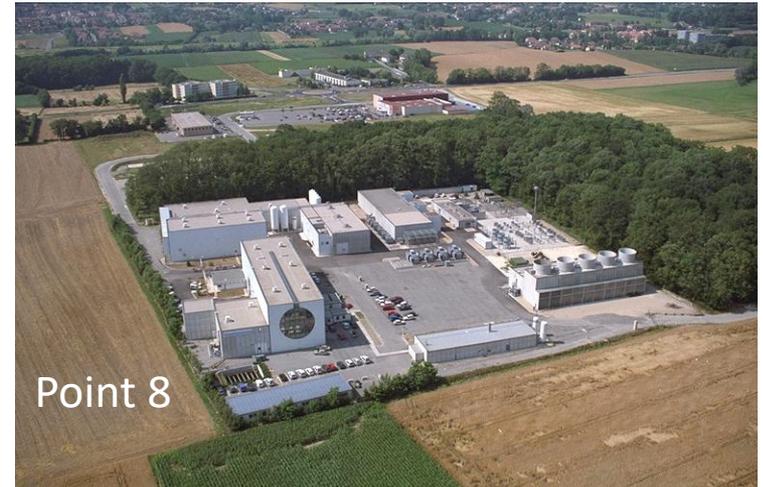
LHCb

Collaboration de
~ 800 physiciens



Expérience spécialisée : physique du quark b

LHCb



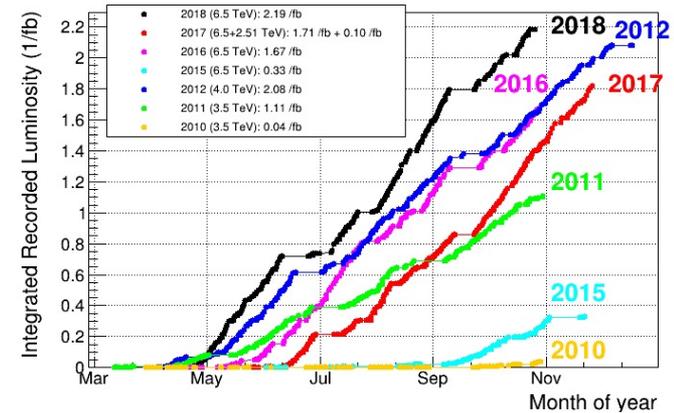
Environ 40 physiciens de l'IN2P3 (plus une douzaine sur BelleII)



LHC : performances

collisions pp dans LHCb

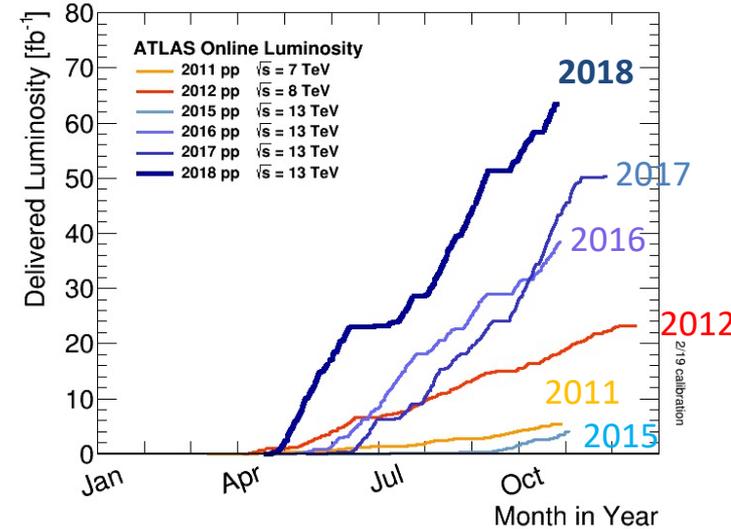
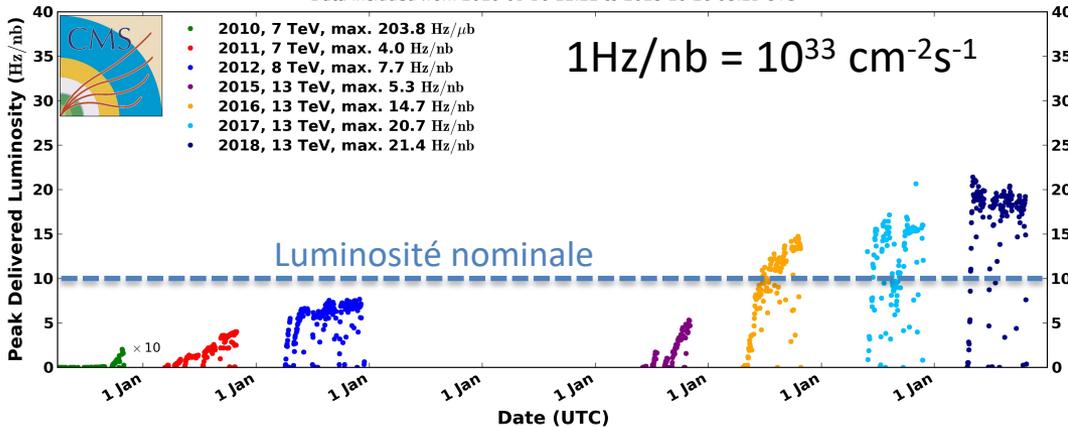
LHCb Integrated Recorded Luminosity in pp, 2010-2018



collisions pp dans ATLAS et CMS

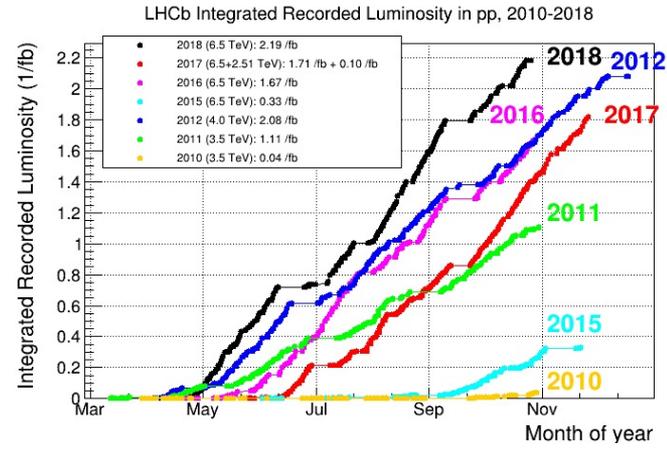
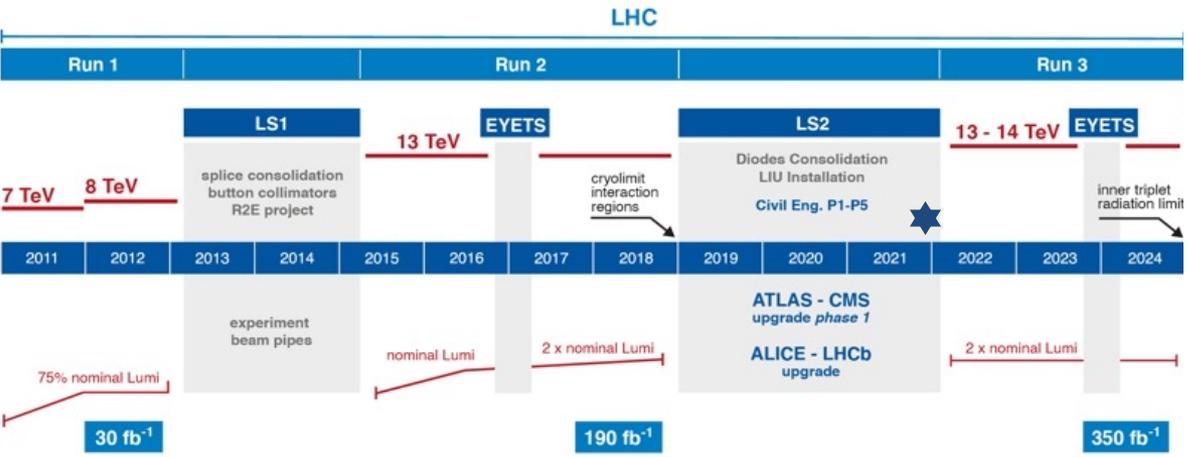
CMS Peak Luminosity Per Day, pp

Data included from 2010-03-30 11:22 to 2018-10-26 08:23 UTC

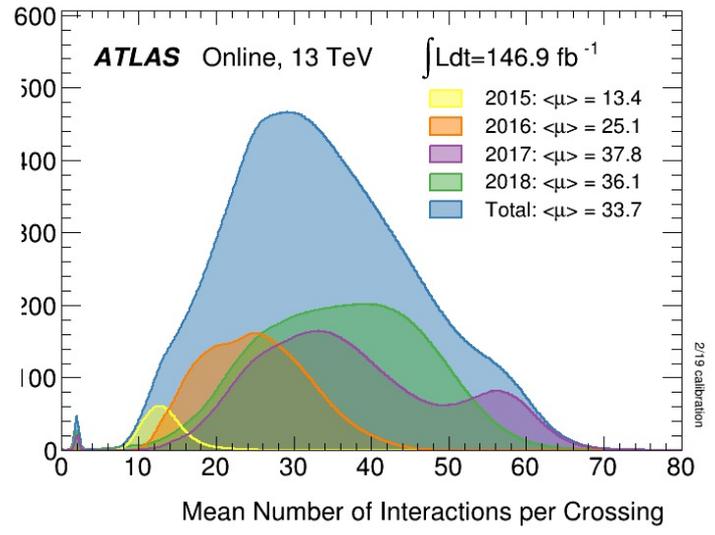
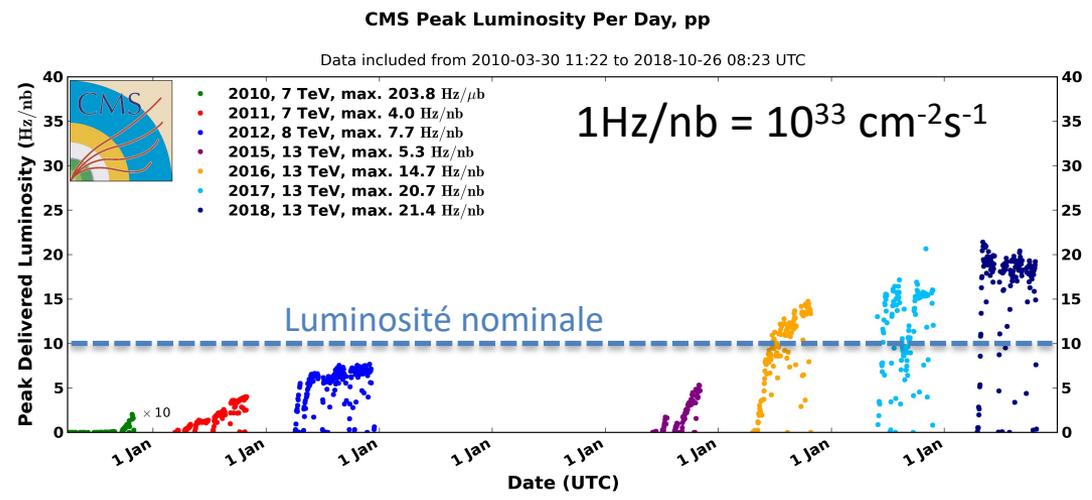


LHC : performances

collisions pp dans LHCb



collisions pp dans ATLAS et CMS

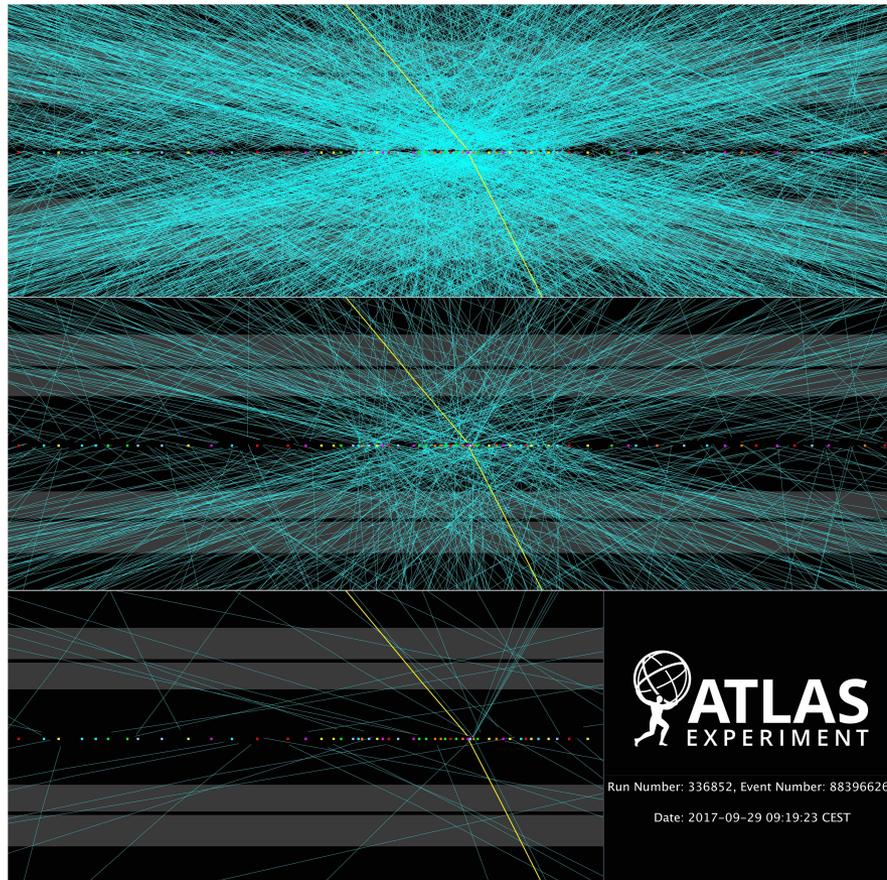


Candidat $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ avec 65 interaction

2808* paquets = 1 croisement/25 ns = 40×10^6 croisements/s

Section efficace $\sigma = 100 \text{ mb} = 10^{-25} \text{ cm}^2$, $L \sim 1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \rightarrow N_{\text{interactions/s}} \sim 1.5 \times 10^9$

$\rightarrow N_{\text{interactions/croisement}} = 1.5 \times 10^9 / 40 \times 10^6 \sim 37$



$p_T > 100 \text{ MeV}$

65 vertex

$p_T > 1 \text{ GeV}$

2017

$p_T > 5 \text{ GeV}$

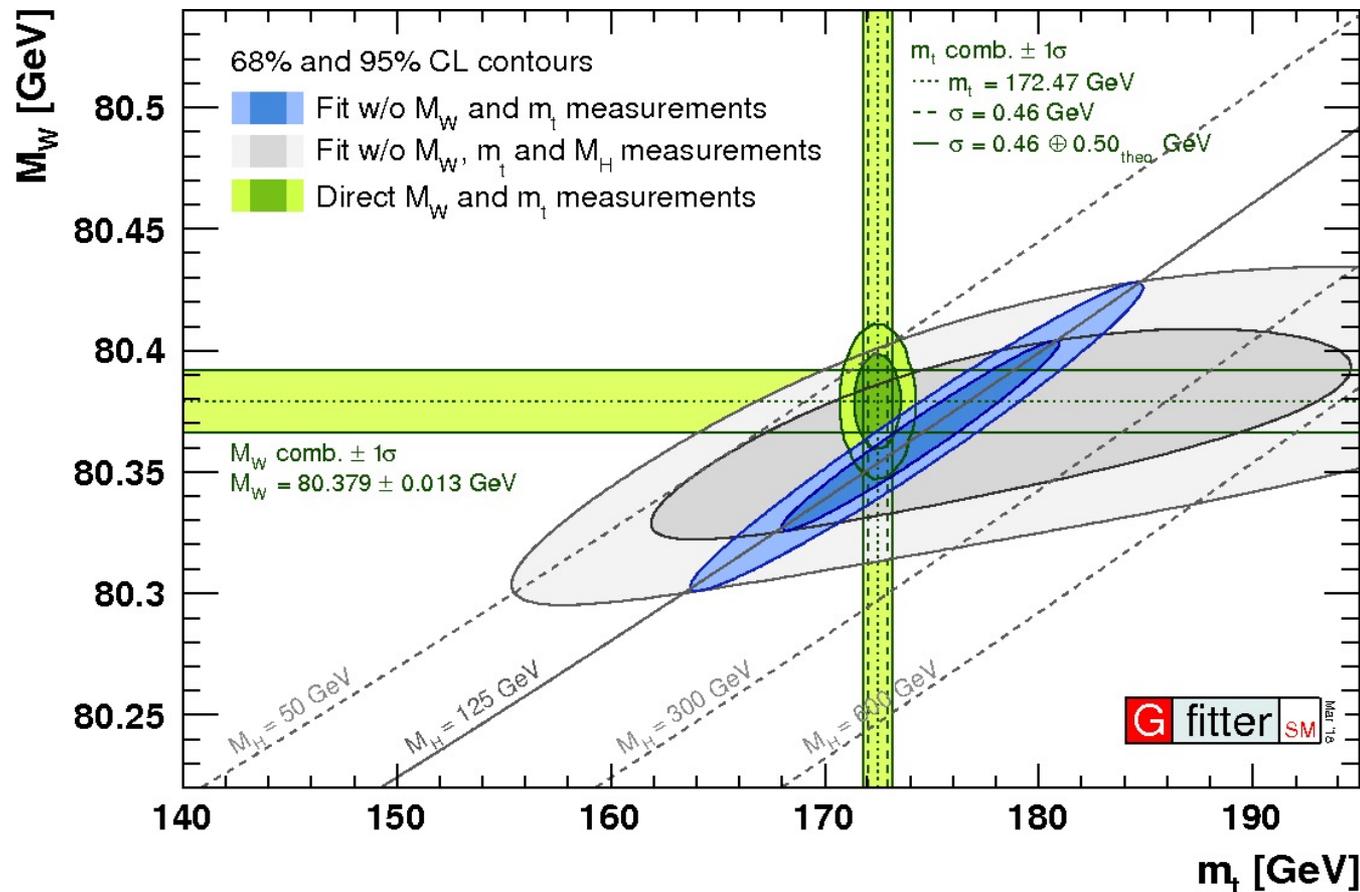
*(en fait 2500)

LA PHYSIQUE AU LHC

Cohérence du Modèle Standard

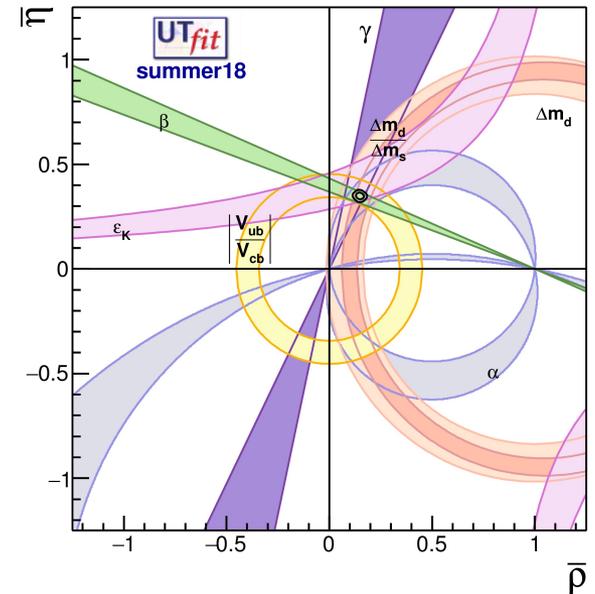
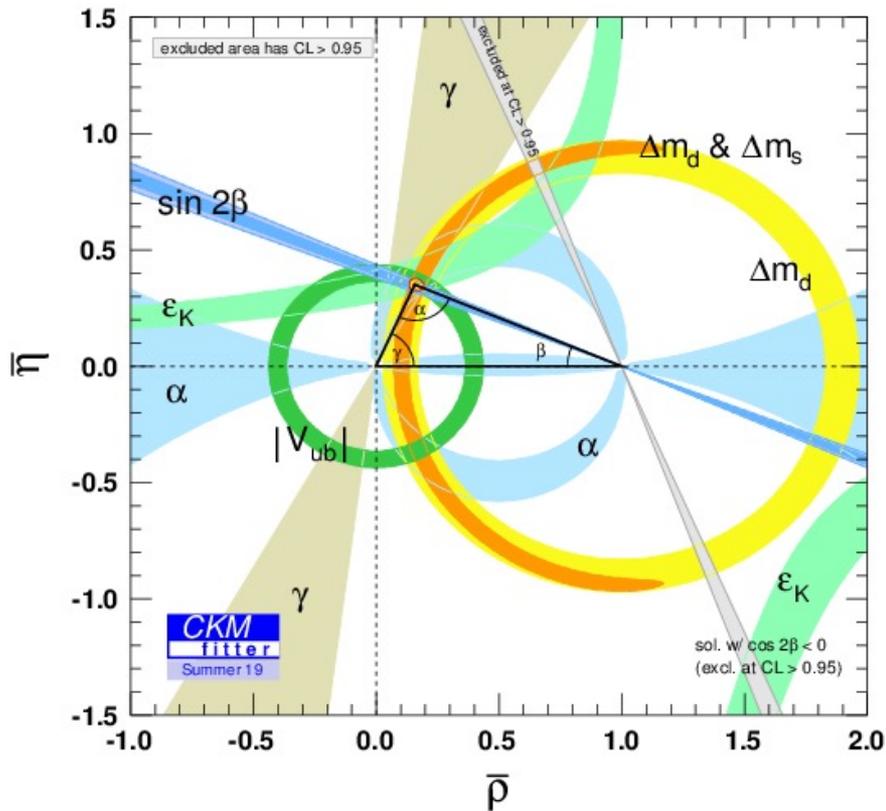
Secteur électrofaible du MS

- on fixe α_{EM} , G_F , $m(Z)$ à leur valeur mesurée et on prédit $m(\text{top})$, $m(W)$ et $m(H)$
→ courbe **bleue**
- on mesure $m(\text{top})$ et $m(W)$ → courbes **vertes**



Cohérence du Modèle Standard

« secteur des saveurs des quarks » du Modèle Standard : triangle d'unitarité
un autre « pilier » du Modèle Standard



<http://utfit.org/UTfit/ResultsSummer2018SM>

http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_summer19/ckm_res_summer19.html

