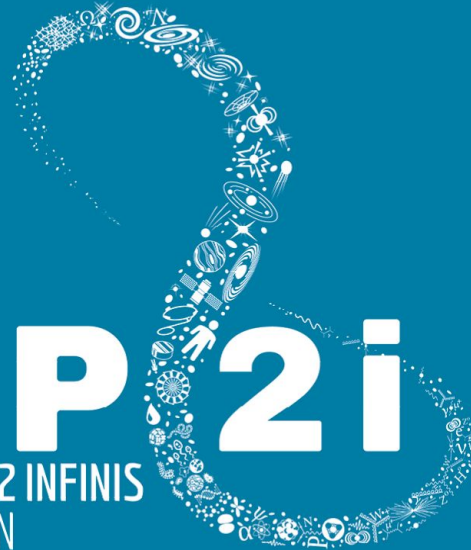


Présentation des résultats de physique du groupe CMS de l'iP2i: Physique du boson de Higgs

Stéphanie Beauceron
Maxime Gouzevitch

iP2i
LES 2 INFINIS
LYON

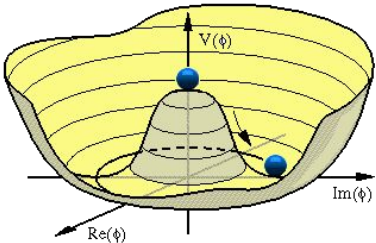


20
20

Plan

- L'état de l'art dans le secteur du boson de Higgs Modèle Standard (SM)
- Les activités de l'IP2i:
 - La section efficace de production du boson H
 - Recherche de nouveaux bosons de Higgs en état final $\gamma\gamma$ et $\pi\pi$.
 - Le potentiel du boson H
 - Largeur du boson H
 - La masse et la naturalité du boson H

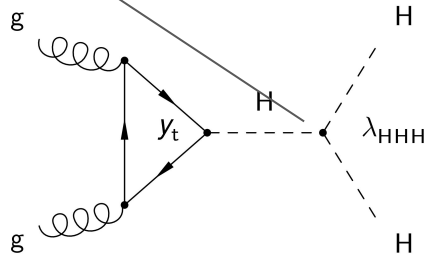
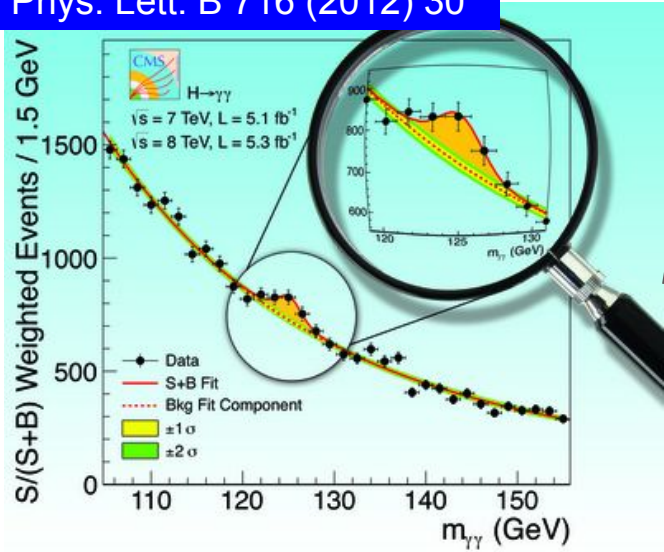
Secteur du Higgs: état de l'art



$$V(H) = \frac{1}{2}m_H^2 H^2 + \lambda_\nu H^3 + \lambda H^4.$$

$\lambda = 2m_H^2/2 \cdot v_{ev}^2$
 v_{ev} - <champ dans le vide>
 (contribue à la constante de Fermi).

Phys. Lett. B 716 (2012) 30

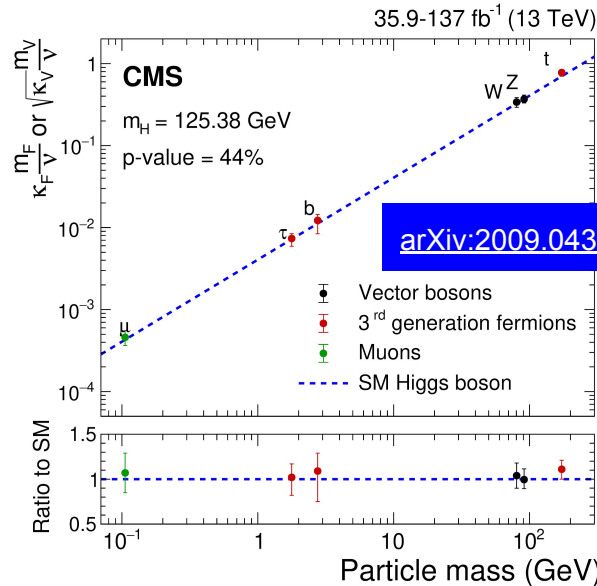


- Mesure λ :
- Production HH
 - Corrections EW à la production H

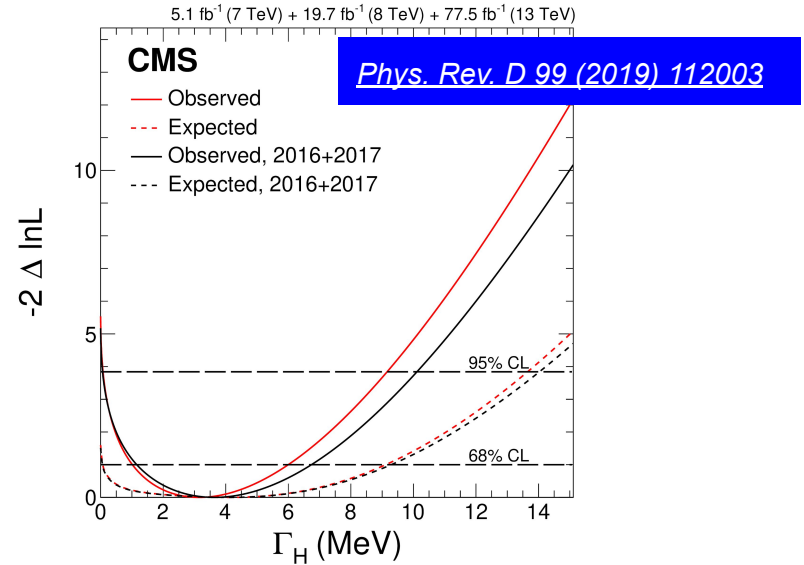
Mesure de la masse: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ et $H \rightarrow \gamma\gamma$

Secteur du Higgs: état de l'art

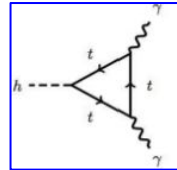
Contribution
IP2I en bleu



[arXiv:2009.04363](https://arxiv.org/abs/2009.04363). acc. JHEP



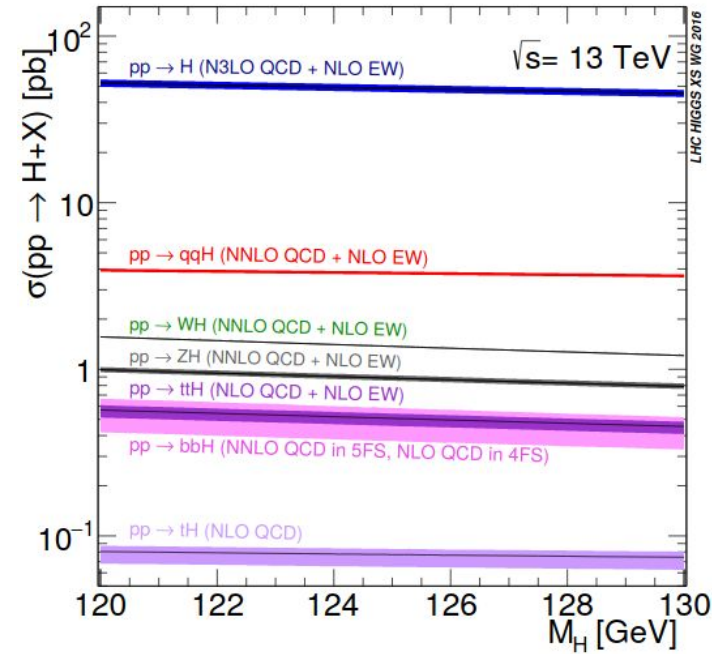
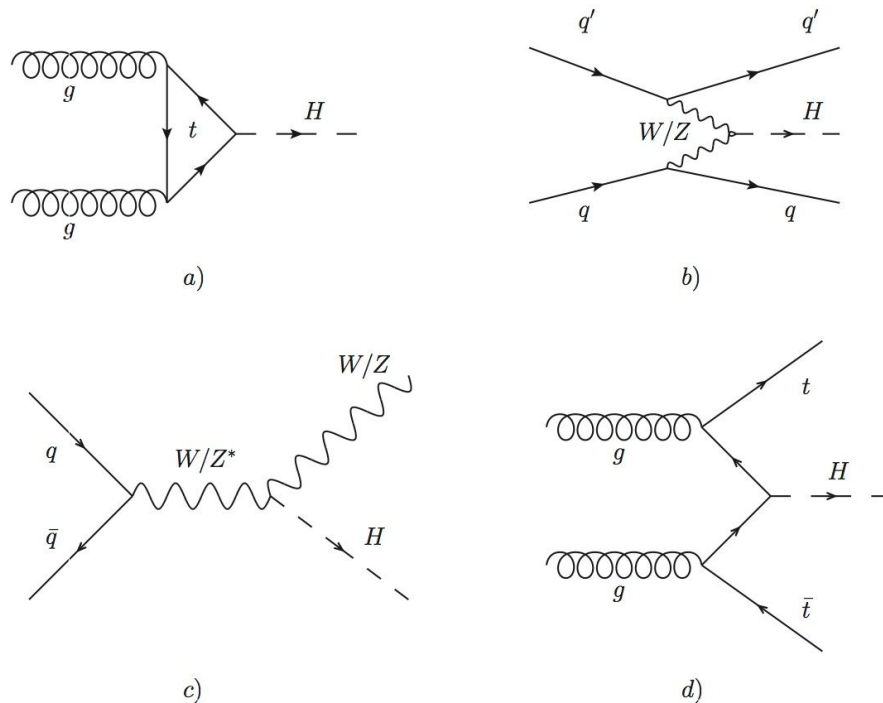
- Run 1: découverte du boson de Higgs via le couplage aux vecteurs bosons (incluant γ via les boucles de quark top).
- Run II: Mesure directe du couplage Yukawa de la 3eme génération (top, beau, tau) et évidence pour la seconde génération.



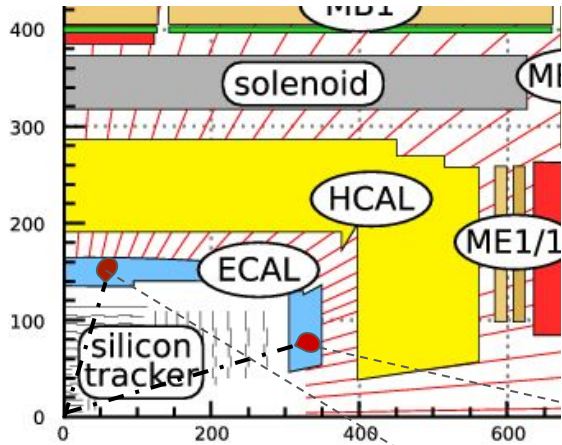
- Largeur absolue contrainte avec les effets de l'interférence:
 - H→ZZ/WW et continuum ZZ/WW (déjà publié)
 - **H→γγ et continuum γγ. (en cours)**

Secteur du Higgs: état de l'art

CERN Higgs Yellow Report 4:
[arXiv:1610.07922](https://arxiv.org/abs/1610.07922)

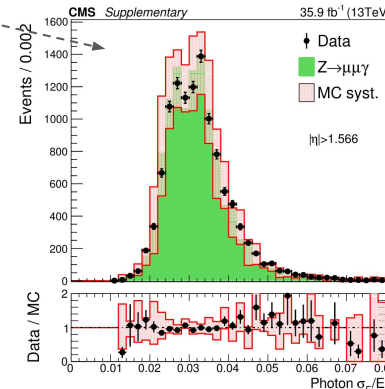
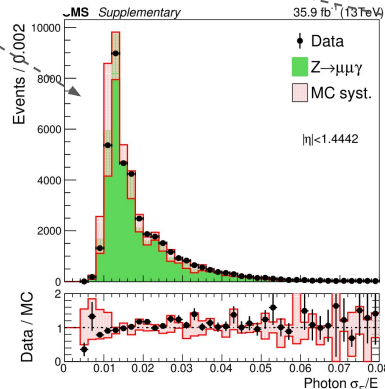


1) $H \rightarrow \gamma\gamma$: De la découverte aux mesures (2009 -) 1/2



- IP2I contributeur historique depuis démarrage du LHC
- Contributions significatives a la découverte de 2012 et aux mesures du Run 2 :
 - identification des γ
 - développement d'algorithmes de déclenchement
 - validation des méthodes multivariées via $Z \rightarrow \mu\mu\gamma$

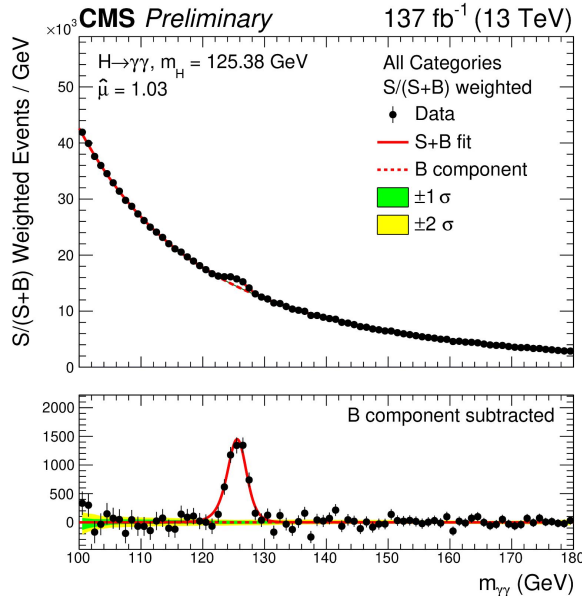
CMS-PAS-HIG-17-015



La résolution relative des photons variable critique pour l'optimisation des catégories d'analyse.

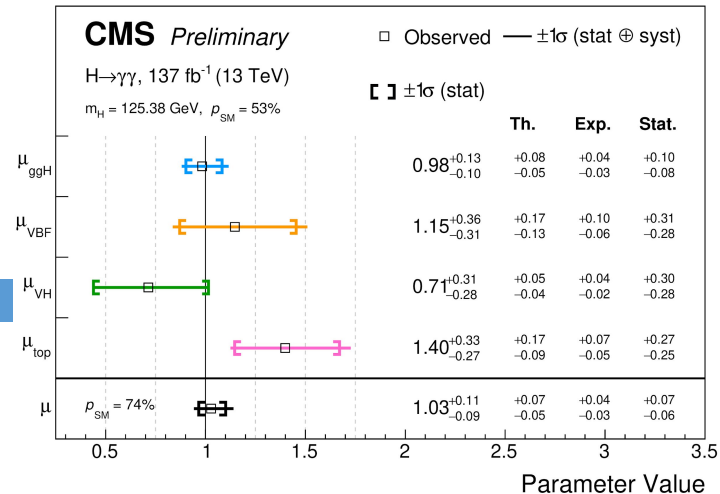
S. Gascon
M. Lethuillier,
Post-Doc: L. Finco
Thèse :
C. Camen,
A. Lesauvage,
S. Zhang

1) $H \rightarrow \gamma\gamma$: De la découverte aux mesures (2/2)



CMS-PAS-HIG-19-015

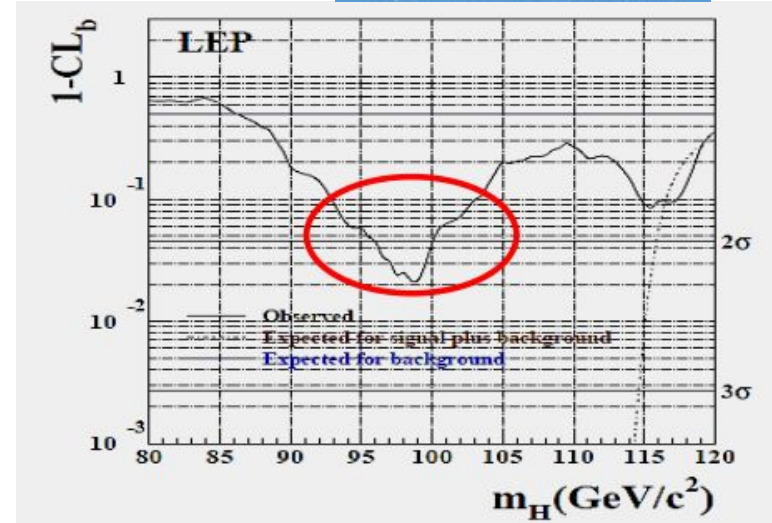
- Contribution constante avec les développement (slide précédent) pour les analyses SM $H \rightarrow \gamma\gamma$ pour le Run 2:
 - 2 publications: Higgs mass (PLB 805 (2020) 135425) et ttH (PRL 125 (2020) 061801)
 - 6 résultats préliminaires, dont section efficace différentielle - CMS-PAS-HIG-19-015



2) $H \rightarrow \gamma\gamma$ à basse masse: motivation (1/4)

- Résultat définitif de la recherche du boson H au LEP:
 - Excédent $>2\sigma$ @ $m_H = 98 \text{ GeV}$.
- LHC a montré que cet excès ne peut pas être le boson de Higgs SM.
- Possibles interprétations BSM: 2 Higgs Doublet Model, [N]MSSM, Higgs triplet models, light dilaton/axion..

Phys. Lett. B565:61-75,2003



Example:
2 Higgs doublet
model

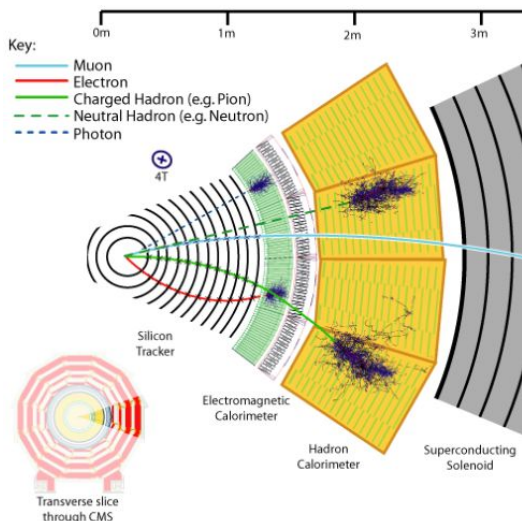
$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}_1$$

$$\Phi_2 = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}_2$$

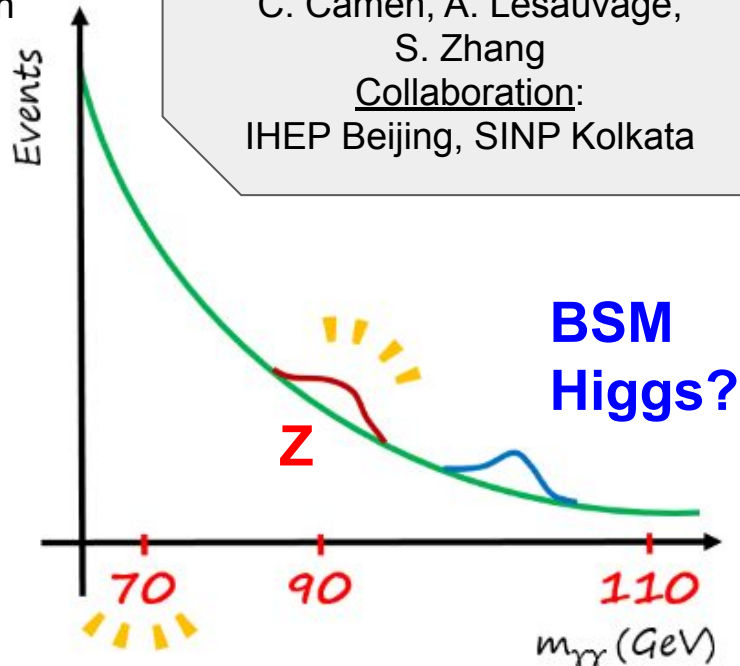
2) $H \rightarrow \gamma\gamma$ à basse masse: au LHC (2013-) (2/4)

Analyse complexe menée par IP2I et les collaborateurs:

- Déclenchement difficile à $M_{\gamma\gamma}$ petit. Le nombre d'événements croît rapidement.
- Bruit de fond relic de $Z \rightarrow ee$:
 - Ce bruit est à 91 GeV et ressemble à un pic.
 - Si on perd la trace un électron ressemble à un photon



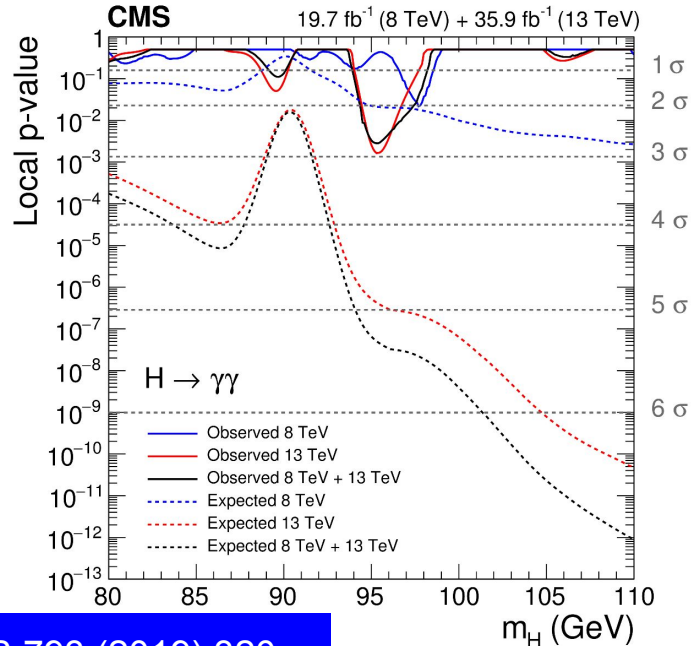
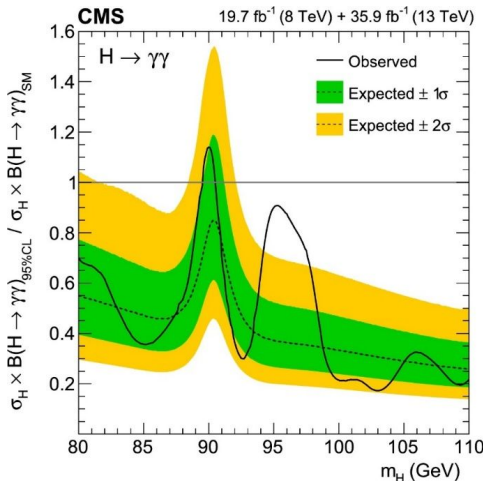
IP2I initiateur et leader du projet:
S. Gascon, M. Lethuillier,
Post-Doc: L. Finco
Thèse :
C. Camen, A. Lesauvage,
S. Zhang
Collaboration:
IHEP Beijing, SINP Kolkata



2) $H \rightarrow \gamma\gamma$ à basse masse: resultats (3/4)

- Run 1 + début Run 2 (¼ des données):
Limites les plus sensibles du LHC + excédent $\sim 3 \sigma$
@ $m \sim 95.3$ GeV.
- Run 2 données complètes: Résultats préliminaires en cours de revue interne.
- Run 3: potentiel de sonder des masses plus basses/signaux ~ 3 fois plus faibles

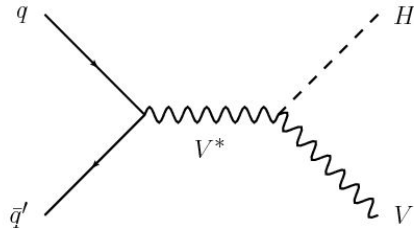
**Limites d'exclusion
(95%)
attendues/observees**



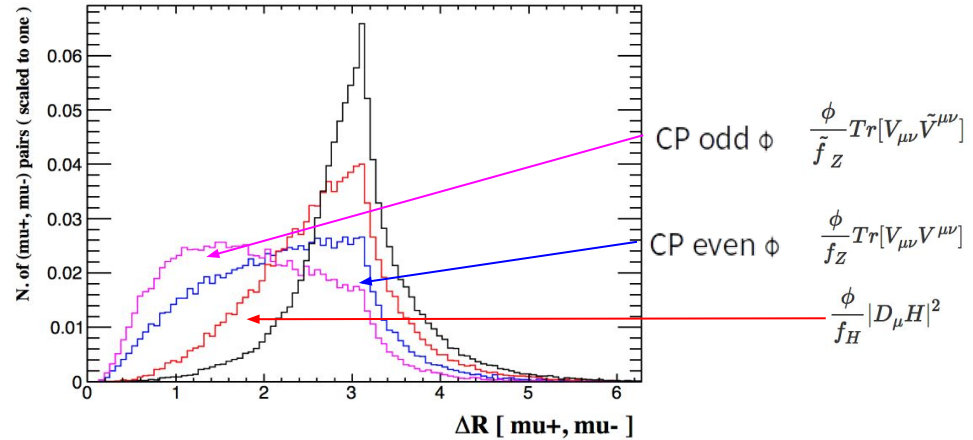
Phys. Lett. B 793 (2019) 320

**'p-values' attendues (SM) /
observees**

2) $H \rightarrow \gamma\gamma$ à basse masse: interprétation (4/4)



- Sonder des (pseudo-) scalaires aux masses plus basses en production associée $\phi(\rightarrow\gamma\gamma)Z(\rightarrow\mu\mu)$:
 - Contraindre n'importe quel modèle BSM par expression en termes de paramètres EFT génériques.
 - Explorer de possibles différences cinématiques pour discrimination



arXiv:1803.10379

arXiv:2002.12220

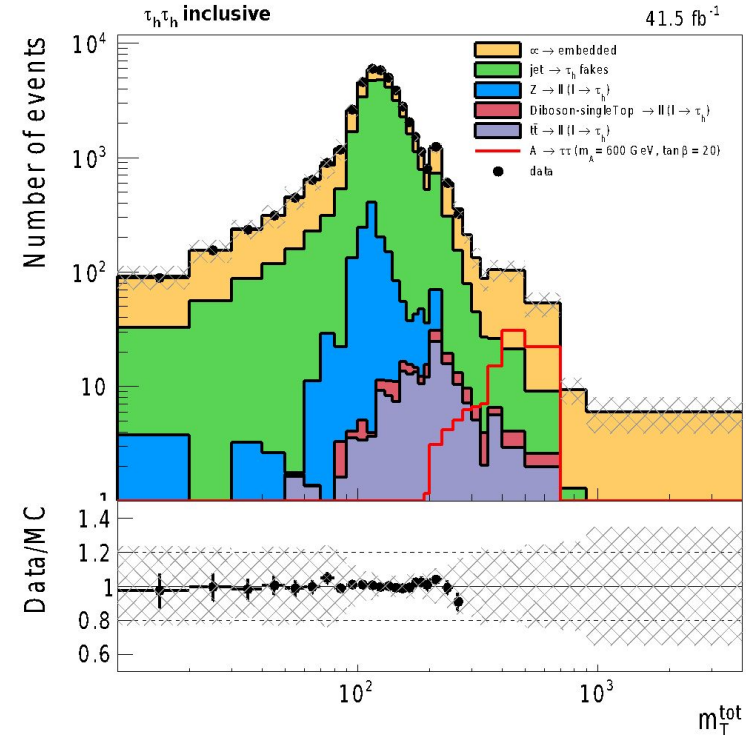
S. Gascon-Shotkin, M. Lethuillier
Post-Doc: L. Finco
Thèse : A. Lesauvage, S. Zhang
Collaboration (théorie): A.
 Angelescu, S. Fichet, G. Moreau

3) Recherche d'un boson de Higgs lourd $H \rightarrow \tau\tau$ au MSSM (haut $\tan\beta$) (2016 -) 1/3

Thèse de Gaël Touquet

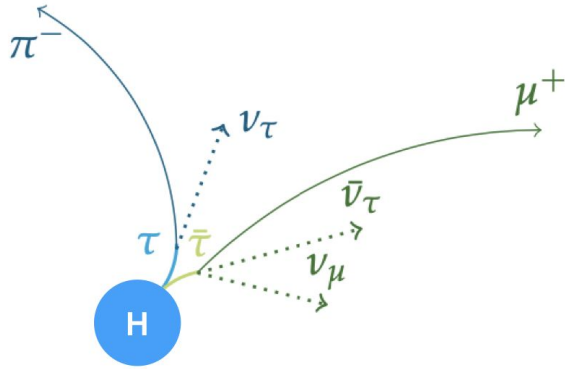
- Thèse G. Touquet (décembre 2019): 1^{er} aperçu des données 2017.
- 2020-2021: Analyse basée sur les données Run 2.
- Scénario à violation CP considéré.
- Reconstruction de masse di- τ via Deep Neural Network (DNN) en cours.

Colin Bernet,
Post-Doc: Ece Asila
Thèse:
Gaël Touquet,
Lucas Torterotot

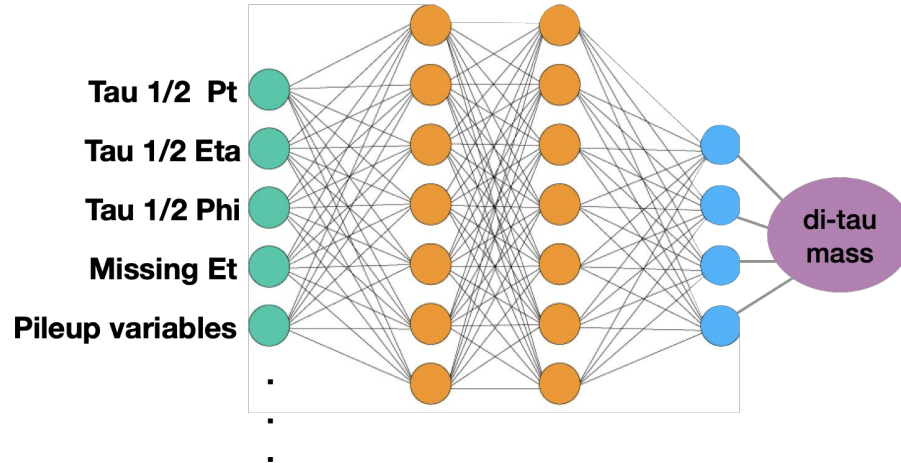


3) Reconstruction de masse di- τ via deep learning (2/3)

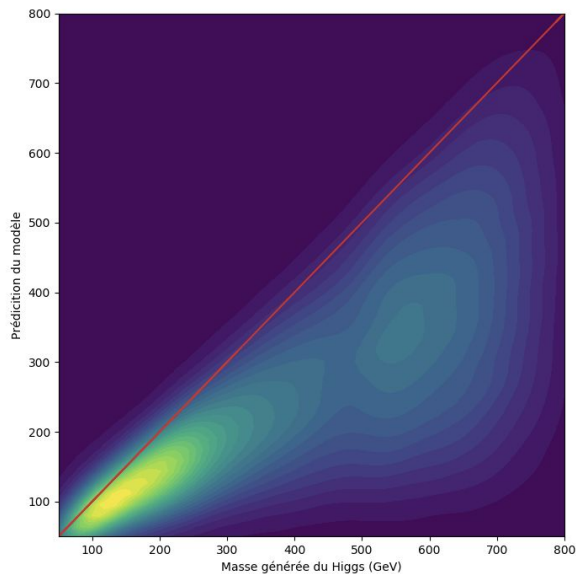
Contribution de IP2I:



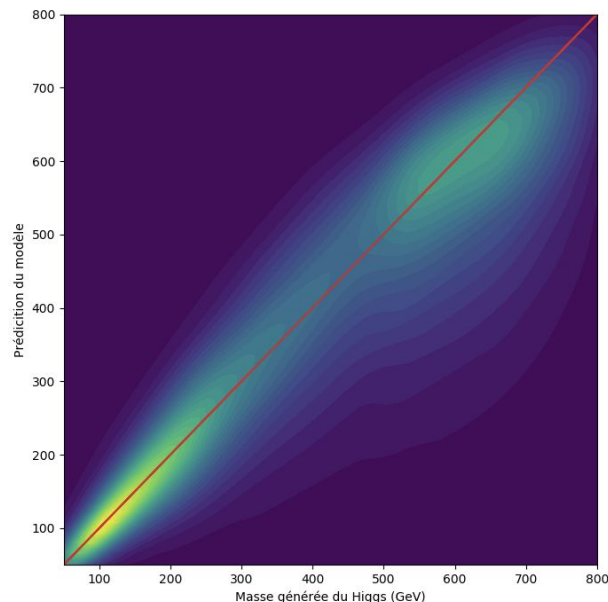
- La masse invariante du système di- τ ne peut-être déterminée analytiquement à cause des neutrinos produits dans la désintégration des deux τ .
- Nous entraînons un réseau de neurones (Deep Neural Network) pour identifier les 4-vecteurs des neutrinos de chaque τ .



3) Reconstruction de masse di- τ via DNN (3/3)



Resultats
internes

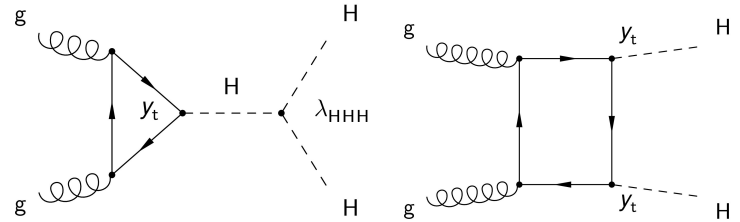
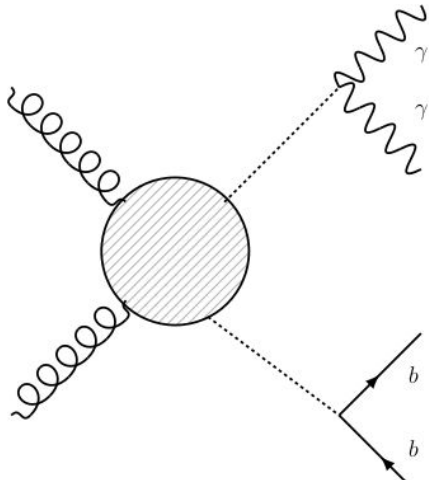


Discriminant actuel utilisé par CMS pour l'analyse MSSM $H \rightarrow \tau\tau$ Prends en compte que la masse visible et la masse manquante.

Les résultats DNN incluant les détails de la reconstruction et du Pile-Up.

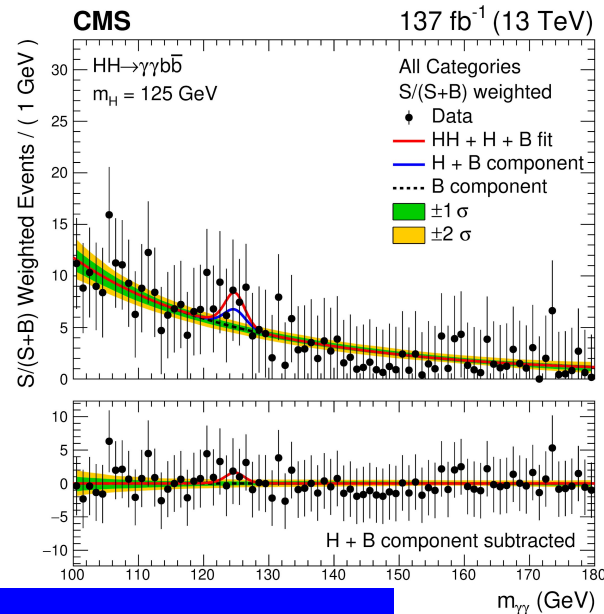
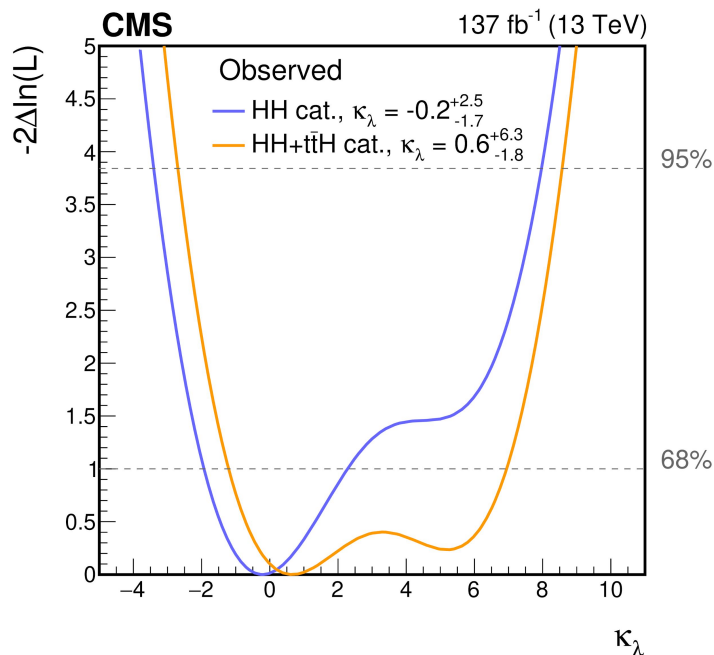
4) Auto-couplage du boson de Higgs (2013 -) 1/3

- Mesure directe: production HH
- Très difficile: section efficace HH 1000 fois plus faible que la production H (interférence destructrice).
- Etat finaux les plus sensibles: $HH \rightarrow 2b2\gamma$, $HH \rightarrow 4b$, $HH \rightarrow 2b2\tau$, $HH \rightarrow 2b2W$.



M. Gouzevitch
Collaboration: BINP (Novosibirsk Russia),
Saclay (France), Bangalore (India)
Collaboration with theorists.

4) Auto-couplage du boson de Higgs (2/3)



[arXiv:2011.12373](https://arxiv.org/abs/2011.12373), sub. JHEP

- Résultats Run 2 (Nov. 2020): amélioration de précision plus que 3 fois comparé aux données 2016 qui ont servi aux projections HL-LHC (voir talk Susanne).
- Rôle de IP2I essentielle et centrale dans l'analyse.
- Exclu: **7.7 σ_{SM}** (attendu - **5.2 σ_{SM}**)

4) Auto-couplage du boson de Higgs (3/3)

Depuis 2017:

- **3 publications CMS sur l'état final $HH \rightarrow 2b2\gamma$** , incluant le résultat Run 2: [arXiv:2011.12373](https://arxiv.org/abs/2011.12373) sub. to JHEP
- **2 publications CMS sur l'état final $HH \rightarrow 4b$** (contribution de IP2I terminée en 2018).
- **5 publications et papiers de conférence phénoménologiques**. Notamment:
 - Higgs physics Yellow Report 4 ([arXiv:1610.07922](https://arxiv.org/abs/1610.07922)),
 - HL/HE-LHC projection (<https://arxiv.org/abs/1902.00134>)
 - Higgs boson potential at colliders: Status and perspectives (REVIP (2020) 100045)

Projets Run 3:

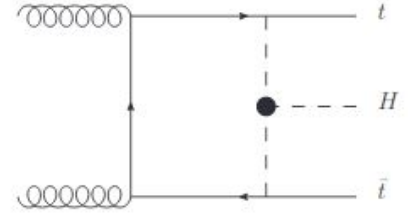
- **Analyse $HH \rightarrow 2b2\gamma$**
- Processus rares: $ttHH$, VHH , $VBF\ HH$
- Participation à la combinaison de tous les canaux Run 2 + Run 3 et des deux expériences (ATLAS et CMS).

Objectif (ambitieux):

- Se rapprocher $O(\sigma_{SM})$
- Exclure les valeurs de $\kappa_\lambda < 0$, ie montrer que le Higgs peut se coupler à lui même.

5) Auto-couplage du boson de Higgs: corrections EW (2020 -)

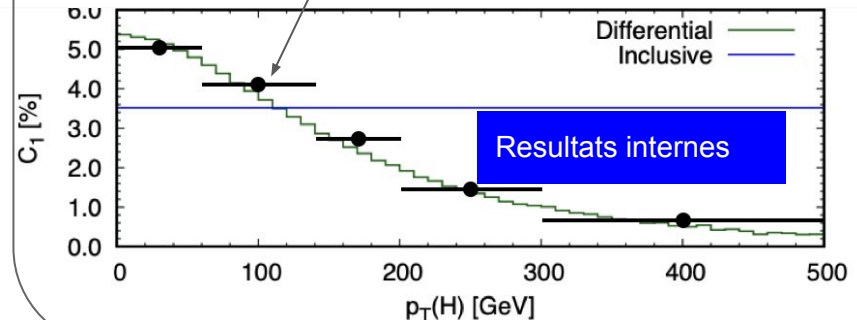
- L'auto-couplage $\lambda_{HHH}^{\text{SM}}$ du boson Higgs contribue aux corrections EW à la production du boson de Higgs.
 - Si $\kappa_\lambda \neq 1$ des effets de corrections significatives peuvent apparaître.
 - On peut interpréter: $\sigma_{\text{exp}}(\text{H+X})/\sigma_{\text{th}}(\text{H+X}) = f(\kappa_\lambda)$
- Corrections inclusives EW pour CMS existent.
- Corrections différentielles restent à faire:
 - Travail de IP2I (outils existent).



Example:

Our calculations for ttH production

Theoretical publication:
<https://arxiv.org/pdf/1709.08649.pdf>

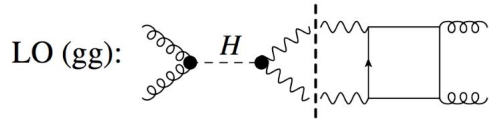


Maxime Gouzevitch
Post-Doc: Ece Asilar

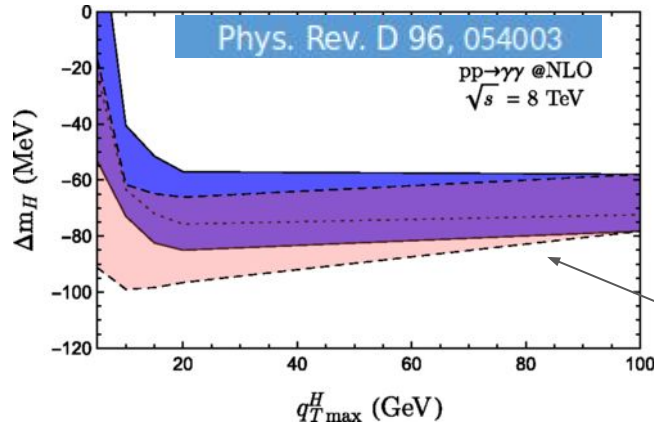
6) Largeur du boson de Higgs via l'interférence (2011 -)

$gg \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$ / QCD $\gamma\gamma$

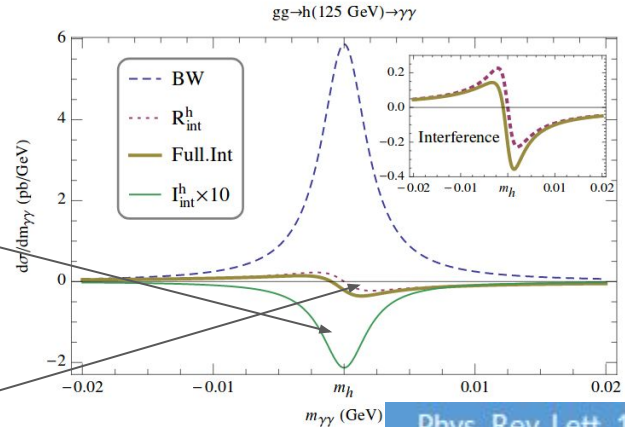
S. Gascon, M. Gouzevitch
 Collaboration: IHEP-Beijing, SINP Koltata, Uminn, TH



- Deux observables pour contraindre Γ : $\Delta M, \Delta\sigma = f(\Gamma, p_{T,H})$
- Run 1: premières estimations - 2% sur σ (effet faible).
- Théorie: calculs récents NLO+Resommation - effet plus fort.
- Run 2: Precision attendue sur la mesure Run 2 de $m_H \sim O(100)$ MeV). Interference = source d'incertitude significative.
- Premier résultats sur les données Run 2, puis Run 3.



Partie imaginaire:
 petite diminution
 de la section
 efficace

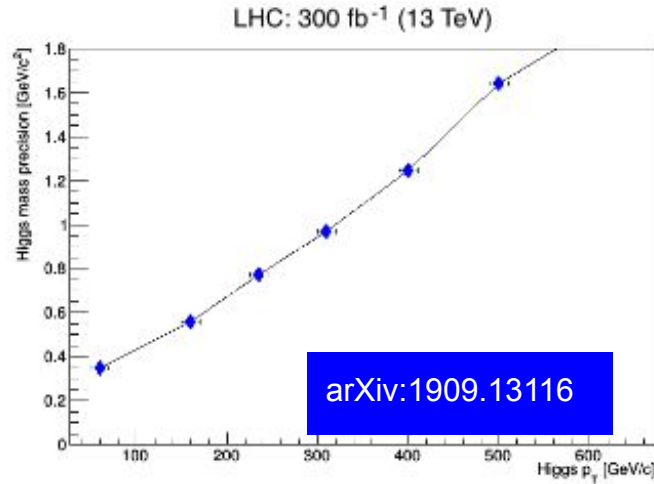


Partie réelle: Décalage du pic de masse dépendant de l'impulsion transverse du Higgs

7) Masse du boson de Higgs et la naturalité (2018 -)

Déstabilisation de m_H avec les corrections SM.

$$\frac{\delta m_h^2}{m_h^2} = \frac{3G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} \left(\frac{4m_t^2}{m_h^2} - \frac{2m_W^2}{m_h^2} - \frac{m_Z^2}{m_h^2} - 1 \right) \Lambda^2 = \left(\frac{\Lambda}{500 \text{ GeV}} \right)^2$$



- La masse des bosons (Z, W, H) et top est la quantité la mieux mesurée au LHC (précision < 1%).
- Idée: voir si en étudiant $m_H = f(p_T, H)$ on peut voir des effets des corrections $\log p_T$ ou p_T^2 qui pourraient pointer vers la physique BSM qui stabilise m_H .
- Note de conférence DPF2019.
- Papier de motivation en préparation ainsi qu'une mesure CMS avec les données Run 2.

M. Gouzevitch
Collaboration: PNPI, Russie

Les années à venir

- Les projets/axes finalisés / publiés :
 - Recherche resonance en $H \rightarrow t\bar{t}$
 - Section efficace top+Z
 - Couplage Yukawa top
 - Recherche $HH \rightarrow 4b$
- Les projets/axes en cours de finalization (2021):
 - Recherche MSSM $H \rightarrow \tau\tau$
 - Section efficace γ + b-jets
- Projets sur lesquels nous nous sommes recentrés:
 - Higgs:
 - $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ à basse masse, la mesure de la largeur avec l'interférence $H \rightarrow \gamma\gamma$ / QCD $\gamma\gamma$.
 - Top:
 - Mesure des symétries globales dans le secteur du top
 - Recherche d'une résonance top+H/Z
 - Pour l'ensemble des sujets ci-dessus IP2I a été initiateur (ou parmi les initiateurs) et leader.

Back Up

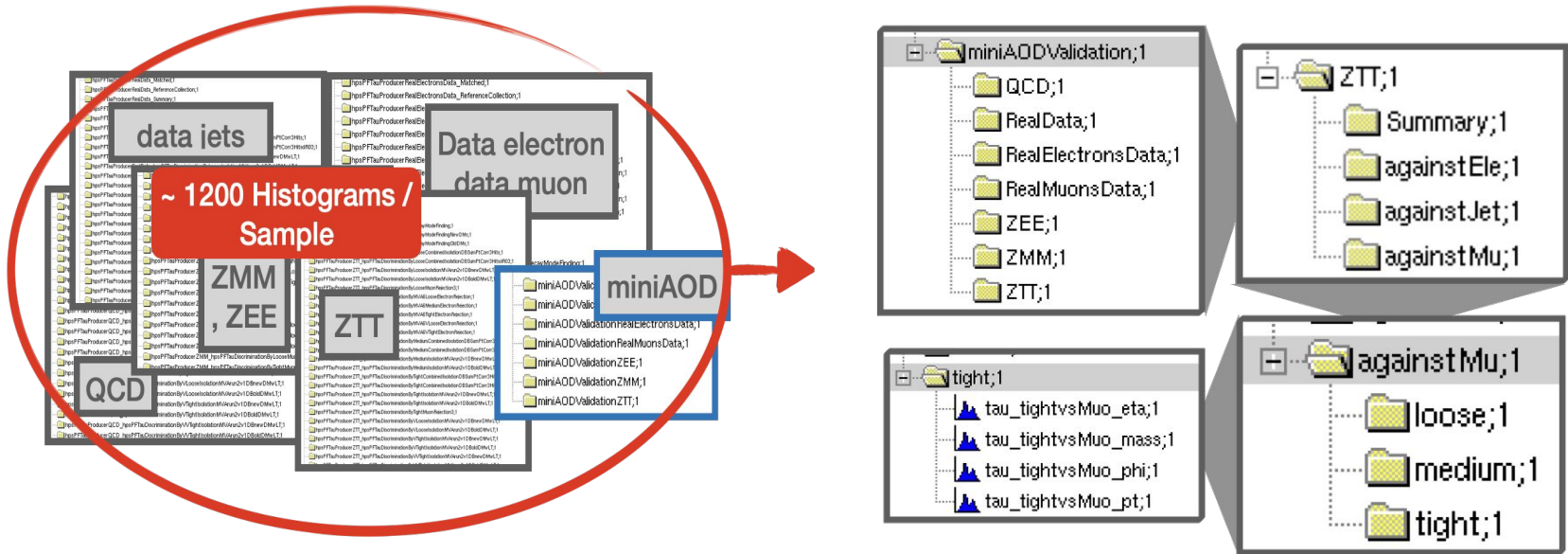
iP2i

LES 2 INFINIS
LYON



Tau Data Quality Monitoring

- A long lasting problem of very heavy and complicated structure Tau DQM setup is organised and new functionalities that are crucial for deciding the quality of data has been implemented.
- A presentation was given in CMS Week March 2020
- The work is planned to be completed in January 2021



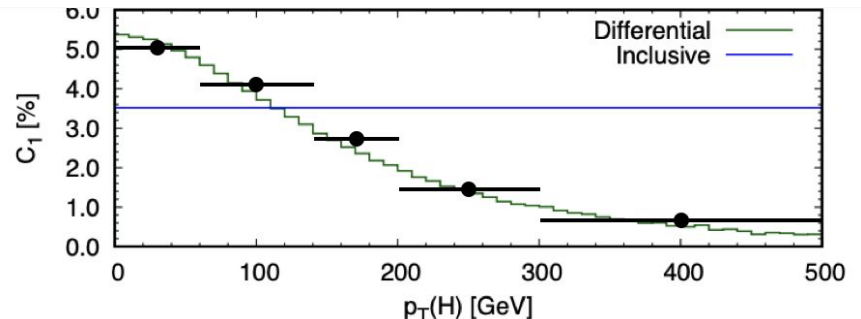
Reinterpretation for constraining λ_{HHH}

- C_1 is a process and kinematics-dependent linear coefficient that provides the sensitivity of the measurement κ_λ where $\lambda_{\text{HHH}} = \kappa_\lambda \lambda_{\text{HHH}}^{\text{SM}}$

$$C_1^\sigma = \frac{\sum_{i,j} \int dx_1 dx_2 f_i(x_1) f_j(x_2) 2\Re \left(\mathcal{M}_{ij}^{0*} \mathcal{M}_{\lambda_3^{\text{SM}},ij}^1 \right) d\Phi}{\sum_{i,j} \int dx_1 dx_2 f_i(x_1) f_j(x_2) |\mathcal{M}_{ij}^0|^2 d\Phi}$$

- The idea is to calculate C_1 values in STXS bins and obtain the scan for κ_λ for $t\bar{t}H, H \rightarrow \tau\tau$ and combine with double Higgs analysis. We are in collaboration with LLR.
- A presentation is given in the CMS Higgs Combination group on 20.10.2020.
- As a side outcome of this work, automatized framework will be also presented to LHC cross section group to standardise the calculation among all CMS & ATLAS groups.

Comparison of our (black points) automatized calculation of C_1 to the referenced theoretical paper for $t\bar{t}H$ mode at 13 TeV at LHC in STXS stage 1.2 bins.

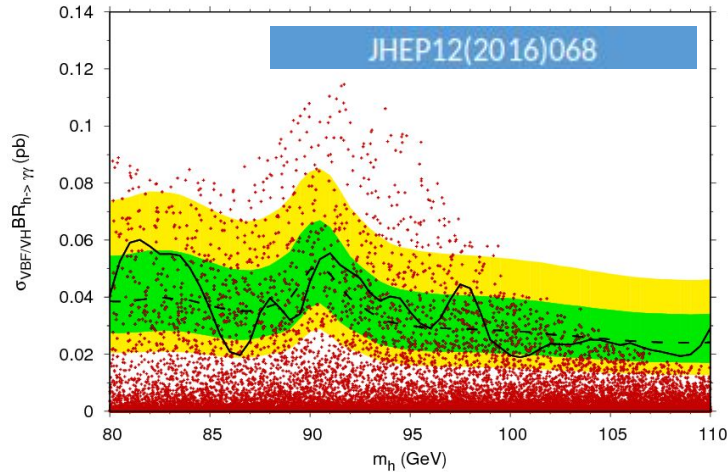


5) $H \rightarrow \gamma\gamma$ à basse masse: interprétation (4/4)

- Interprétation des résultats du Run 1 (8 TeV) en 2HDM Type 1:

- Exclusion des points rouges se trouvant au-dessus de la limite, modes de production VBF + VH

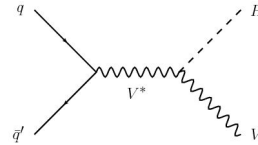
Resultats de CMS-PAS-HIG-14-037



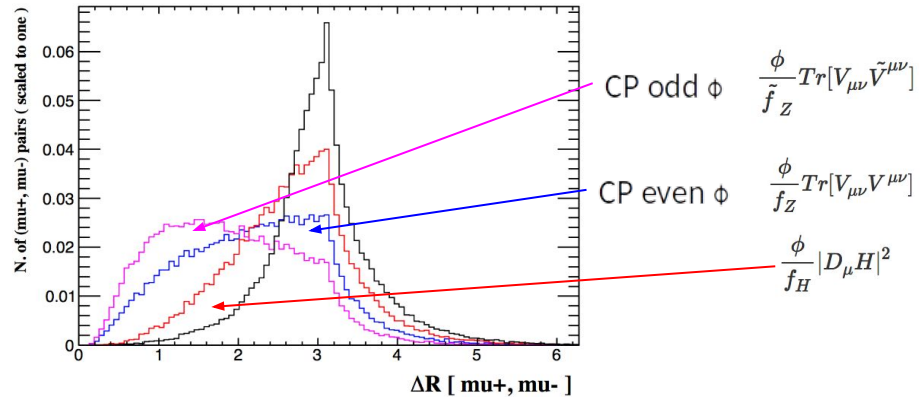
Collaboration:

IHEP-Beijing, G. Cacciapaglia, A. Deandrea, S. Le Corre, Groupe Théorie IP

- Sonder des (pseudo-) scalaires aux masses plus basses en production associée $\phi(-\rightarrow\gamma\gamma)Z(-\rightarrow\mu\mu)$:



- Contraindre n'importe quel modèle BSM par expression en termes de paramètres EFT génériques.
- Explorer de possibles différences cinématiques pour discrimination



arXiv:1803.10379

arXiv:2002.12220

Collaboration: A. Angelescu, S. Fichet, G. Moreau