

# Chapitre X

## Calibration en énergie des jets

### Sommaire

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Formation des jets</b>	<b>2</b>
2.1	Gerbe partonique	2
2.2	Hadronisation	3
<b>3</b>	<b>Reconstruction des jets</b>	<b>4</b>
3.1	Algorithmes de regroupement	5
3.2	Identification des jets dans CMS	6
3.3	Saveur des jets	7
<b>4</b>	<b>Calibration en énergie des jets dans CMS</b>	<b>10</b>
4.1	Correction de l'empilement	13
4.2	Correction de la réponse du détecteur en $p_T$ et en $\eta$	14
4.3	Corrections résiduelles	15
4.4	Incertitude sur la correction en énergie des jets	18
4.5	Correction de la résolution en énergie	18
<b>5</b>	<b>Phénoménologie des événements <math>\gamma + \text{jets}</math></b>	<b>20</b>
5.1	Principe des événements $\gamma + \text{jets}$ et réponse balancée	20
5.2	Activité additionnelle des jets	22
<b>6</b>	<b>Correction résiduelle absolue en <math>p_T</math> avec les événements <math>\gamma + \text{jets}</math></b>	<b>22</b>
6.1	Événements utilisés	22
6.2	Analyse	26
6.3	Résultats	31
<b>7</b>	<b>Correction de la résolution en énergie avec les événements <math>\gamma + \text{jets}</math></b>	<b>38</b>
7.1	Définition de la résolution en énergie des jets	39
7.2	Analyse	39
7.3	Résultats	41
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>41</b>

---

### 1 Introduction

L'interaction forte est abordée dans le chapitre 2. Les particules portant une charge de couleur non nulle y sont sensibles. Il s'agit des quarks et des gluons, également nommés « partons ». La constante de couplage de l'interaction forte,  $\alpha_s$ , décroît avec l'énergie. Ainsi se produit à haute énergie le phénomène de « liberté asymptotique ».

L'échelle d'énergie atteinte au LHC, de l'ordre du TeV, permet de réaliser des calculs perturbatifs car dans ce cas  $\alpha_s \rightarrow 0$ . Toutefois, cela n'est vrai qu'au moment de la collision initiale entre les protons. En effet, les partons issus de cette collision, du fait de l'interaction forte à laquelle ils sont sensibles, vont émettre d'autres partons. Par conservation de l'énergie, l'énergie portée par une de ces particules diminue au fur et à mesure de ces émissions et  $\alpha_s$  augmente. Arrivé à des énergies de l'ordre de la centaine de MeV, il n'est plus possible de réaliser des calculs perturbatifs. Le phénomène de confinement de couleur réapparaît alors et les partons sont ainsi confinés au sein de hadrons, dont

la charge de couleur est nulle. Ce processus est appelé « hadronisation ». Les partons produits lors des collisions de haute énergie se manifestent ainsi sous la forme d'un flux collimé de particules, un « jet ».

Le LHC fait se collisionner des protons, aussi la collision a réellement lieu entre les constituants des protons, c'est-à-dire les quarks et les gluons. Lors des collisions de protons, il y a donc une forte probabilité d'interaction par interaction forte. De plus, les particules lourdes, instables, peuvent émettre des quarks en se désintégrant. De nombreux partons sont ainsi émis lors des collisions de protons au LHC. Il en résulte une omniprésence des jets dans les analyses réalisées dans l'expérience CMS. Leur caractérisation est donc un point essentiel pour la collaboration. Or, les jets sont des objets physiques composés de nombreuses particules. La calibration en énergie des jets est ainsi nécessaire afin d'obtenir une estimation de leur énergie « vraie » la plus fidèle possible.

Le processus de formation des jets est décrit d'un point de vue théorique dans la section 2. Puis, la méthode de reconstruction des jets dans le cadre de l'expérience CMS est présentée dans la section 3. Ensuite, le principe de la calibration en énergie des jets dans l'expérience CMS est abordé dans la section 4. Une des étapes de la calibration en énergie des jets est discutée plus en détails. La section 5 présente la phénoménologie des événements utilisés et la section 6 aborde la calibration en énergie des jets à l'aide de ces mêmes événements. Enfin, la correction de la résolution en énergie des jets à l'aide de ces mêmes événements est présentée dans la section 7.

## 2 Formation des jets

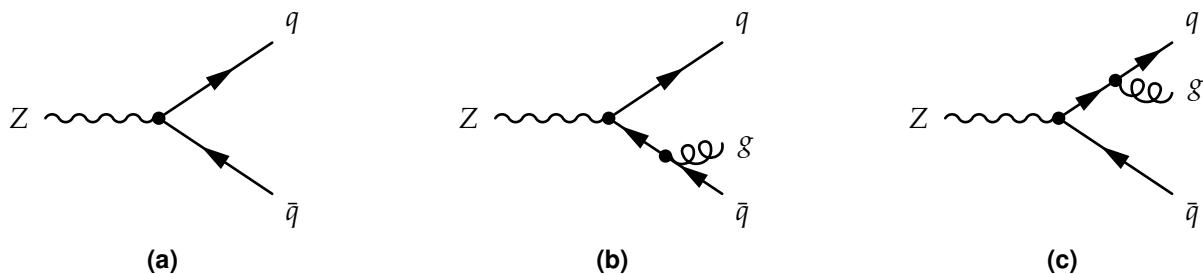
Lorsqu'un parton est issu de la collision, il possède une haute énergie et émet alors, par interaction forte, d'autres partons. Par conservation, l'énergie portée par chaque parton ainsi obtenu diminue et par conséquent,  $\alpha_s$  augmente.

Tant que l'échelle d'énergie est suffisamment grande pour que  $\alpha_s \ll 1$ , ce qui correspond à des énergies supérieures à la centaine de MeV, il est possible de réaliser des calculs perturbatifs. L'émission de partons crée la « gerbe partonique », sujet de la prochaine section.

Au fur et à mesure des émissions, l'échelle en énergie diminue et en deçà d'une centaine de MeV, il n'est plus possible de réaliser des calculs perturbatifs car  $\alpha_s$  augmente. Des modèles paramétriques sont alors utilisés pour caractériser le phénomène d'« hadronisation », abordés ensuite.

### 2.1 Gerbe partonique

Lorsqu'un parton est issu d'une collision au LHC, il se trouve dans un premier temps dans le régime de liberté asymptotique. Il émet alors d'autres partons. Ainsi, pour un événement  $Z \rightarrow q\bar{q}$  comme celui de la figure X.1a avec deux quarks dans l'état final, il est possible d'obtenir par émission d'un gluon un état  $q\bar{q}g$  comme ceux illustrés sur les figures X.1b et X.1c, par exemple.



**Figure X.1 –** Un boson  $Z$  se désintègre en paire quark-antiquark. Dans les cas des figures X.1b et X.1c, un gluon supplémentaire est émis.

Il est légitime de se demander quelle est la probabilité d'obtenir un état  $q\bar{q}g$  à partir d'un état  $q\bar{q}$ . Des calculs de section efficace permettent d'obtenir [1], pour un état initialement à  $X$  partons dont un parton  $i$  émet un parton  $j$ ,

$$d\sigma_{X+j} \simeq \sigma_X \sum_{i \in \{X\}} \frac{\alpha_s}{2\pi} \frac{d\theta^2}{\theta^2} dz P_{ij}(z) \quad (\text{X.1})$$

où  $\theta$  est l'angle entre le parton émis  $j$  et le parton émetteur  $i$ . La grandeur  $P_{ij}(z)$  est la probabilité qu'un parton de type  $i$  émette un parton de type  $j$  emportant une fraction  $z$  de l'énergie initiale de  $i$ , qui s'exprime

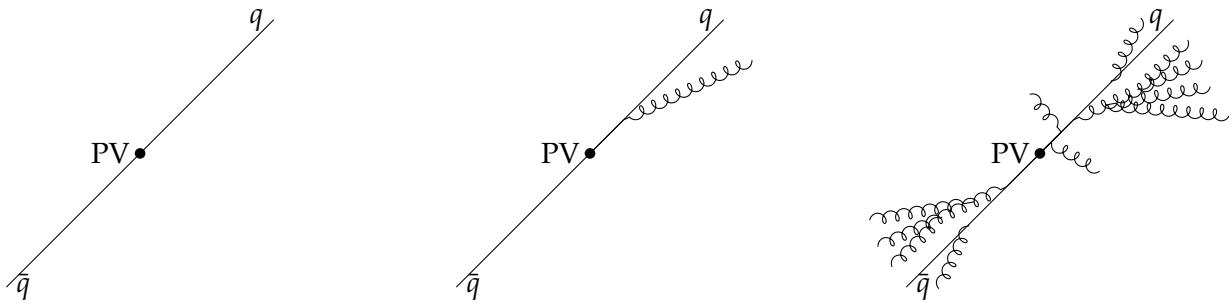
$$P_{qq}(z) = C_F \frac{1+z^2}{1-z}, \quad P_{qg}(z) = C_F \frac{1+(1-z)^2}{z}, \quad (\text{X.2})$$

$$P_{gg}(z) = C_A \frac{z^4 + 1 + (1-z)^4}{z(1-z)}, \quad P_{gq}(z) = T_R(z^2 + (1-z)^2), \quad (\text{X.3})$$

et  $P_{g\bar{q}}(z) = P_{gq}(z)$ , avec  $C_F = \frac{4}{3}$ ,  $C_A = 3$  et  $T_R = \frac{1}{2}$ . La probabilité d'émettre un parton supplémentaire diverge dans deux cas :

- le parton émis a une énergie faible devant celle du parton émetteur, c'est la limite infrarouge ;
- l'angle entre le parton émis et le parton émetteur est petit, c'est la limite colinéaire.

Les nouveaux partons ainsi émis et les partons initiaux continuent chacun ce processus jusqu'à ce que le phénomène de confinement de couleur réapparaisse. Pour un unique parton directement issu de la collision, une gerbe partonique est formée, c'est-à-dire un ensemble collimé de partons, comme illustré sur la figure X.2. Ce sont ces particules qui vont participer au phénomène d'hadronisation dû au confinement de couleur.



**(a)** Deux quarks sont initialement produits, ce qui correspond au diagramme de la figure X.1a.

**(b)** Un des quarks peut émettre un gluon, ce qui correspond au diagramme de la figure X.1c.

**(c)** Le processus est réitéré, donnant un ensemble de particules colorées.

**Figure X.2 – Formation de deux gerbes partoniques à partir d'une paire de quarks.**

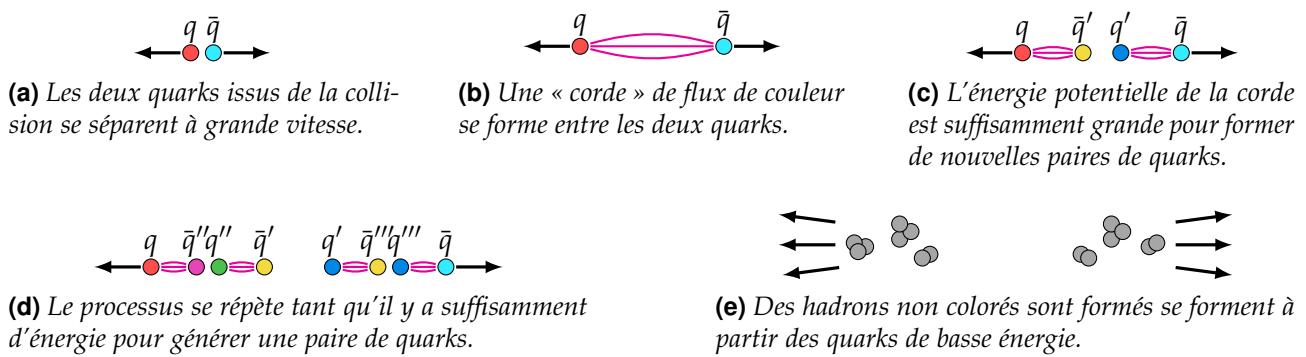
## 2.2 Hadronisation

Lorsque des partons en émettent d'autres, la conservation de l'énergie implique que chaque particule, individuellement, possède une énergie de plus en plus petite. Or, comme cela est discuté dans le chapitre 2,  $\alpha_s$  augmente lorsque l'échelle d'énergie diminue et en-deçà de quelques centaines de MeV,  $\alpha_s$  diverge. Le phénomène de confinement de couleur réapparaît et la gerbe partonique subit le phénomène d'hadronisation. Un flux collimé de hadrons, particules de charge de couleur nulle composées de partons, est alors obtenu. Certains de ces hadrons peuvent comporter des quarks de deuxième ou troisième génération. Ils sont alors instables et peuvent être amenés à se désintégrer, auquel cas ce sont leurs produits de désintégration qui sont observés dans le détecteur.

Le phénomène d'hadronisation ayant lieu lorsque  $\alpha_s \gg 1$ , il n'est pas possible de réaliser des calculs perturbatifs. Afin de décrire ce phénomène, il faut avoir recours à des modèles paramétriques. Deux d'entre eux sont décrits ci-après, le modèle des cordes de Lund [2] et le modèle d'agglomération hadronique [3].

### 2.2.1 Modèle des cordes de Lund

Dans le modèle des cordes de Lund [2], les quarks sont reliés en paires  $q\bar{q}$  par des « cordes » de couleur, de tension  $\kappa \simeq 1 \text{ GeV} \cdot \text{fm}^{-1}$ , comme sur la figure X.3b. Les gluons sont décrits comme des noeuds des cordes de couleur.



**Figure X.3 –** Processus de formation de deux jets dans le cadre du modèle des cordes de Lund.

Lorsque deux charges colorées s'éloignent, l'énergie potentielle augmente. Une fois que l'énergie potentielle est suffisamment grande, une nouvelle paire  $q'\bar{q}'$  est créée (fig. X.3c), avec une probabilité proportionnelle à  $\exp(-\frac{\pi}{\kappa} m_{q'})$ ; la probabilité d'obtenir des quarks lourds par ce processus est donc très faible. Le partage de l'énergie entre les paires de quarks est régi par une fonction de partition dont les paramètres sont estimés expérimentalement.

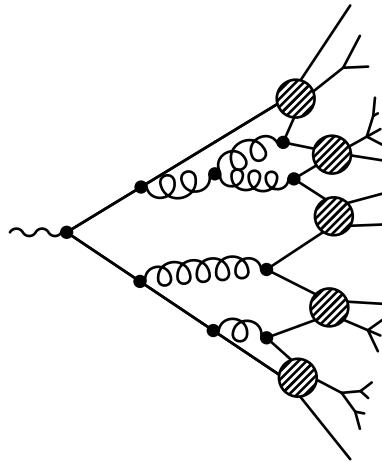
### 2.2.2 Modèle d'agglomération hadronique

L'agglomération hadronique [3] repose sur l'hypothèse de conservation des nombres quantiques ainsi que de l'énergie-impulsion entre les partons issus de la gerbe hadronique et les hadrons obtenus après hadronisation.

Dans un premier temps, les gluons de la gerbe partonique se désintègrent en paires  $q\bar{q}$ . Les partons, uniquement des quarks à ce stade donc, se rassemblent dans un second temps en aggrégats de charge de couleur nulle, c'est le « pré-confinement ». Deux cas de figurent se présentent alors :

- la masse de l'agrégat est proche de celle d'un hadron, l'agrégat produit ce hadron ;
- la masse de l'agrégat n'est pas proche de celle d'un hadron et son énergie est supérieure à un seuil  $Q_0$ , cet agrégat se désintègre en agrégats plus petits et forme plusieurs hadrons.

Ce processus est illustré sur la figure X.4.



**Figure X.4 –** Schématisation de l'hadronisation dans le cadre du modèle d'agglomération hadronique.

## 3 Reconstruction des jets

Les partons ne peuvent donc pas être directement observés dans le détecteur. Leur signature expérimentale est un flux collimé de particules stables composé de hadrons, de leptons et de photons. La présence de hadrons s'explique directement par le processus d'hadronisation décrit dans la section précédente. Les leptons proviennent de la désintégration, par interaction faible, des hadrons de saveur lourde, ou plus précisément des quarks de deuxième et troisième génération composant ces hadrons lourds. Les photons sont émis par les particules électriquement chargées.

Un processus physique comme celui de la figure X.1a produit seulement quelques particules, en l'occurrence deux, et non des ensembles de particules, comme sur la figure X.4 qui pourrait correspondre à l'état effectivement observé pour le processus de la figure X.1a. Afin de pouvoir étudier le processus initial, il est nécessaire de définir une observable décrivant les partons à l'origine de ces flux collimatifs de particules stables.

Cette observable est un « jet ». À partir des particules identifiées à l'aide de l'algorithme de *Particle Flow* (PF) décrit dans la section 4 du chapitre 3, un algorithme de regroupement permet d'obtenir la liste des jets de l'événement. Il existe plusieurs algorithmes de regroupement dont le principe est décrit dans la section suivante.

### 3.1 Algorithmes de regroupement

Il existe deux catégories d'algorithmes permettant de regrouper les particules en jets, les algorithmes de cônes et les algorithmes de recombinaison séquentielle. Les émissions de partons sont plus importantes pour de basses énergies (limite infrarouge) ou pour un parton émis colinéaire au parton initial (limite colinéaire), comme discuté dans la section 2. Afin de conserver des prédictions de QCD vérifiables sur des jets réels, les algorithmes de regroupement doivent être insensibles à l'ajout d'une particule de basse énergie ou au partage d'une particule en deux particules d'énergies inférieures. C'est ce que l'on appelle l'insensibilité IRC, pour *InfraRed and Colinear*. La plupart des algorithmes de cônes ne sont pas IRC-insensibles, alors que la plupart des algorithmes de recombinaison séquentielle le sont.

#### 3.1.1 Les algorithmes de cônes

Les algorithmes de cônes regroupent toutes les particules ayant une direction  $\vec{p}$  telle que la distance  $\Delta R_{pa}$  à la direction de l'axe du cône  $\vec{a}$  dans le plan  $(\eta, \phi)$ , où  $\eta$  et  $\phi$  sont les coordonnées définies dans la section 2.1 du chapitre 3, est inférieure à une distance de coupure  $R_c$ , c'est-à-dire si

$$\Delta R_{pa}^2 = (\eta_p - \eta_a)^2 + (\phi_p - \phi_a)^2 < R_c^2. \quad (\text{X.4})$$

Alors, la direction  $\vec{a}$  du cône est redéfinie comme étant la direction moyenne de toutes les particules rassemblées dans ce cône. Ce processus est itéré jusqu'à la stabilisation des cônes. Enfin, les cônes sont séparés en cas de superposition, une particule ne pouvant appartenir qu'à un seul jet.

L'algorithme *Seedless Infrared Safe Cone* ou SISCONE [4] est un exemple d'algorithme de cônes IRC-insensible. Dans un premier temps, tous les cônes stables possibles sont reconstruits. Ces cônes sont alors fusionnés, les cônes ayant l'impulsion transverse la plus grande absorbant des cônes d'impulsion transverse moindre dont ils contiennent déjà une fraction des constituants. Un exemple de reconstruction de jets à l'aide de l'algorithme SISCONE est présenté sur la figure X.5.

#### 3.1.2 Les algorithmes de recombinaison séquentielle

Les algorithmes de recombinaison séquentielle commencent par considérer que chaque particule forme un pseudo-jet d'une seule particule [5]. Puis, à l'aide d'une métrique donnée, la paire de jets les plus proches entre eux fusionne en un seul jet tant que la distance entre eux est en-deçà d'une valeur seuil. Les jets fusionnés donnent la liste des jets de l'événement. Il est également possible de fixer le nombre de jets à déterminer et non la valeur seuil de la distance entre les jets à fusionner.

Plusieurs métriques de distance peuvent être définies, chacune correspondant à un algorithme de recombinaison séquentielle proposant des regroupements différents.

**Algorithme  $k_T$**  [6] La distance  $d_{ij}$  entre deux jets  $i$  et  $j$  est

$$d_{ij} = \min(p_{T_i}^2, p_{T_j}^2) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}, \quad (\text{X.5})$$

où

$$\Delta R_{ij}^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2 \quad (\text{X.6})$$

avec  $\eta_x$  la pseudo-rapidité,  $\phi_x$  l'angle azimutal et  $p_{T_x}$  l'impulsion transverse du jet  $x$  et  $R$  un paramètre libre. Cet algorithme a l'avantage de regrouper les particules très fidèlement vis-à-vis de la gerbe hadronique, mais les jets obtenus possèdent une géométrie spatiale irrégulière, comme cela se voit sur la figure X.5.

**Algorithme de Cambridge/Aachen [7, 8]** La distance  $d_{ij}$  entre deux jets  $i$  et  $j$  est

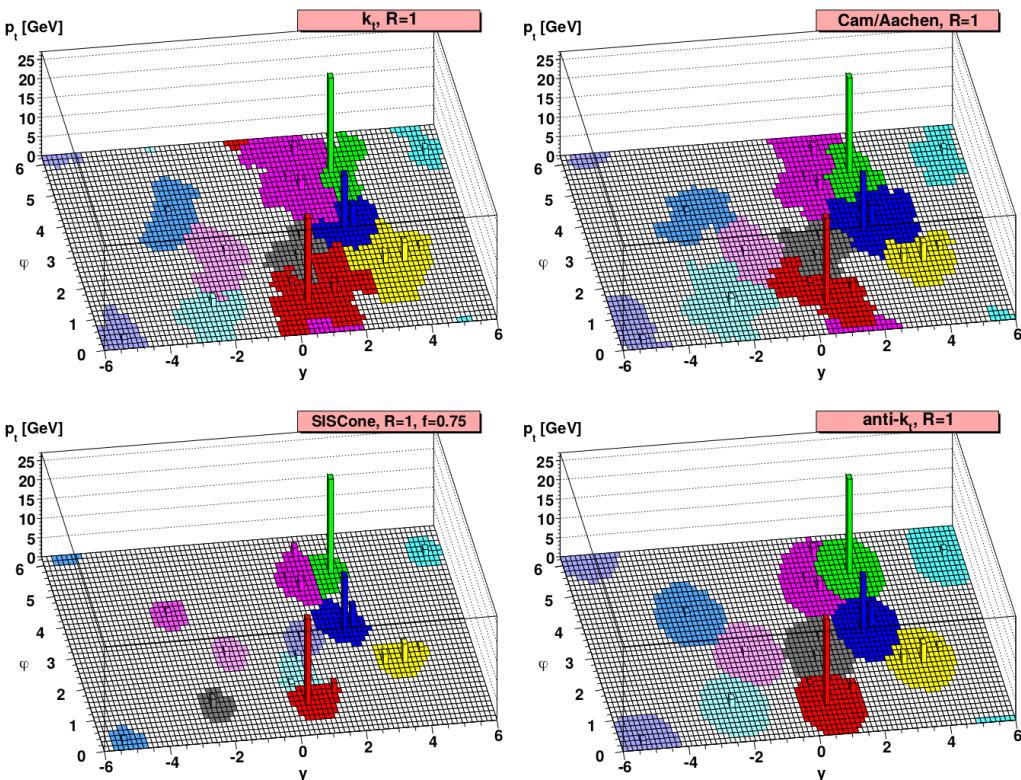
$$d_{ij} = \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}, \quad (\text{X.7})$$

où  $\Delta R_{ij}^2$  est défini par l'équation (X.6) et  $R$  est un paramètre libre. Le regroupement des jets est ainsi uniquement basé sur l'écart angulaire.

**Algorithme anti- $k_T$  [9]** La distance  $d_{ij}$  entre deux jets  $i$  et  $j$  est

$$d_{ij} = \min \left( \frac{1}{p_{T_i}^2}, \frac{1}{p_{T_j}^2} \right) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}, \quad (\text{X.8})$$

où  $\Delta R_{ij}^2$  est défini par l'équation (X.6),  $p_{T_x}$  l'impulsion transverse du jet  $x$  et  $R$  un paramètre libre. Le regroupement des particules se fait ainsi autour de celles de plus hautes énergies. Cet algorithme propose un regroupement des particules moins fidèle à la gerbe hadronique, mais produit des jets de forme régulière, comme cela se voit sur la figure X.5.

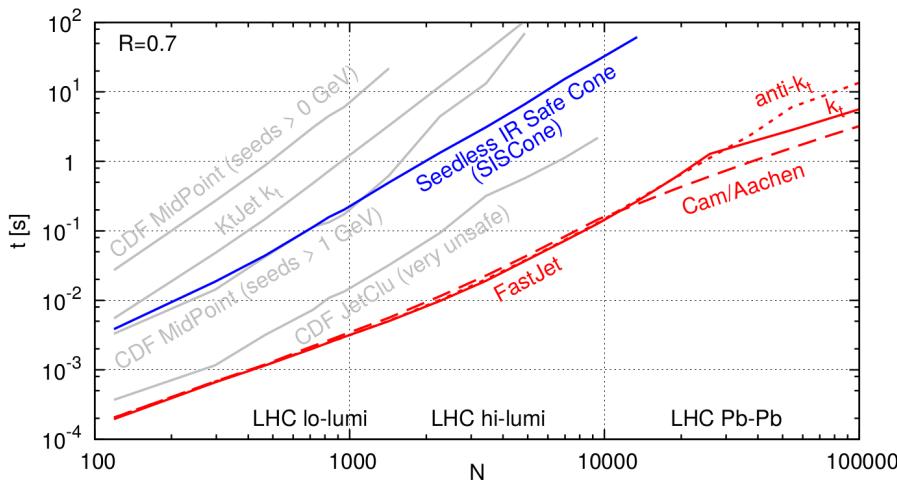


**Figure X.5 – Formes des jets reconstruits à partir de différents algorithmes pour un même événement [9].** En haut à gauche,  $k_T$ ; en haut à droite, C/A; en bas à gauche, SIScone; en bas à droite, anti- $k_T$ . L'algorithme anti- $k_T$  permet d'obtenir des jets de forme régulière, conique.

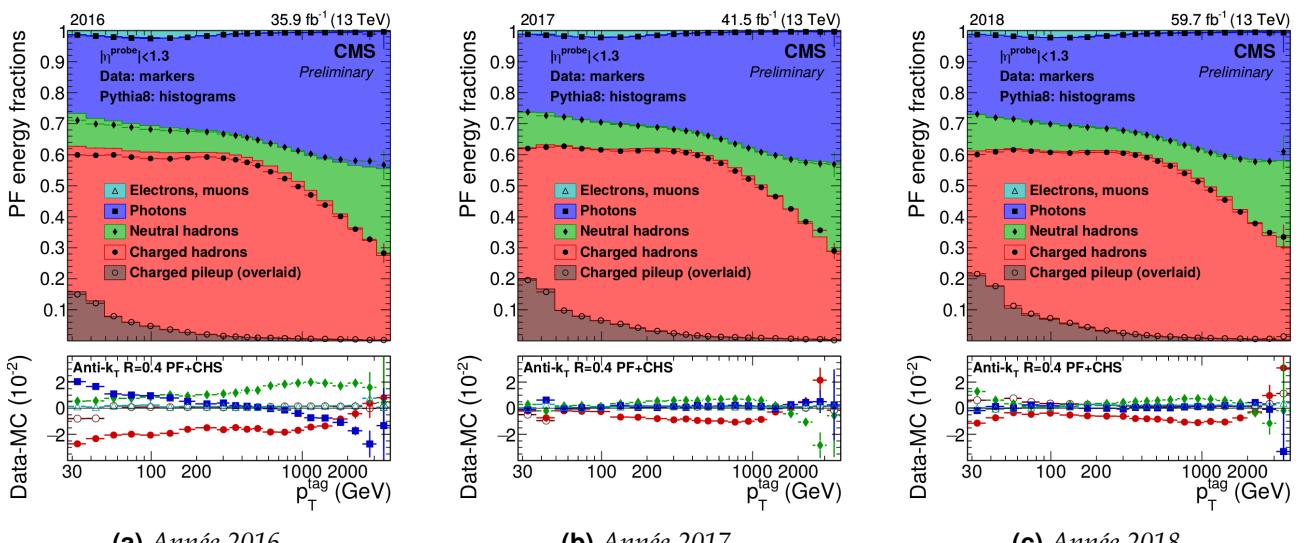
Le temps de calcul de ces algorithmes est un enjeu majeur au LHC. Leurs temps d'exécution sont représentés en fonction du nombre d'interactions d'empilement sur la figure X.6. L'algorithme anti- $k_T$  se place parmi les algorithmes les plus rapides. Dans les conditions des collisions proton-proton du LHC, il permet le traitement d'un événement en moins d'une milliseconde. C'est cet algorithme de regroupement qui est utilisé dans le cadre de l'expérience CMS. Sur la figure X.7 sont illustrées les compositions des jets reconstruits lors des trois années du Run II. L'écart entre données et simulations n'excède généralement pas 2 %.

### 3.2 Identification des jets dans CMS

Les jets ainsi reconstruits à l'aide des algorithmes de recombinaison sont en fait des « candidats » jets. À l'instar des particules individuelles, des critères d'identification leur sont appliqués afin de rejeter le bruit de fond et s'assurer de la qualité des jets utilisés dans les analyses.



**Figure X.6 – Temps de recombinaison d'un événement dijet simulé de 50 GeV contenant  $N$  interactions d'empilement pour différents algorithmes de reconstruction des jets [10].**



**Figure X.7 – Composition des jets reconstruits à l'aide de l'algorithme anti- $k_T$  lors du Run II [11] en fonction de l'impulsion transverse du jet. La partie Charged pileup (overlaid) en brun correspond à la fraction du jet retirée par la procédure CHS décrite section 4.1.**

Ces critères reposent sur les caractéristiques des candidats jets comme la fraction d'énergie provenant de leurs constituants neutres ou encore le nombre de ces constituants. Ces critères dépendent des années de prise de données et de la pseudo-rapidité du jet, c'est-à-dire de la région du détecteur dans laquelle il se trouve.

Les critères utilisés pour les années 2016, 2017, 2018 et 2017-UL<sup>1</sup>, listés page 8, permettent d'obtenir une efficacité d'identification des jets supérieure à 99 % dans chacune des régions en  $\eta$  du détecteur. La réjection du bruit de fond est supérieure à 98 % pour  $|\eta| \leq 3,0$  et supérieure à 36 % pour  $|\eta| > 3,0$ .

### 3.3 Saveur des jets

Pour étudier la physique du processus initial, la connaissance du parton à l'origine d'un jet ainsi identifié dans le détecteur est une information de choix. Il est impossible de connaître avec certitude cette particule, mais sa nature influe directement sur certaines propriétés des jets, permettant de l'estimer.

1. La dénomination « UL » signifie *Ultra-Legacy* et correspond à une réinterprétation des données récoltées une fois que la collaboration peut prendre plus de recul sur l'obtention de celles-ci.

Propriété du jet à identifier	$ \eta  \leq 2,4$	$2,4 <  \eta  \leq 2,7$	$2,7 <  \eta  \leq 3,0$	$3,0 <  \eta $
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$	$< 0,98$	
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$	$> 0,01$	$< 0,90$
— hadronique chargée	$> 0$			
— électromagnétique chargée	$< 0,99$			
Nombre de constituants				
— neutres	$> 1$	$> 1$	$> 2$	$> 10$
— chargés	$> 0$			

**Tableau X.1** – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2016.

Propriété du jet à identifier	$ \eta  \leq 2,4$	$2,4 <  \eta  \leq 2,7$	$2,7 <  \eta  \leq 3,0$	$3,0 <  \eta $
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$		$> 0,02$
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$	$< 0,99$ et $> 0,02$	$< 0,90$
— hadronique chargée	$> 0$			
Nombre de constituants				
— neutres	$> 1$	$> 1$	$> 2$	$> 10$
— chargés	$> 0$			

**Tableau X.2** – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2017.

Propriété du jet à identifier	$ \eta  \leq 2,6$	$2,6 <  \eta  \leq 2,7$	$2,7 <  \eta  \leq 3,0$	$3,0 <  \eta  \leq 5,0$
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$		$> 0,02$
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,99$	$< 0,99$ et $> 0,02$	$< 0,90$
— hadronique chargée	$> 0$			
Nombre de constituants				
— neutres	$> 1$		$> 2$	$> 10$
— chargés	$> 0$	$> 0$		

**Tableau X.3** – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2018.

Propriété du jet à identifier	$ \eta  \leq 2,6$	$2,6 <  \eta  \leq 2,7$	$2,7 <  \eta  \leq 3,0$	$3,0 <  \eta  \leq 5,0$
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$		$> 0,02$
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,99$	$< 0,99$ et $> 0,02$	$< 0,90$
— hadronique chargée	$> 0$			
Nombre de constituants				
— neutres	$> 1$		$> 2$	$> 10$
— chargés	$> 0$	$> 0$		

**Tableau X.4** – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2017-UL.

### 3.3.1 Saveur de la particule initiale et caractéristiques des jets

**Le quark  $t$**  possède une durée de vie trop courte pour participer à l'hadronisation. Il se désintègre alors par interaction faible en un autre quark, très majoritairement un quark  $b$ , et un boson  $W$ . Le nouveau quark issu de cette désintégration forme alors un jet.

Les autres quarks,  $d$ ,  $u$ ,  $s$ ,  $c$  et  $b$ , sont plus stables que le top et participent à l'hadronisation. Ils se retrouvent alors confinés au sein des hadrons formés.

**Le quark  $b$**  ne forme pas de hadron stable et se désintègre en quark  $c$  ou  $u$  par interaction faible. Dans 70 % des cas, cette désintégration se fait avec émission d'une nouvelle paire de quarks  $q\bar{q}$  selon

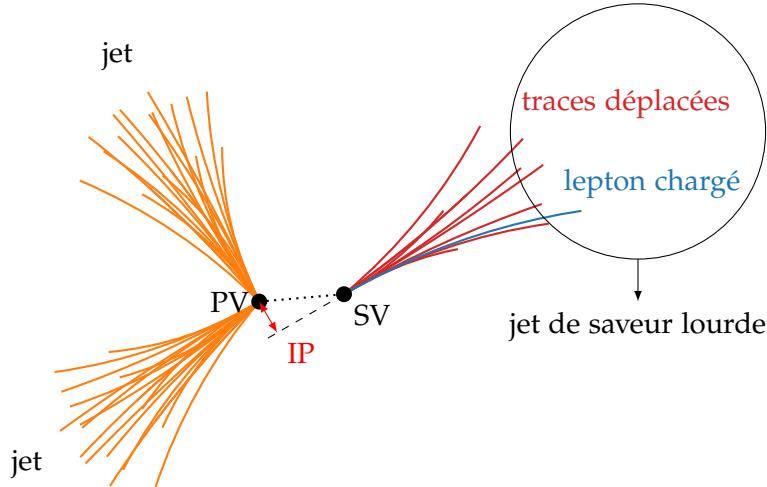
$$b \rightarrow c q_d \bar{q}_d, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{c} q_u \bar{q}_u, \quad b \rightarrow u q_d \bar{q}_d, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{u} q_u \bar{q}_u, \quad (\text{X.9})$$

où  $q_d$  et  $q_u$  désignent respectivement des quarks d'isospin faible bas et haut. Le nombre de constituants du jet, ainsi que le nombre de traces déplacées, est alors plus important. Dans 30 % des cas, la désintégration du quark  $b$  se fait avec émission d'une paire de leptons, un électriquement chargé et le neutrino associé, c'est-à-dire

$$b \rightarrow c \ell^- \bar{\nu}_\ell, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{c} \ell^+ \nu_\ell, \quad b \rightarrow u \ell^- \bar{\nu}_\ell, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{u} \ell^+ \nu_\ell. \quad (\text{X.10})$$

Le lepton chargé donne une signature caractéristique lors des collisions proton-proton du LHC.

Ces désintégrations font intervenir les modules des coefficients  $V_{cb}$  ou  $V_{ub}$  de la matrice CKM, introduite dans la section 2.3.4 du chapitre 2, dont les valeurs sont faibles ; elles sont donc fortement supprimées. Les hadrons contenant un quark  $b$  ont ainsi une durée de vie  $\tau$  de l'ordre de la picoseconde [12, 13] et peuvent voyager sur une distance de l'ordre du millimètre. Les traces des particules chargées issues de cette nouvelle désintégration proviennent donc d'un vertex secondaire (SV), différent du vertex primaire (PV). Ces traces sont « déplacées ». Pour chacune d'entre elles, il est possible de déterminer le paramètre d'impact (IP) au vertex primaire, dont la valeur est typiquement plus grande que pour des traces provenant du vertex primaire, comme cela est illustré sur la figure X.8.



**Figure X.8 –** Trois jets, dont un de saveur lourde. Les particules composant ce jet proviennent d'un vertex secondaire (SV), différent du vertex primaire (PV) où a lieu la collision entre les protons et la formation du hadron lourd à l'origine du SV. Le paramètre d'impact (IP) est également indiqué.

**Le quark  $c$**  suit le même schéma que le quark  $b$ . Cependant, la désintégration du quark  $c$  en quark  $s$  selon

$$c \rightarrow s q_u \bar{q}_u, \quad \bar{c} \rightarrow \bar{s} q_d \bar{q}_d, \quad c \rightarrow s \ell^+ \nu_\ell, \quad \bar{c} \rightarrow \bar{s} \ell^- \bar{\nu}_\ell, \quad (\text{X.11})$$

fait intervenir le module du coefficient  $V_{cs}$  de la matrice CKM, proche de 1. Les hadrons contenant un quark  $c$  ont ainsi une durée de vie  $\tau$  de inférieure à la picoseconde [13] et il est plus difficile d'identifier les jets issus de quarks  $c$  que ceux issus de quarks  $b$ .

**Les quarks  $d$ ,  $u$  et  $s$**  forment des hadrons étant :

- très instables, par exemple les  $\pi^0$ , dont seuls les produits de désintégration sont observés ;
- faiblement instables, par exemple les  $K^+$  et les  $K^0$ , qui se propagent généralement jusque dans les parties sensibles du détecteur et peuvent donc être directement observés ;
- stables, par exemple les protons, qui sont directement observés dans le détecteur.

Dans tous les cas, les traces des particules chargées observées proviennent du PV, lieu de formation du quark initial. Le phénomène décrit précédemment pour les quarks  $b$  et  $c$  n'est donc pas observable. Les jets issus de ces trois types de quarks, les plus légers, sont ainsi regroupés sous la dénomination de « jets légers ».

**Les gluons** portent une charge de couleur plus importante que les quarks<sup>2</sup>. Les jets initiés par des gluons comportement typiquement plus de particules électriquement chargées et sont moins collimés que les jets légers [14].

### 3.3.2 Identification de la saveur des jets

Les jets présentent ainsi des propriétés caractéristiques, selon qu'il s'agisse de jets légers (quarks  $d$ ,  $u$  ou  $s$ ), de jets lourds (quarks  $c$  ou  $b$ ) ou de jets issus d'un gluon. En utilisant ces propriétés, des algorithmes d'identification de la saveur des jets ont été mis au point par la collaboration CMS [15]. Les avancées récentes dans le domaine du *Deep Learning*, appliquées à l'identification des jets [16], ont permis l'amélioration de ces algorithmes. L'algorithme DEEPCSV [17] a ainsi été développé.

Les variables utilisées dans cet algorithme sont décrites dans la référence [17]. Elles sont traitées par un réseau de neurones profond de quatre couches cachées de 100 nœuds connectés les uns aux autres. Ce réseau est entraîné sur un ensemble d'événements simulés  $t\bar{t}$ , présentant de nombreux jets de quarks  $b$ , et multijet à l'aide des librairies KERAS [18] et TENSORFLOW [19].

Les performances ainsi obtenues pour l'algorithme DEEPCSV sont comparées à d'autres algorithmes d'identification de la saveur des jets sur la figure X.9. Les algorithmes CMVAV2 et DEEPCSV présentent les meilleures performances en termes d'identification des jets de quark  $b$ . Pour le traitement des jets de quark  $c$ , l'algorithme DEEPCSV propose les meilleures performances. Dans les analyses présentées dans ce chapitre et le chapitre 5, c'est cet algorithme qui est utilisé afin d'identifier les jets issus de quarks  $c$  ou  $b$ .

La discrimination entre jet léger et jet initié par un gluon peut être réalisée à l'aide d'une fonction de vraisemblance [14] renvoyant un score entre 0 et 1 pour chaque jet, correspondant à la probabilité que ce jet soit issu d'un quark. La densité de probabilité de cette fonction, selon qu'il s'agisse de jets initiés par des gluons ou des quarks, est représentée sur la figure X.10.

## 4 Calibration en énergie des jets dans CMS

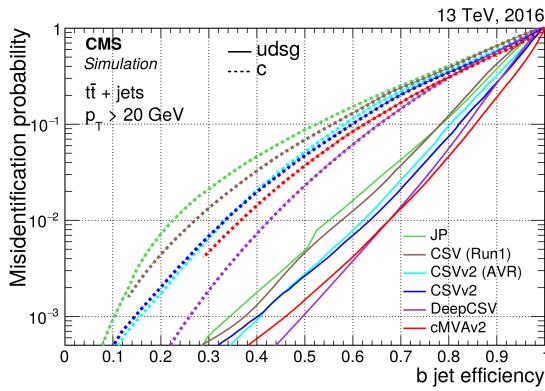
Les jets sont des objets physiques composites complexes qu'il est nécessaire de calibrer, comme tout autre objet reconstruit. La précision apportée à la mesure des jets est capitale dans de nombreuses analyses, où il s'agit d'une source majeure d'incertitude systématique. Les avancées réalisées récemment sur la calibration des jets ont ainsi permis d'améliorer la précision sur la mesure de la section efficace inclusive de production de jets et de la masse du quark top [20].

À partir des jets reconstruits par les méthodes décrites précédemment, un procédé de correction de l'énergie des jets (JEC, *Jet Energy Correction*) est réalisé. Il permet de corriger l'échelle en énergie des jets (JES, *Jet Energy Scale*) ainsi que la résolution sur cette énergie (JER, *Jet Energy Resolution*). La collaboration CMS utilise une approche factorisée dans laquelle plusieurs étapes corrigeant chacune un effet en particulier et dépendent des étapes précédentes [20]. La figure X.11 résume ces étapes, décrites dans les sections qui suivent.

Trois stades ou « niveaux » de correction sur les particules peuvent être définis.

---

2. Les quarks portent une couleur, les antiquarks une anticoloreur et les gluons portent une couleur et une anticoloreur.



**(a)** Probabilité de mauvaise identification en tant que jet de quark  $b$  de jets de gluon ou quarks légers (traits pleins) ou de jets de quark  $c$  (pointillés) en fonction de l'efficacité d'identification des jets de quark  $b$ .

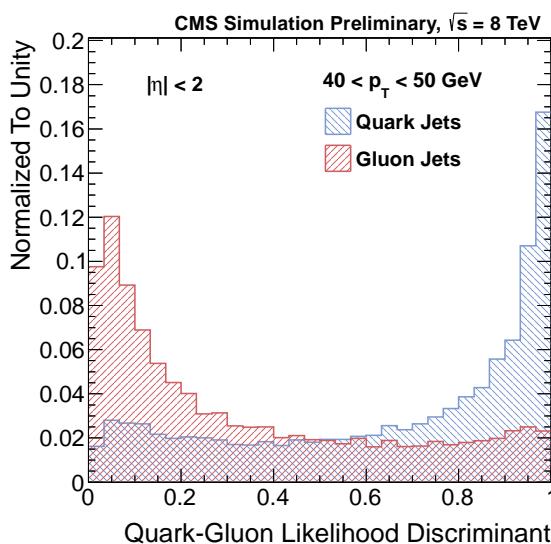


**(b)** Probabilité de mauvaise identification en tant que jet de quark  $c$  de jets de gluon ou quarks légers en fonction de l'efficacité d'identification des jets de quark  $c$ .

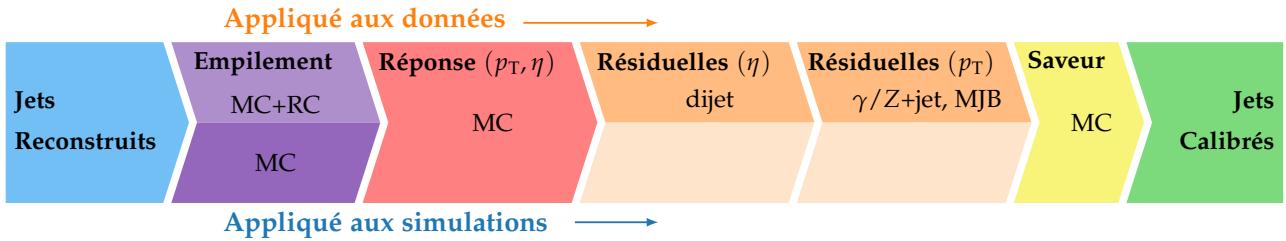


**(c)** Probabilité de mauvaise identification en tant que jet de quark  $b$  de jets de quark  $c$  en fonction de l'efficacité d'identification des jets de quark  $c$ .

**Figure X.9 – Comparaison des performances des algorithmes d'identification de la saveur des jets [17].**



**Figure X.10 – Densité de probabilité de la fonction de vraisemblance utilisée pour discriminer les jets issus de gluons de ceux issus de quarks [14]. En rouge, pour les jets issus de gluons. En bleu, pour des jets issus de quarks.**



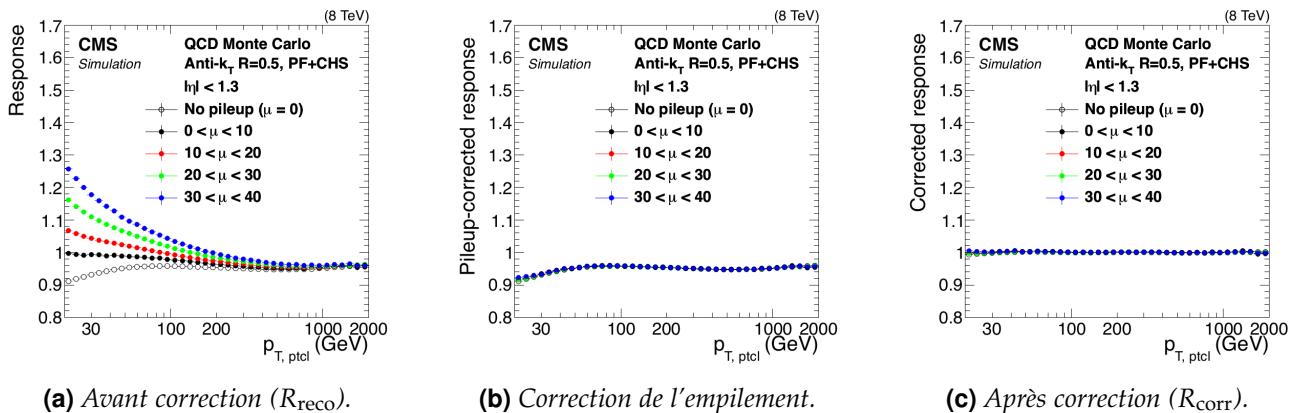
**Figure X.11** – Étapes successives de la JEC pour les données et les simulations [20]. Les corrections des étapes marquées « MC » sont obtenues par l'étude de simulations, celles marquées « RC » par une méthode de cône aléatoire (Random Cone) sur les données. Les types d'événements utilisés dans les corrections résiduelles sont également indiqués.

- Le niveau « particule », noté  $p_{\text{T}, \text{ptcl}}$ , ou niveau « vrai », se réfère aux objets et variables après hadronisation mais avant interaction avec le détecteur. Il s'agit donc des grandeurs recherchées, uniquement accessibles dans les événements simulés.
- Le niveau « reconstruit », noté  $\text{reco}$ , correspond aux objets et variables après interaction avec le détecteur et reconstruction par l'algorithme de PF.
- Le niveau « corrigé » ou calibré, noté  $\text{corr}$ , correspond aux objets et variables corrigés, c'est-à-dire ceux du niveau reconstruit auxquels ont été appliquées les corrections.

La réponse d'un jet, variable importante pour ce chapitre, est définie comme

$$R = \frac{p_{\text{T}}}{p_{\text{T}, \text{ptcl}}} . \quad (\text{X.12})$$

La réponse peut être définie à différents niveaux, et par définition  $R_{\text{ptcl}} = 1$ . Si la JEC est correcte, alors l'impulsion transverse du jet corrigé doit correspondre sensiblement à l'impulsion transverse au niveau particule, c'est-à-dire  $R_{\text{corr}} \simeq 1$ . Sur la figure X.12 sont représentées les réponses de jets d'événements QCD simulés à différentes étapes de la JEC. Après avoir appliqué toutes les corrections, ce qui correspond à la figure X.12c, la réponse est sensiblement égale à 1, ce qui montre que la JEC est correcte.



**Figure X.12** – Valeur moyenne de la réponse de jets d'événements QCD simulés en fonction de  $p_{\text{T}, \text{ptcl}}$  à différentes étapes de la JEC [20] et pour différentes valeurs d'interactions d'empilement  $\mu$ .

Les jets au niveau particule sont reconstruits en appliquant la procédure de recombinaison à toutes les particules de durée de vie  $\tau$  telle que  $c\tau > 1 \text{ cm}$  à l'exception des neutrinos [20]. Les hadrons contenant des quarks  $c$  ou  $b$  ne rentrent pas dans cette catégorie et ce sont donc leurs produits de désintégration qui sont pris en compte pour la recombinaison. Les neutrinos sont exclus pour pouvoir définir la réponse des jets d'une manière qui soit accessible expérimentalement et qui réduise significativement les différences de réponse entre jets lourds et jets légers ou de gluons, à cause des neutrinos produits dans les désintégrations des quarks lourds.

La JEC est déterminée pour chaque année de prise de donnée et pour différentes subdivisions de ces années. En effet, les conditions expérimentales changent au cours du temps. Ce peut être dû

au vieillissement du détecteur, à une modification des caractéristiques des faisceaux de protons ou encore à une modification du détecteur lui-même. Par exemple, entre 2016 et 2017, la partie centrale du trajectographe est remplacée par un système d'architecture différente [21, 22]. De 2017 à 2018, les photodiodes des bouchons du HCAL sont remplacées par des photomultiplicateurs à silicium [23, 24]. La réponse en énergie des jets dépend fortement de la nature du détecteur, c'est pourquoi des évolutions importantes peuvent apparaître sur la JEC d'une année à une autre. C'est en particulier le cas pour la réponse du détecteur dont la correction, présentée dans la section 4.2, est réalisée après la correction de l'empilement abordée ci-après.

## 4.1 Correction de l'empilement

Des contributions additionnelles à l'énergie et à l'impulsion des jets peuvent apparaître du fait de l'empilement, décrit dans la section 3.5 du chapitre 3. La correction de l'empilement a pour but de soustraire ces contributions et est appliquée dans les données et les événements simulés. Elle permet d'améliorer la résolution en énergie des jets et d'obtenir une JES plus précise.

L'empilement asynchrone est réduit par l'analyse temporelle des signaux des calorimètres, l'empilement synchrone par la méthode de soustraction des hadrons chargés (CHS, *pile-up Charged Hadron Subtraction*), décrite ci-après.

Pour chacun des vertex primaires de l'événement, la somme des impulsions transverses au carré des traces associées au vertex est calculée. Le vertex primaire principal est choisi comme étant le vertex présentant la plus grande valeur de cette somme. Les autres vertex primaires sont considérés comme des vertex d'empilement. Les hadrons chargés dont les traces associées proviennent de vertex d'empilement sont retirés de l'événement. La reconstruction des jets est alors réalisée à partir de l'événement nettoyé, ce qui permet d'améliorer la résolution en  $p_T$  des jets.

La correction de l'empilement résiduel  $\mathcal{C}_{\text{PU}}$ , principalement due aux hadrons neutres, aux photons, aux traces non associées à un vertex et à l'empilement asynchrone qui n'a pas pu être corrigé totalement, s'exprime en fonction de

- l'impulsion transverse du jet avant application de cette correction et après CHS,  $p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}$ ;
- la pseudo-rapidité du jet,  $\eta$ ;
- l'aire du jet dans le plan  $(\eta, \phi)$ ,  $A$ ;
- la densité en énergie dans le plan  $(\eta, \phi)$  de l'événement contenant ce jet, notée  $\rho$ ;

sous la forme

$$\mathcal{C}_{\text{PU}}(p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}, \eta, A, \rho) = 1 - \frac{\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle}{p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}} \quad (\text{X.13})$$

où  $\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle$  est la contribution additionnelle de l'empilement au niveau particule, estimée à l'aide de la méthode de l'aire hybride (*hybrid jet area*) à partir d'événements QCD multijet simulés avec et sans empilement, c'est-à-dire

$$\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle(\rho, \eta, p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}) = \langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{avec PU}} - p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{sans PU}} \rangle, \quad (\text{X.14})$$

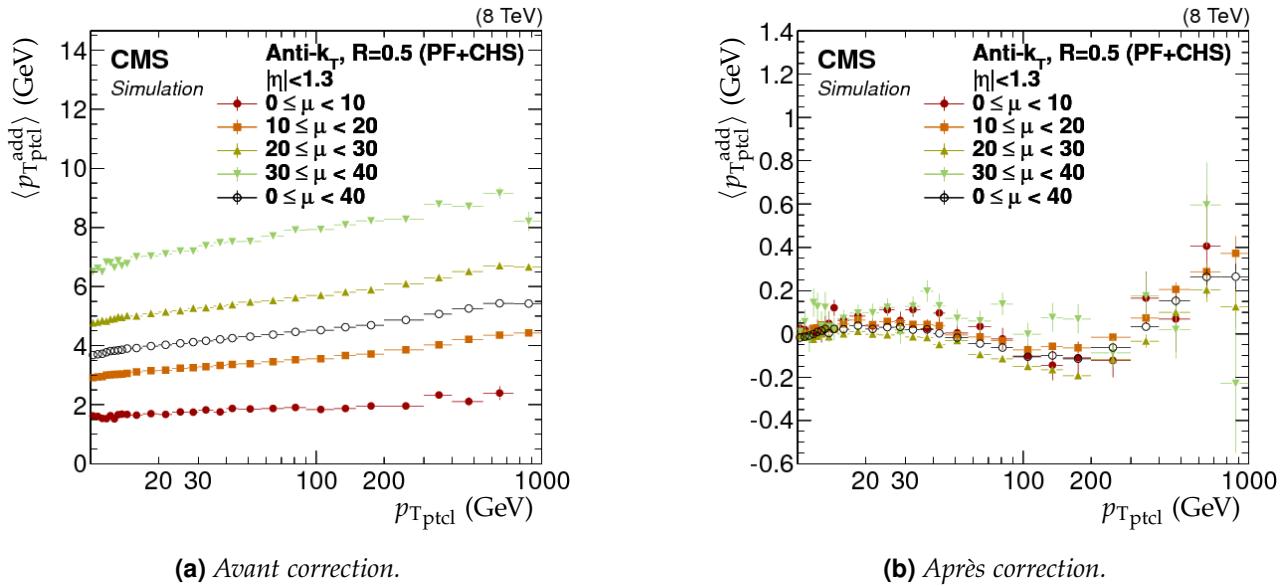
avec  $p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{avec PU}}$  et  $p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{sans PU}}$  les impulsions du jet au niveau particule avec et sans empilement. La contribution additionnelle de l'empilement au niveau particule est alors paramétrée en fonction de  $p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}$ ,  $\eta$ ,  $A$  et  $\rho$  et la correction de l'empilement résiduel  $\mathcal{C}_{\text{PU}}$  définie par (X.13) peut se réécrire

$$\mathcal{C}_{\text{PU}}(p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}, \eta, A, \rho) = 1 - \frac{[\rho_0(\eta) + \rho \beta(\eta)(1 + \gamma(\eta) \log p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}})] A}{p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}} \quad (\text{X.15})$$

où  $\rho_0(\eta)$ ,  $\beta(\eta)$  et  $\gamma(\eta)$  sont les paramètres de cette correction, dépendants de  $\eta$ .

La figure X.13 montre  $\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle$  en fonction de l'impulsion transverse du jet au niveau particule, avant et après application de la correction de l'empilement. Les résultats de la figure X.13b sont cohérents avec l'absence d'énergie supplémentaire due à l'empilement à  $\pm 0,2 \text{ GeV}$  jusqu'à  $p_{T_{\text{ptcl}}} = 500 \text{ GeV}$  et à  $\pm 0,6 \text{ GeV}$  au-delà.

La correction ainsi décrite doit être légèrement adaptée pour pouvoir l'appliquer aux données à cause des biais de simulation du détecteur. Pour cela, un ajustement en fonction de  $\eta$  est déterminé à l'aide de la méthode de cône aléatoire (RC, *Random Cone*). La méthode RC consiste à placer



**Figure X.13 – Contribution additionnelle de l’empilement au niveau particule telle que définie dans l’équation (X.14) pour  $|\eta| < 1,3$  en fonction de l’impulsion du jet au niveau particule pour différentes valeurs du nombre d’interaction d’empilement ( $\mu$ ) [20].**

aléatoirement des cônes couvrant l’ensemble de l’acceptance du détecteur dans le plan  $(\eta, \phi)$ . La reconstruction des jets se fait alors cône par cône, par regroupement des particules contenues dans le cône. L’impulsion transverse moyenne de ces jets, dans chaque événement, est une mesure de la densité d’énergie moyenne se retrouvant dans les jets [20]. L’étude est réalisée sur des événements dits de « zéro biais ». Il s’agit d’événements sélectionnés par un déclenchement aléatoire pendant que les faisceaux de protons se croisent. Le déclenchement n’étant pas dû à un dépôt d’énergie en particulier, ces événements ne comportent pas, en général, de contribution provenant d’une interaction dure, c’est-à-dire d’une collision effective entre les protons. Dans ce cas, l’impulsion transverse moyenne des jets reconstruits par la méthode RC permet d’estimer la moyenne de la contribution additionnelle de l’empilement, c’est-à-dire

$$\langle p_T^{\text{add}} \rangle^{\text{RC}} = \langle p_{T\text{cône}} \rangle. \quad (\text{X.16})$$

Il est alors possible de définir un facteur d’échelle à appliquer aux paramètres  $\rho_0$  et  $\beta$  de l’équation (X.15) lorsque cette correction est appliquée aux données. Ce facteur d’échelle s’exprime

$$\frac{\langle p_T^{\text{add}} \rangle_{\text{données}}^{\text{RC}}(\eta, \rho_{\text{données}})}{\langle p_T^{\text{add}} \rangle_{\text{simulation}}^{\text{RC}}(\eta, \rho_{\text{simulation}})}. \quad (\text{X.17})$$

La contribution additionnelle de l’empilement est ainsi corrigée dans les simulations et les données.

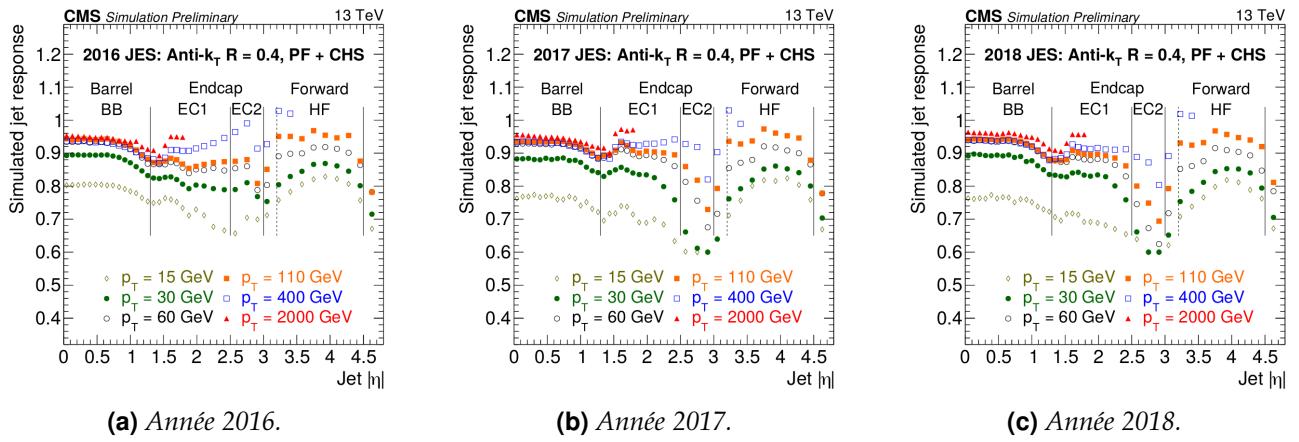
## 4.2 Correction de la réponse du détecteur en $p_T$ et en $\eta$

La réponse du détecteur CMS à un jet n’est pas uniforme selon la valeur de  $p_T$  et  $\eta$  du jet. La réponse au niveau reconstruit de jets simulés  $R_{\text{reco}}$ , déterminée grâce à une simulation du détecteur CMS basée sur GEANT4 [25-27], combinée à PYTHIA 6.4 [28] avec les réglages Z2\* [29], est représentée sur la figure X.14 pour les trois années du Run II du LHC. Il apparaît, par exemple, qu’un jet de  $p_T = 30 \text{ GeV}$  nécessite une correction allant de 10 % dans la région centrale  $|\eta| < 0,7$  à plus de 30 % lorsque  $|\eta| \simeq 3$  en 2017 et 2018.

Afin de corriger la réponse du détecteur en  $p_T$  et en  $\eta$ , la correction  $C_{\text{Rép}}$  à appliquer s’exprime

$$C_{\text{Rép}}(p_{T\text{reco}}', \eta) = \frac{\langle p_{T\text{ptcl}} \rangle}{\langle p_{T\text{reco}}' \rangle} = \frac{1}{\langle R'_{\text{reco}} \rangle} \quad (\text{X.18})$$

où  $p_{T\text{reco}}'$  est l’impulsion transverse du jet après correction de l’empilement. Les moyennes sont réalisées sur les jets appartenant à la même cellule d’une grille en  $(p_{T\text{ptcl}}, \eta)$  prédéfinie [20].



**Figure X.14** – Réponse des jets reconstruits en fonction de  $p_T$  et  $\eta$  lors du Run II [11]. La chute de la réponse des jets dans la région  $|\eta| \simeq 3$  est due à la transition entre l'endcap et la partie forward du détecteur. Pour  $|\eta| > 4,5$ , les limites d'acceptance du détecteur expliquent la chute de la réponse des jets. La dégradation au cours du temps du détecteur dans la région « EC2 » s'observe par la baisse de la réponse des jets dans cette région de 2016 à 2017.

### 4.3 Corrections résiduelles

Les corrections décrites dans les sections précédentes permettent d'obtenir une bonne correction en énergie des jets. Toutefois, des différences dans les réponses des jets, de l'ordre du pourcent, subsistent entre données et simulations. Des corrections résiduelles à appliquer aux données sont ainsi déterminées afin de réduire ces écarts, définies telles que

$$\mathcal{C}_{\text{Res}} = \frac{R_{\text{simulations}}}{R_{\text{données}}} . \quad (\text{X.19})$$

Le principe est d'estimer la réponse du jet en s'appuyant sur un objet de référence pouvant être un boson Z (événements Z + jets), un photon (événements  $\gamma$  + jets) ou un autre jet (événements dijet et multijet). Deux méthodes existent et sont utilisées de manière complémentaire :

**la méthode de la balance** estime que l'objet de référence et le jet sont balancés au niveau particule, c'est-à-dire d'impulsion transverse totale nulle, soit

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \vec{p}_T^{\text{jet}} = \vec{0} . \quad (\text{X.20})$$

L'objet de référence étant fidèlement reconstruit,

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} \simeq \vec{p}_T^{\text{ref}} = \vec{p}_T^{\text{réf}} . \quad (\text{X.21})$$

Ainsi, l'équation (X.20) peut se réécrire à l'aide de (X.21) sous la forme

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \vec{p}_T^{\text{jet}} = \vec{0} . \quad (\text{X.22})$$

La réponse d'un jet définie par (X.12) permet alors de faire apparaître la réponse balancée du jet, notée  $R_{\text{bal}}$ ,

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \frac{1}{R_{\text{bal}}} \vec{p}_T^{\text{jet}} = \vec{0} . \quad (\text{X.23})$$

Il en résulte

$$R_{\text{bal}}(p_T, \eta) = \frac{p_T^{\text{jet}}}{p_T^{\text{réf}}} \quad (\text{X.24})$$

**la méthode « MPF »** (MET Projection Fraction) prend en compte l'ensemble de l'activité hadronique de l'événement et considère l'impulsion de recul vis-à-vis de l'objet de référence, c'est-à-dire

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \vec{p}_T^{\text{recul}} = \vec{0} . \quad (\text{X.25})$$

Au niveau reconstruit, l'impulsion transverse manquante (MET) définie dans la section 6.3 du chapitre 3 doit être prise en compte dans le recul. Afin de garder une description cohérente

de l'événement, les corrections précédentes apportées aux jets sont d'abord propagées à  $\vec{E}_T^{\text{miss}}$ . L'équation précédente, valable au niveau particule, s'écrit alors

$$\vec{p}_{\text{Traco}}^{\text{réf}} + \vec{p}_{\text{Traco}}^{\text{recul}} = -\vec{E}_T^{\text{miss}} \quad (\text{X.26})$$

La réponse d'un jet définie par (X.12) permet alors de faire apparaître la réponse MPF du jet, notée  $R_{MPF}$ ,

$$\vec{p}_{\text{Traco}}^{\text{réf}} + R_{MPF} \vec{p}_{\text{Tpcl}}^{\text{recul}} = -\vec{E}_T^{\text{miss}}. \quad (\text{X.27})$$

En appliquant (X.21) et (X.25) à l'équation précédente, il est possible d'écrire

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} - R_{MPF} \vec{p}_T^{\text{réf}} = -\vec{E}_T^{\text{miss}}. \quad (\text{X.28})$$

Par produit scalaire avec  $\vec{p}_T^{\text{réf}}$ , il vient

$$\left| \vec{p}_T^{\text{réf}} \right|^2 (1 - R_{MPF}) = -\vec{p}_T^{\text{réf}} \cdot \vec{E}_T^{\text{miss}}, \quad (\text{X.29})$$

ce qui permet de définir  $R_{MPF}$  comme

$$R_{MPF}(p_T, \eta) = 1 + \frac{\vec{p}_T^{\text{réf}} \cdot \vec{E}_T^{\text{miss}}}{|\vec{p}_T^{\text{réf}}|^2}. \quad (\text{X.30})$$

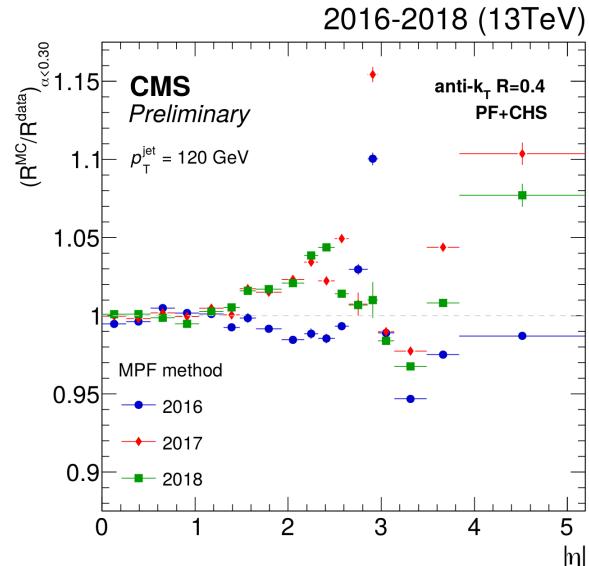
### 4.3.1 Correction résiduelle relative en $\eta$

La première de ces corrections résiduelles, fonction de  $\eta$ , est obtenue à partir de la comparaison données-simulations sur une sélection d'événements dijet. Son but est de rendre indépendant de  $\eta$  le rapport données sur simulations de la réponse des jets. Cette correction s'appuie sur la bonne reconstruction des jets dans le bâillet. Lorsqu'un événement présente un premier jet avec  $|\eta| < 1,3$ , c'est-à-dire dans la région de référence du bâillet, et un second avec  $|\eta| > 1,3$  et de  $p_T$  similaire, le premier sert d'objet de référence afin de calibrer le second ; c'est pourquoi cette correction est qualifiée de « relative ». La correction à appliquer aux données ainsi obtenue est illustrée sur la figure X.15 dans le cas des jets d'impulsion transverse égale à 120 GeV.

### 4.3.2 Correction résiduelle absolue en $p_T$

Cette correction, fonction de  $p_T$ , a pour but de rendre indépendant de  $p_T$  le rapport données sur simulations de la réponse des jets. Elle combine, à l'aide d'un ajustement global, les comparaisons données-simulations de plusieurs types d'événements afin de couvrir un large spectre de valeurs de  $p_T$ . Chaque type d'événement est en effet dominant, de par sa statistique, dans une gamme de  $p_T$  donnée :

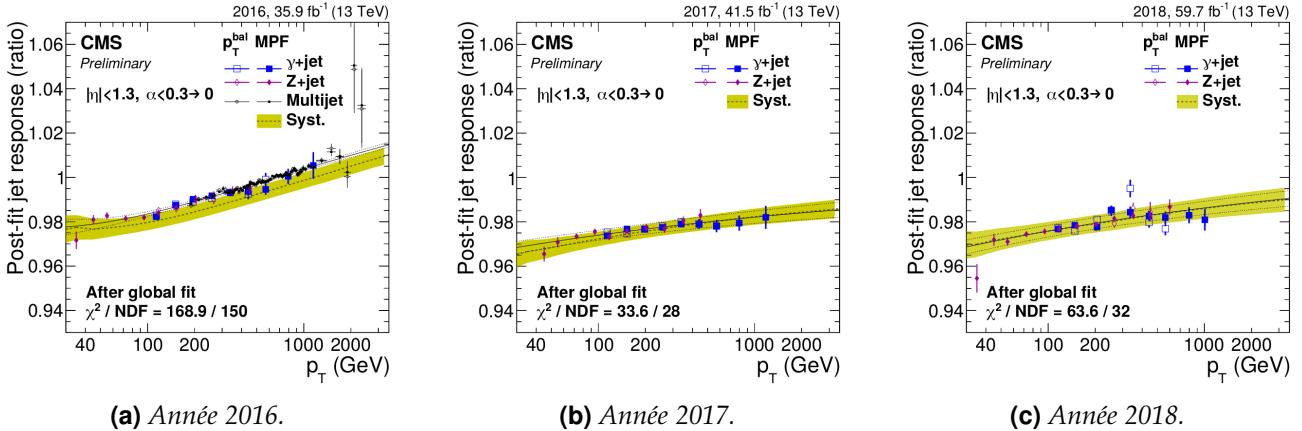
- événements  $Z + \text{jets}$  : il s'agit d'événements  $Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) + \text{jets}$  et  $Z(\rightarrow e^+ e^-) + \text{jets}$ , sélectionnés par la présence d'une paire de muons ou d'électrons compatibles avec la désintégration d'un  $Z$ , ils couvrent la région  $p_T < 400$  GeV ;
- événements  $\gamma + \text{jets}$  : sélectionnés dans les données à l'aide d'un déclenchement basé sur la présence d'un photon, ils permettent de traiter la région  $100 \text{ GeV} < p_T < 1000 \text{ GeV}$  ;
- événements multijet : ces événements contiennent au moins deux jets dans l'état final et couvrent la région  $p_T > 200$  GeV.



**Figure X.15 – Correction résiduelle relative en  $\eta$  lors du Run II obtenue avec des événements dijet et la méthode MPF [11].**

En 2017 et 2018, les événements multijet n'ont pas été exploités et la correction résiduelle absolue en  $p_T$  dans la région  $p_T > 800 \text{ GeV}$  est contrainte par l'analyse des événements  $\gamma + \text{jets}$ .

Cette correction corrige l'échelle en énergie absolue des jets, d'où son qualificatif, à partir d'un objet de référence pouvant être un boson  $Z$  ( $Z + \text{jets}$ ), un photon ( $\gamma + \text{jets}$ ) ou un autre jet (multijet). La correction à appliquer aux données ainsi obtenue est illustrée sur la figure X.16 dans le cas des jets de pseudo-rapidité  $|\eta| < 1,3$ .



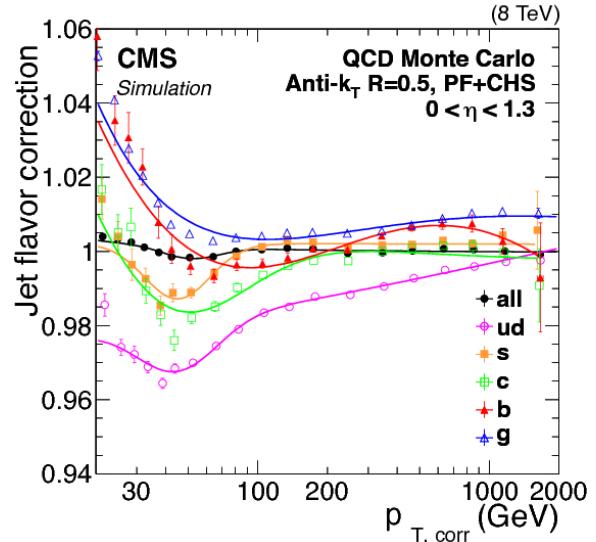
**Figure X.16 – Correction résiduelle absolue en  $p_T$  pour  $|\eta| < 1,3$  lors du Run II obtenue par ajustement global sur les événements  $\gamma + \text{jets}$ ,  $Z + \text{jets}$  et multijet [11].**

Durant ma thèse, j'étais responsable de la mesure de cette correction avec les événements  $\gamma + \text{jets}$  pour les années 2018, utilisés dans la figure X.16c afin de réaliser un ajustement global avec les autres analyses, et 2017-UL. Cette responsabilité s'inscrit dans la continuité de ce savoir-faire au sein du groupe CMS de l'IP2I, la mesure de cette correction en 2016 et 2017 y étant déjà réalisée [30]. La phénoménologie de ces événements ainsi que leur analyse sont détaillées dans les sections 5 et 6.

### 4.3.3 Correction résiduelle de saveur

Il existe une différence de réponse selon la saveur du jet, majoritairement due à la fragmentation en énergie et la composition du jet qui dépendent de cette saveur [20]. Par exemple, les particules de bas  $p_T$  se retrouvent hors de l'acceptance du détecteur. Or, des jets initiés par des gluons présentent de nombreuses particules de bas  $p_T$  par rapport aux jets issus de quarks légers. Dans une moindre mesure, les jets lourds possèdent également plus de particules de bas  $p_T$  que les jets de quarks légers suite à la désintégration du hadron lourd. La proportion de particules neutres dans le jet est également un des paramètres affectant le plus sa réponse.

La correction résiduelle de saveur  $\mathcal{C}_{\text{Sav}}$  à appliquer aux données et aux simulations est obtenue à l'aide de PYTHIA 6.4 [28] avec les réglages Z2\* [29] sur des événements dijet,  $Z + \text{jets}$  et  $\gamma + \text{jets}$  simulés et est représentée sur la figure X.17. Elle est de moins de 2 % en-deçà de 100 GeV mais peut atteindre 4 % à bas  $p_T$ . Dans les analyses de physique des particules, cette correction ne peut être appliquée qu'à condition de connaître la saveur du jet. Elle n'est donc applicable en pratique qu'aux jets issus de quarks  $b$ .



**Figure X.17 – Correction résiduelle de saveur en fonction de l'impulsion du jet préalablement corrigée par les corrections décrites dans les sections précédentes,  $p_{T,\text{corr}}$  pour des jets de pseudo-rapidité  $|\eta| < 1,3$  [20].**

## 4.4 Incertitude sur la correction en énergie des jets

Chacune des étapes de la JEC comporte des incertitudes liées aux effets systématiques et, dans une moindre mesure, statistiques. La maîtrise de ces incertitudes est un enjeu important pour de nombreuses analyses de la collaboration CMS où elles constituent une des sources d'incertitude les plus importantes. Les sources d'incertitude considérées pour la JEC sont réparties en six groupes [11] :

**Échelle absolue** ou *Absolute scale* sur les légendes des figures X.18a à X.18f. Cette incertitude prend en compte l'échelle en énergie des objets de référence utilisés pour obtenir la correction résiduelle absolue en  $p_T$  décrite dans la section 4.3.2 ainsi que les effets de l'ISR (*Initial State Radiation*) et du FSR (*Final State Radiation*) abordés dans la section 5.

**Échelle relative** ou *Relative scale* sur les légendes des figures X.18a à X.18f. Cette incertitude est principalement due à la JER qui s'applique à l'objet de référence dans la correction résiduelle relative en  $\eta$  décrite dans la section 4.3.1 ainsi qu'aux effets de l'ISR et du FSR.

**Empilement** ou *Pileup* sur les légendes des figures X.18a à X.18f. Il s'agit de rendre compte de l'incertitude sur la détermination de la contribution additionnelle de l'empilement au niveau particule. Une incertitude de 5 % sur le rapport données sur simulations de cette contribution, obtenue à l'aide de la méthode de cône aléatoire, est considérée. La différence résiduelle entre la contribution obtenue par cône aléatoire et la contribution réelle extraite des simulations est également prise en compte.

**Méthode et jeux de données** ou *Method & sample* sur les légendes des figures X.18a à X.18f. Cette incertitude correspond aux écarts observés entre les méthodes utilisant les réponses  $R_{bal}$  et  $R_{MPF}$  d'une part et entre les analyses utilisant les événements Z + jets,  $\gamma$  + jets et dijet d'autre part.

**Saveur** ou *Jet flavor* sur les légendes des figures X.18a à X.18f. L'incertitude sur la dépendance en saveur de la réponse des jets dans les simulations est estimée à partir de la différence entre deux générateurs, PYTHIA [28] et HERWIG [31].

**Stabilité temporelle** ou *Time stability* sur les légendes des figures X.18a à X.18f. La JEC est déterminée pour chaque période de prise de donnée chaque année. Les écarts observés entre ces périodes sont inclus dans cette source d'incertitude.

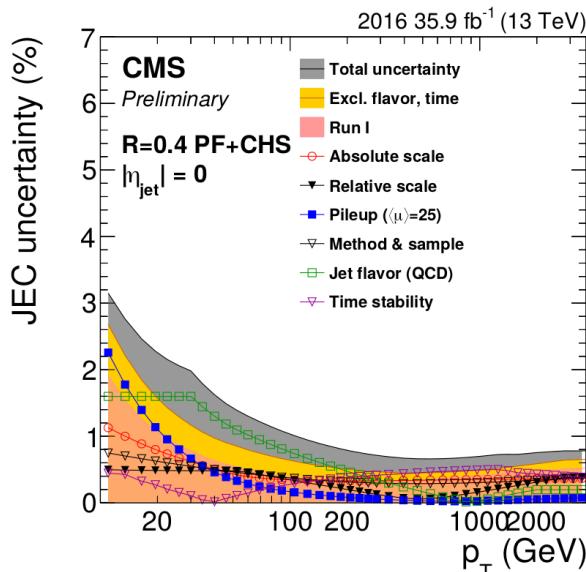
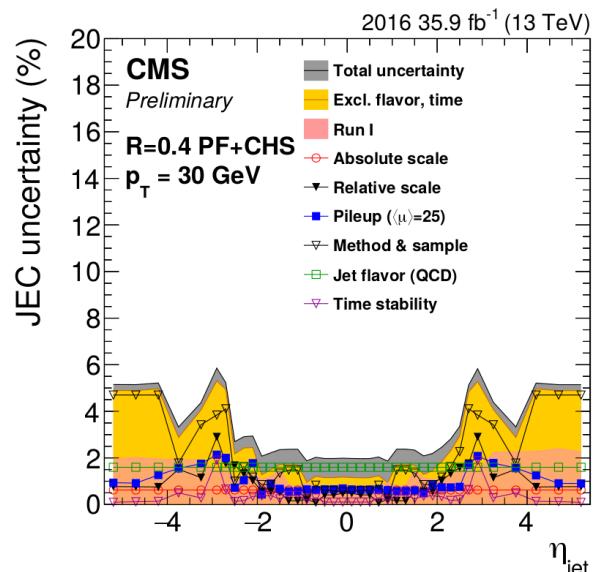
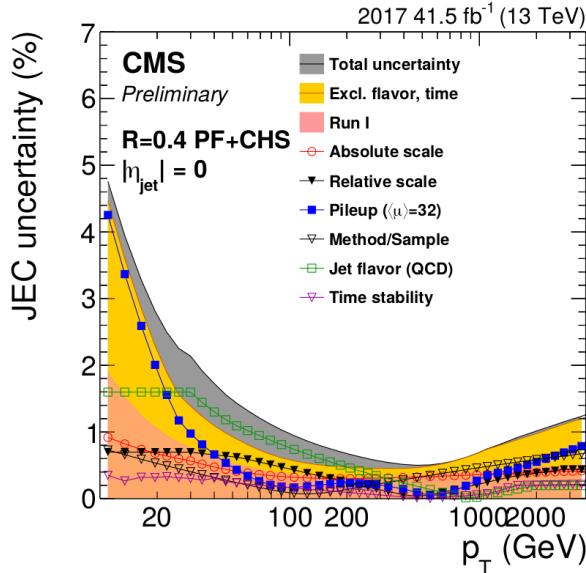
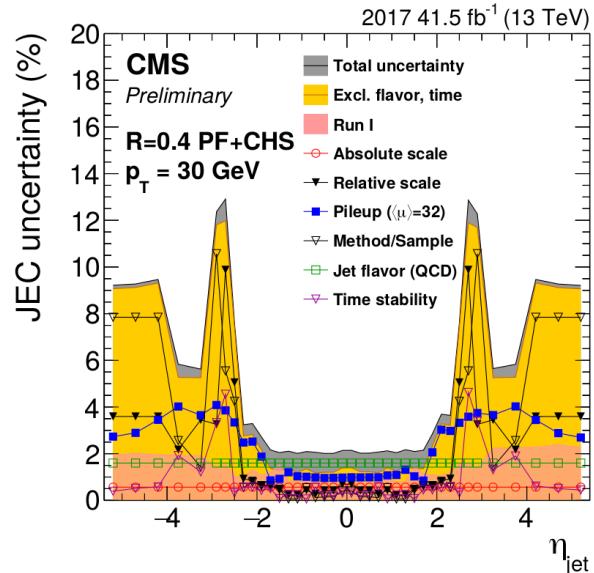
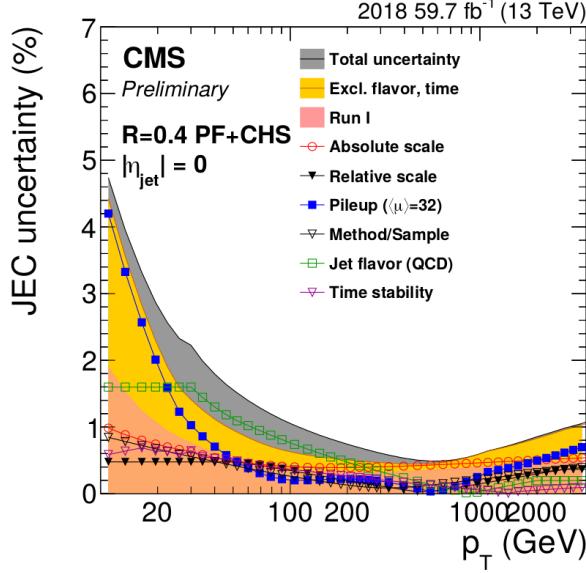
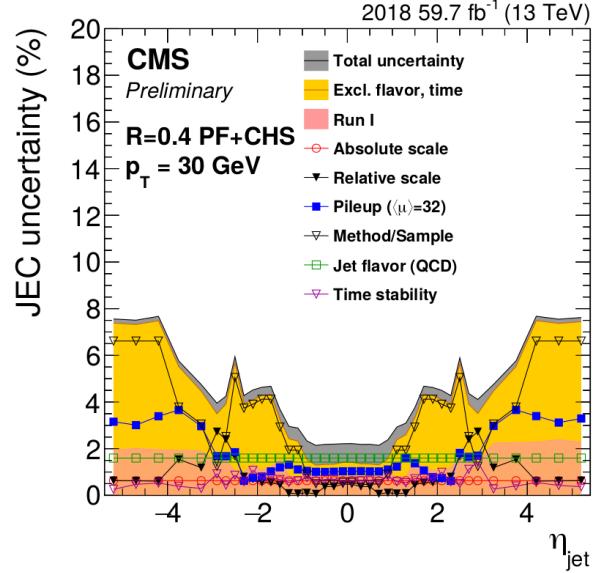
La figure X.18 résume les valeurs de ces incertitudes pour les trois années du Run II. L'incertitude globale sur la JEC est généralement inférieure à 2 %, excepté pour les cas  $p_T \leq 30 \text{ GeV}$  ou  $|\eta| \geq 2$  où elle peut être de l'ordre de 10 %. Pour  $|\eta| \in [2,5; 3,0]$ , cette incertitude est bien plus importante en 2017 que pour les autres années. Il s'agit de la région de transition entre les bouchons du HCAL (HE) et le HCAL avancé (HF), c'est-à-dire deux parties distinctes du détecteur. Or, la qualité de la modélisation de cette région du détecteur est moindre pour l'année 2017, c'est pourquoi l'incertitude y est plus importante.

## 4.5 Correction de la résolution en énergie

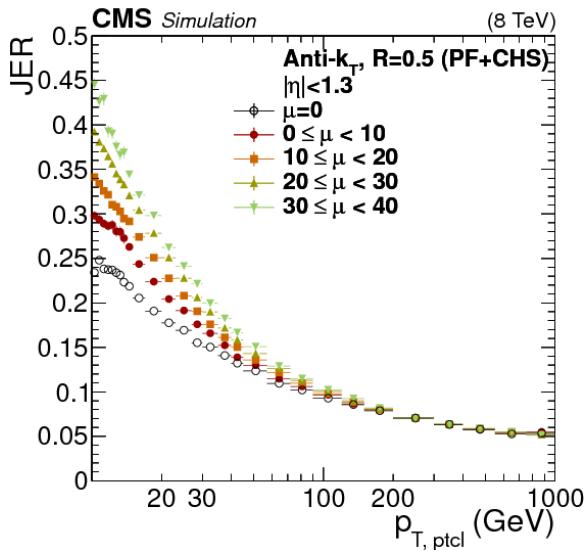
La résolution en énergie des jets, notée JER, est de l'ordre de 20 % pour des jets à  $p_T = 30 \text{ GeV}$  et de 10 % à  $p_T = 100 \text{ GeV}$  [20]. Cette résolution est donc bien moins bonne que celles d'autres objets physiques tels que les électrons (2 à 5 %), les muons (1 à 6 %) et les photons (environ 1 %). La JER joue ainsi un rôle important dans les analyses cherchant des résonances étroites, par exemple. Il est donc nécessaire de maîtriser cette grandeur.

La JER est définie comme la largeur de la gaussienne obtenue par un ajustement sur la distribution de  $R_{corr}$  des jets, c'est-à-dire  $p_{T,corr}/p_{T,ptcl}$ . Sa mesure est réalisée à l'aide d'événements  $\gamma$  + jets et Z + jets et les résultats obtenus lors du Run I sont présentés sur la figure X.19a. Elle dépend de  $p_{T,ptcl}$ ,  $\eta$  et  $\mu$ .

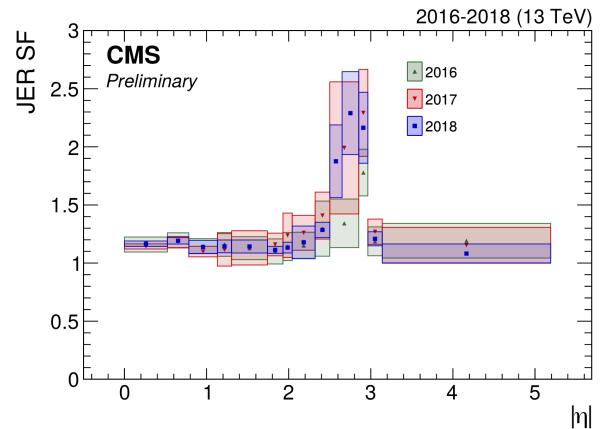
La JER observée dans les simulations diffère de celle observée dans les données, elle est légèrement meilleure. Afin de pouvoir réaliser des analyses comparant données et simulations, il est nécessaire d'avoir une JER comparable dans ces deux catégories d'événements. La JER des simulations est ainsi détériorée par un facteur d'échelle (JER SF), déterminé à partir d'événements  $\gamma$  + jets et dijet et défini en fonction de  $\eta$ . Les résultats obtenus lors du Run II sont présentés sur la figure X.19b. Le

(a) En fonction de  $p_T$  pour  $|\eta| = 0$  en 2016.(b) En fonction de  $\eta$  pour  $p_T = 30 \text{ GeV}$  en 2016.(c) En fonction de  $p_T$  pour  $|\eta| = 0$  en 2017.(d) En fonction de  $\eta$  pour  $p_T = 30 \text{ GeV}$  en 2017.(e) En fonction de  $p_T$  pour  $|\eta| = 0$  en 2018.(f) En fonction de  $\eta$  pour  $p_T = 30 \text{ GeV}$  en 2018.**Figure X.18 – Incertitudes relatives sur la JEC lors du Run II [11].**

principe est le même que pour les corrections résiduelles décrites dans les sections 4.3.1 et 4.3.2. Au lieu de s'intéresser à la moyenne de la distribution, c'est sa largeur qui est étudiée.



(a) *JER en fonction de  $p_T$  dans le bâillet de CMS ( $|\eta| < 1,3$ ) pour différentes valeurs d'interactions d'empilement  $\mu$  lors du Run I [20].*



(b) *Facteurs d'échelle de la résolution en énergie des jets en fonction de  $\eta$  lors du Run II [11].*

**Figure X.19 – Résolution en énergie des jets dans les simulations et facteurs d'échelle à leur appliquer.**

## 5 Phénoménologie des événements $\gamma + \text{jets}$

Les événements  $\gamma + \text{jets}$  peuvent être utilisés afin d'obtenir la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets, introduite dans la section 4.3.2, ainsi que la résolution en énergie des jets. Les analyses correspondantes sont abordées dans les sections 6 et 7.

### 5.1 Principe des événements $\gamma + \text{jets}$ et réponse balancée

L'état final d'un événement  $\gamma + \text{jets}$  comporte un jet à calibrer d'une part et un photon utilisé comme objet de référence d'autre part. Sur la figure X.20, la résolution sur les photons est inférieure à 4 % et de l'ordre du pourcent dans le bâillet. Dans le cas des jets, sur la figure X.19a, la résolution minimale est de 5 %. L'utilisation de photons comme objet de référence est donc justifiée.

Des diagrammes de Feynman correspondant à des événements  $\gamma + \text{jets}$  sont présentés sur la figure X.21. Ces événements ne comportent pas de neutrino issu de l'interaction dure<sup>3</sup>, il n'y a donc pas d'énergie transverse manquante due à la physique de ces événements. L'impulsion transverse étant nulle dans l'état initial, par conservation, elle est nulle dans l'état final. Le photon et le jet sont donc balancés, c'est-à-dire

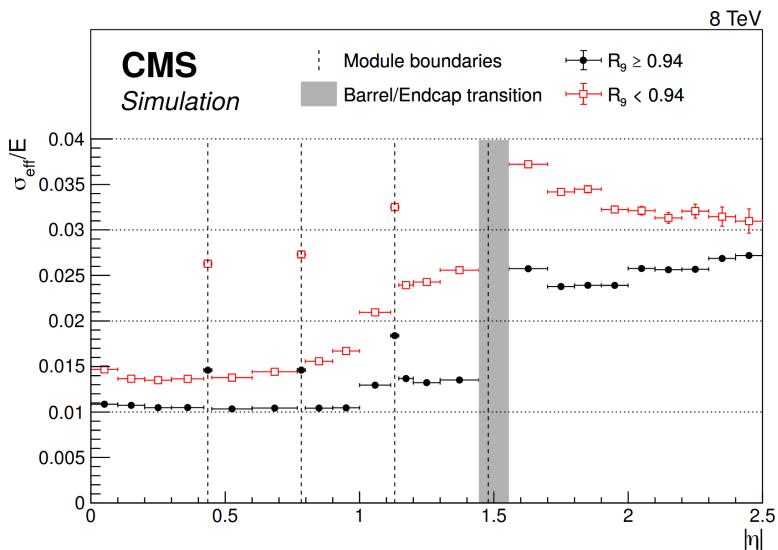
$$\vec{p}_{T\text{ptcl}}^\gamma + \vec{p}_{T\text{ptcl}}^{\text{jet}} = \vec{0} \Rightarrow p_{T\text{ptcl}}^\gamma = p_{T\text{ptcl}}^{\text{jet}}. \quad (\text{X.31})$$

L'impulsion transverse du jet doit donc être égale à celle du photon, objet de référence. La bonne résolution en énergie sur les photons permet de considérer que leur impulsion transverse au niveau reconstruit est égale à leur impulsion transverse au niveau particule. Ainsi, la méthode de la balance introduite dans la section 4.3 permet de définir

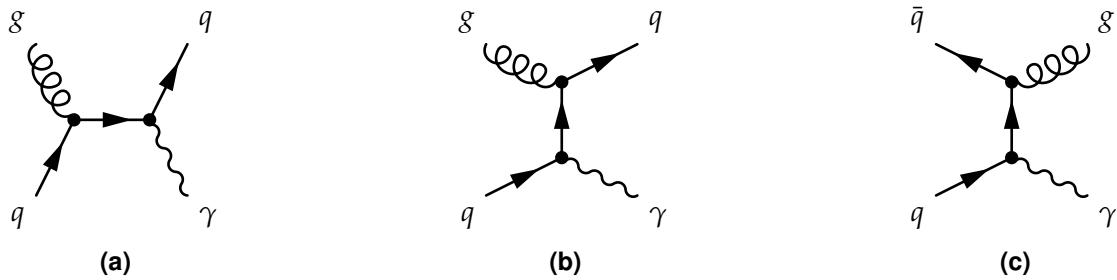
$$R_{bal} = \frac{p_{T\text{reco}}^{\text{jet}}}{p_{T\gamma}}, \quad (\text{X.32})$$

qui doit valoir 1 après correction. Cette méthode est performante pour les événements à un photon et un jet dont la topologie est représentée sur la figure X.22a.

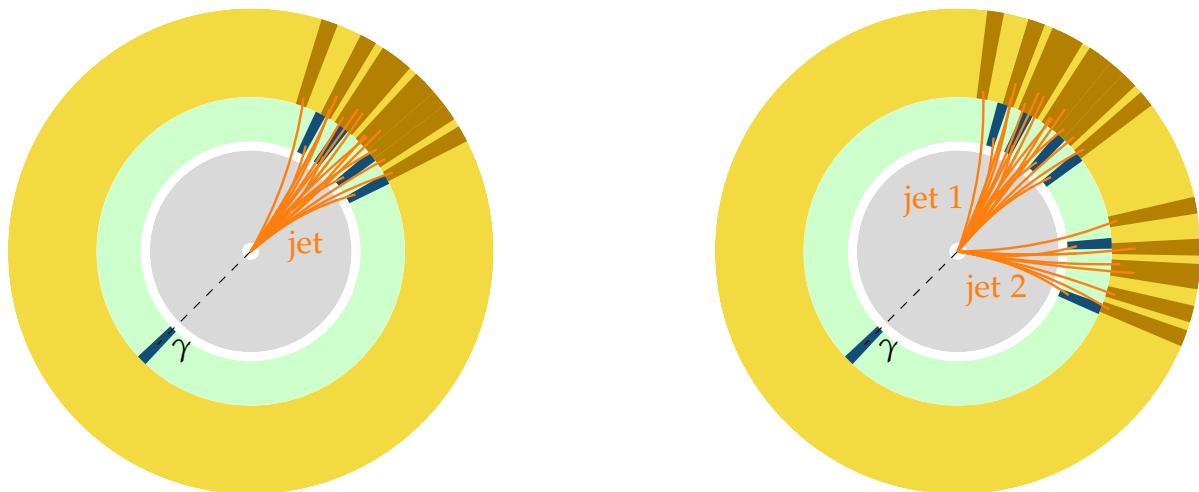
3. Des neutrinos peuvent apparaître lors de la formation du jet.



**Figure X.20** – Résolution relative en énergie des photons en fonction de  $\eta$  pour des événements simulés  $h \rightarrow \gamma\gamma$  [32]. La variable  $R_9$  est définie page 24.



**Figure X.21** – Exemples de diagrammes de Feynman de processus physiques donnant un photon et un jet dans l'état final.



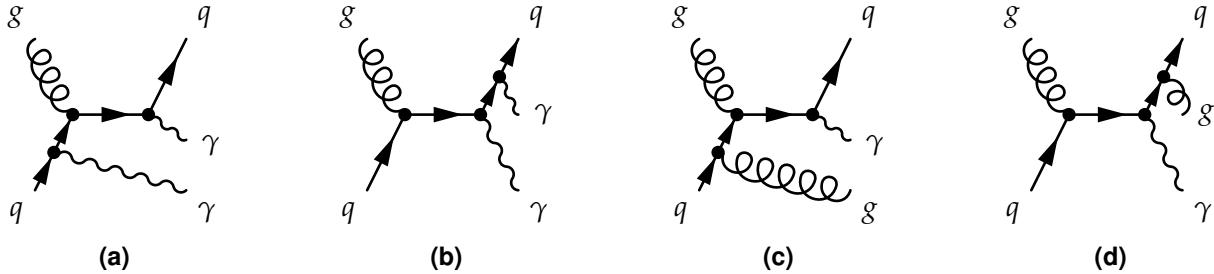
**(a)** Topologie typique des événements correspondant aux diagrammes de la figure X.21.

**(b)** Topologie typique des événements correspondant au diagramme de la figure X.23d.

**Figure X.22** – Topologies typiques des événements  $\gamma + \text{jets}$ .

## 5.2 Activité additionnelle des jets

Une activité additionnelle des jets peut survenir et altérer la topologie des événements  $\gamma + \text{jets}$ . Un photon peut être émis dans l'état initial (ISR, *Initial State Radiation*) ou dans l'état final (FSR, *Final State Radiation*), ce qui correspond aux diagrammes de Feynman des figures X.23a et X.23b. Un système composé d'un des photons et du jet n'est donc pas balancé dans ce cas. Il est possible de supprimer ce biais en imposant la présence d'un seul photon dans l'événement. La section efficace de production d'événements  $\gamma + \text{jets}$  à 13 TeV est importante [33], il est donc possible de sélectionner de manière stricte les événements afin d'obtenir une bonne pureté tout en conservant une statistique suffisante.



**Figure X.23 – Exemples de diagrammes de Feynman de processus correspondant à des événements avec deux photons (X.23a, X.23b) ou deux jets (X.23c, X.23d) dans l'état final, dus à l'ISR (X.23a, X.23c) ou au FSR (X.23b, X.23d).**

L'ISR et le FSR peuvent aussi produire un gluon, ce qui correspond aux diagrammes de Feynman des figures X.23c et X.23d. Plusieurs jets sont alors présents dans l'état final et sont ordonnés par impulsion transverse décroissante. La topologie d'un tel événement est illustrée sur la figure X.22b. Il est possible de réduire le nombre d'événements avec ISR ou FSR en imposant une condition sur les directions du photon et du premier jet qui doivent être opposées. Toutefois, la plupart des événements présentent plusieurs jets dans la direction opposée au photon. La réponse balancée est alors considérée entre le photon et le premier jet, c'est-à-dire le jet d'impulsion transverse la plus grande. Ainsi,

$$R_{bal} = \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^\gamma}. \quad (\text{X.33})$$

En complément de la réponse balancée, la réponse MPF, définie comme

$$R_{MPF} = 1 + \frac{\vec{p}_T^\gamma \cdot \vec{E}_T^{\text{miss}}}{|\vec{p}_T^\gamma|^2}, \quad (\text{X.34})$$

est également analysée. Les impulsions de toutes les particules présentes étant considérées,  $R_{MPF}$  est moins sensible à l'activité additionnelle que  $R_{bal}$ . L'utilisation conjointe de  $R_{MPF}$  avec  $R_{bal}$  permet d'obtenir des résultats complémentaires. Des écarts significatifs observés entre les deux méthodes indiqueraient ainsi des effets incompris, nécessitant de plus amples investigations.

## 6 Correction résiduelle absolue en $p_T$ avec les événements $\gamma + \text{jets}$

Durant ma thèse, j'étais responsable de la mesure de cette correction avec les événements  $\gamma + \text{jets}$  pour les années 2018 et 2017-UL pour la collaboration CMS. Cette section présente la sélection des événements  $\gamma + \text{jets}$ , leur analyse et les derniers résultats obtenus pour l'année 2018.

### 6.1 Événements utilisés

#### 6.1.1 Ensembles d'événements analysés

**Données** Les jeux de données utilisés pour 2018 et 2017-UL sont basés sur la présence d'un photon dans l'état final. Pour chacune de ces années, plusieurs périodes (*runs*) sont considérées, celles des collisions  $pp$ , dont la liste et les luminosités correspondantes sont présentées dans le tableau X.5.

Run	Luminosité ( $\text{fb}^{-1}$ )	
	2018	2017-UL
A	13,65	-
B	7,06	4,79
C	6,89	9,63
D	31,07	4,25
E	-	9,31
F	-	13,54
Total	58,67	41,52

**Tableau X.5** – Liste des périodes de prise de données considérées et luminosités correspondantes.

**Simulations** Les simulations utilisées contiennent des événements  $\gamma + \text{jets}$  de type  $qg \rightarrow q\gamma$ , comme ceux des figures X.21a et X.21b, et  $qq \rightarrow g\gamma$ , comme celui de la figure X.21c. Pour l'année 2018, les événements sont générés en un seul jeu de données à l'aide de PYTHIA 8 [34] avec les réglages CP5-Flat [35] et une énergie dans le centre de masse de 13 TeV. Dans l'état final, un photon d'impulsion transverse comprise entre 15 et 6000 GeV est généré. Pour l'année 2017-UL, les événements sont générés conjointement à l'aide de PYTHIA 8 [34] avec les réglages CP5 [35] et MADGRAPH 5 [36] et une énergie dans le centre de masse de 13 TeV. Dans l'état final, la somme scalaire des impulsions transverses des jets, notée HT, appartient à un intervalle, définissant ainsi cinq jeux de données. Les sections efficaces des événements simulés ainsi obtenus sont présentées dans le tableau X.6.

Année	Caractéristique	Section efficace (pb)
2018	$p_T^\gamma \in [15, 6000] \text{ GeV}$	283 000,0
2017-UL	$\text{HT} \in [40, 100] \text{ GeV}$	18 700,0
2017-UL	$\text{HT} \in [100, 200] \text{ GeV}$	8 640,0
2017-UL	$\text{HT} \in [200, 400] \text{ GeV}$	2 185,0
2017-UL	$\text{HT} \in [400, 600] \text{ GeV}$	259,9
2017-UL	$\text{HT} > 600 \text{ GeV}$	85,31

**Tableau X.6** – Sections efficaces des différents événements  $\gamma + \text{jets}$  simulés.

### 6.1.2 Sélection des événements

Une sélection des événements à considérer est réalisée lors de l'analyse. En effet, les événements souhaités sont ceux contenant un photon avec un ou plusieurs jets ; un des bruits de fond principal provient d'événements multijet où un des jets est identifié à tort comme un photon. Cette situation peut arriver lorsqu'une fraction importante de l'énergie de ce jet est portée par un ou plusieurs pions neutres, les  $\pi^0$ . Les  $\pi^0$  se propagent sur des distances moyennes de 26 nm puis se désintègrent dans 99 % des cas en deux photons [37]. Ces particules ne laissent donc aucune trace dans le trajectographe et un dépôt d'énergie dans le ECAL, tout comme les photons issus de l'interaction initiale. Un tel jet comporte ainsi une signature similaire à un photon d'un événement  $\gamma + \text{jet}$  autour duquel une activité hadronique existe.

**Sélection sur les photons** Une sélection des photons est appliquée afin de réduire le bruit de fond. La collaboration CMS propose des critères d'identification des photons (lâche, moyen et strict) s'appuyant sur diverses propriétés du « candidat » photon :

- $H/E$  est le rapport de l'énergie hadronique sur l'énergie électromagnétique associées au photon. Un photon est sensé déposer son énergie dans le ECAL et ne laisser aucun signal dans le HCAL. Une faible valeur de  $H/E$  est donc compatible avec un photon.

- $\sigma_{i\eta i\eta}$  est l'étalement en  $\eta$  du dépôt d'énergie dans le ECAL. Cette observable est reliée à la forme de la gerbe électromagnétique. Un seuil maximal sur  $\sigma_{i\eta i\eta}$  est imposé pour l'identification des photons.
- $I_{CH}$  est l'isolation vis-à-vis des hadrons chargés. Elle se définit comme le ratio entre la somme des impulsions transverses de tous les hadrons chargés situés à une distance  $\Delta R$  du candidat photon dans le plan  $(\eta, \phi)$  inférieure à 0,3 et l'impulsion transverse du candidat photon lui-même.
- $I_{NH}$  est l'isolation vis-à-vis des hadrons neutres, analogue à  $I_{CH}$ .
- $I_\gamma$  est l'isolation vis-à-vis des photons autres que le candidat lui-même, analogue à  $I_{CH}$ .

À cet ensemble de variables dont une valeur maximale est admise pour l'identification des photons s'ajoute  $R_9$ , définie comme

$$R_9 = \frac{E_{3\times 3}}{E_{SC}} \quad (\text{X.35})$$

avec  $E_{3\times 3}$  la somme des énergies dans les cristaux du ECAL formant un carré de trois cristaux de côté centré sur le cristal contenant le plus d'énergie dans le *supercluster*, défini dans la section 4.2 du chapitre 3. et  $E_{SC}$  l'énergie dans le *supercluster* [32]. Dans l'analyse des événements  $\gamma + \text{jets}$ , il est demandé que  $R_9 > 0,90$ .

Les variables d'isolation sont corrigées afin de prendre en compte l'empilement. L'isolation corrigée  $I^{\text{corr}}$  s'exprime ainsi en fonction de l'isolation  $I$  comme

$$I^{\text{corr}} = \max(I - \rho \times \mathcal{E}_A, 0) \quad (\text{X.36})$$

où  $\mathcal{E}_A$  est l'aire effective, c'est-à-dire la fraction de l'espace  $(\eta, \phi)$  correspondant à la zone d'isolation à corriger pour l'empilement. Les valeurs des aires effectives utilisées sont présentées dans le tableau X.7.

Région	Hadrons chargés	Hadrons neutres	Photons
$ \eta  \leq 1,0$	0,0112	0,0668	0,1113
$1,0 <  \eta  \leq 1,479$	0,0108	0,1054	0,0953
$1,479 <  \eta  \leq 2,0$	0,0106	0,0786	0,0619
$2,0 <  \eta  \leq 2,2$	0,010 02	0,0233	0,0837
$2,2 <  \eta  \leq 2,3$	0,0098	0,0078	0,1070
$2,3 <  \eta  \leq 2,4$	0,0089	0,0028	0,1212
$ \eta  > 2,4$	0,0087	0,0137	0,1466

**Tableau X.7 – Valeurs de l'aire effective  $\mathcal{E}_A$  utilisée pour corriger la contribution de l'empilement aux isolations des photons vis-à-vis des autres particules.**

De plus, un veto est appliqué aux photons pouvant être reliés à une trace dans le trajectographe. Ce veto permet de limiter la contamination des photons considérés dans l'analyse par des électrons reconstruits à tort comme des photons. Les coupures correspondant aux différents critères d'identification des photons ainsi que leurs efficacités d'identification et de réjection sont résumées dans le tableau X.8.

Le critère d'identification des photons retenu dans l'analyse est le critère strict. Seuls les photons situés dans le bâillet sont utilisés car ils présentent la meilleure résolution. Une coupure sur leur pseudo-rapidité est donc appliquée, telle que  $|\eta| < 1,305$ .

Une étude interne a montré que l'utilisation des photons des bouchons ( $|\eta| > 1,479$ ) permettrait de rajouter près de 30 % d'événements dans les données et de réduire ainsi les incertitudes statistiques. Les corrections résiduelles obtenues pourraient alors être plus précises. Toutefois, la résolution en énergie des photons, représentée en fonction de  $|\eta|$  sur la figure X.20 en page 21, est de l'ordre de 1 % dans le bâillet contre 2,5 % dans les bouchons. Cette différence sur la résolution en énergie de l'objet de référence rend délicate la combinaison des photons du bâillet et des bouchons dans cette analyse. Des travaux sont actuellement menés dans cette direction.

Critère	Lâche		Moyen		Strict	
	Barilet	Bouchon	Barilet	Bouchon	Barilet	Bouchon
Efficacité	90,08 %	90,65 %	80,29 %	80,08 %	70,24 %	70,13 %
Réjection	86,25 %	76,72 %	89,36 %	81,85 %	90,97 %	84,55 %
$H/E$	0,045 96	0,0590	0,021 97	0,0326	0,021 48	0,0321
$\sigma_{i\eta i\eta}$	0,0106	0,0272	0,010 15	0,0272	0,009 96	0,0271
$I_{CH}^{\text{corr}}$	1,694	2,089	1,141	1,051	0,65	0,517
$I_{NH}^{\text{corr}}$	{ 24,032 +0,015 12 $p_T$ +2,259 $p_T^2/10^5$ }	19,722 +0,011 $p_T$ +2,3 $p_T^2/10^5$	1,189 +0,015 12 $p_T$ +2,259 $p_T^2/10^5$	2,718 +0,0117 $p_T$ +2,3 $p_T^2/10^5$	0,317 +0,015 12 $p_T$ +2,259 $p_T^2/10^5$	2,716 +0,0117 $p_T$ +2,3 $p_T^2/10^5$
$I_\gamma^{\text{corr}}$	{ 2,876 +0,004 017 $p_T$ }	4,162 +0,0037 $p_T$	2,08 +0,004 017 $p_T$	3,867 +0,0037 $p_T$	2,044 +0,004 017 $p_T$	3,032 +0,0037 $p_T$

**Tableau X.8** – Valeurs maximales des observables considérées pour l’identification des photons selon le critère utilisé et la région du détecteur dans laquelle se trouve le candidat photon (barillet pour  $|\eta| < 1,479$ , bouchon sinon).

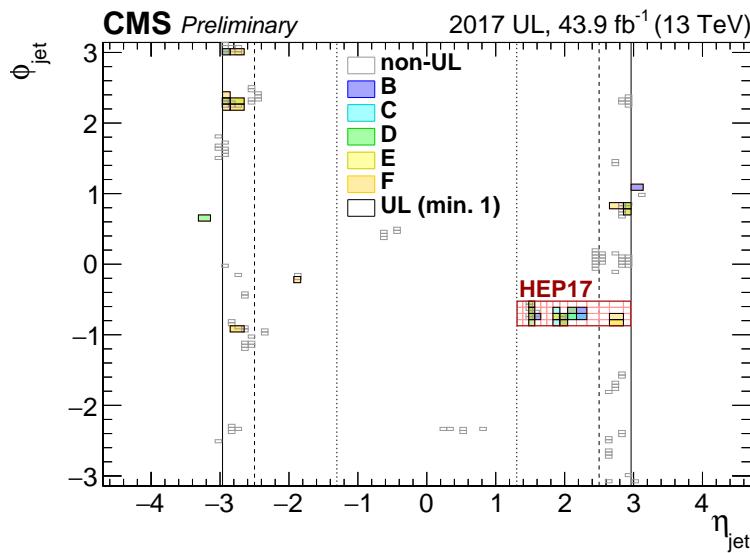
**Sélection sur les jets** Les événements présentant un unique photon sélectionné d’après les critères précédents sont retenus. Avec ce photon doit être présent au moins un jet reconstruit à l’aide de l’algorithme anti- $k_T$  [9] avec un paramètre  $R = 0,4$  et respectant les critères définis dans le tableau X.3 pour les données de 2018 et ceux du tableau X.4 pour les données de 2017-UL. Ces critères permettent de rejeter les jets issus du bruit de fond avec une efficacité de 99 %.

Les jets ainsi sélectionnés sont calibrés en énergie en suivant la procédure décrite dans la section 4 jusqu’à la correction résiduelle relative en  $\eta$  incluse. Ils sont alors triés par impulsion transverse décroissante. Pour s’assurer d’une bonne balance dans le plan transverse entre le photon et le premier jet, c’est-à-dire celui d’impulsion transverse la plus grande, seuls les événements proposant un écart angulaire  $\Delta\phi$  entre le photon et ce jet supérieur à 2,8 rad sont considérés dans la suite. Le photon et le jet sont donc dos à dos dans le plan transverse.

Si un second jet d’impulsion transverse supérieure à 10 GeV et à 30 % de  $p_T^\gamma$  est présent, l’événement est rejeté. L’événement est également rejeté si un lepton (électron ou muon) isolé, en pratique hors des jets, est présent.

Il a été observé que des régions des calorimètres produisent des signaux menant à des reconstructions biaisées de jets. De plus, un système de lecture expérimental « SiPM » a été installé dans le bouchon du HCAL [24]. Il en résulte des calibrations qui ne sont pas optimales dans les régions correspondantes du détecteur. Afin d’éviter ces effets, tout événement est rejeté s’il comporte, dans ces régions des calorimètres, un jet utilisé dans l’analyse. Ces régions sont résumées sur la figure X.24.

**Sélection sur le chemin de déclenchement** Comme expliqué dans la section 2.7 du chapitre 3, un événement observé par le détecteur CMS est sauvegardé si un chemin de déclenchement est activé. Dans cette analyse, seuls les événements dont le photon servant d’objet de référence pour la calibration des jets correspond au photon ayant activé le chemin de déclenchement pour cet événement sont retenus. Or, plus l’impulsion transverse du photon est faible, plus le nombre d’événements pouvant être sauvegardés est importante, si bien que la chaîne d’acquisition arrive à saturation. Pour pallier à cette saturation, il existe différents chemins de déclenchement en fonction de l’impulsion transverse du photon et pour chacun d’entre eux, seule une fraction des événements les déclenchant est effectivement sauvegardée. Cette fraction est nommée *prescale*. À chaque chemin de déclenchement correspond ainsi un *prescale*. Un intervalle d’impulsion transverse du photon retenu est alors défini pour chaque chemin de déclenchement utilisé. Cet intervalle permet de se placer au plateau d’efficacité du chemin de déclenchement. Les différents chemins de déclenchement, leurs *prescales* et intervalles d’impulsion transverse sont présentés dans le tableau X.9. Par exemple, un photon d’impulsion transverse 95 GeV doit avoir déclenché le chemin nommé HLT\_Photon75\_R9Id90\_HE10\_IsoM.



**Figure X.24** – Régions des calorimètres à exclure de l’analyse dans le plan  $(\eta, \phi)$  pour les événements de 2017-UL. Certaines régions ne concernent que certaines périodes de l’année (en couleur). La région « HEP17 » correspond à l’emplacement du système de lecture expérimental « SiPM » [24].

Chemin de déclenchement	$p_T^\gamma$ (GeV)	Prescale 2018	Prescale 2017-UL
HLT_Photon33	[40, 60[	$4,011\,54 \times 10^{-5}$	$3,434\,86 \times 10^{-4}$
HLT_Photon50_R9Id90_HE10_IsoM	[60, 85[	$3,947\,37 \times 10^{-3}$	$7,404\,66 \times 10^{-3}$
HLT_Photon75_R9Id90_HE10_IsoM	[85, 105[	0,015 665 6	0,031 955 2
HLT_Photon90_R9Id90_HE10_IsoM	[105, 130[	0,031 290 0	0,063 632 3
HLT_Photon120_R9Id90_HE10_IsoM	[130, 175[	0,125 036	0,187 872
HLT_Photon165_R9Id90_HE10_IsoM	[175, 230[	0,250 031	0,682 358
HLT_Photon200	[230, $+\infty$ [	1	1

**Tableau X.9** – Chemins de déclenchement, intervalles d’impulsion transverse du photon et prescales utilisés.

## 6.2 Analyse

**Intervalles de  $p_T^\gamma$**  L’analyse a pour but de déterminer la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets, définie dans la section 4.3. Pour cela, l’écart à l’unité du rapport moyen des réponses des jets dans les données et les simulations est déterminé dans différents intervalles de  $p_T^\gamma$ , listés dans le tableau X.10. Ils sont une subdivision des intervalles définis pour les chemin de déclenchement dans le tableau X.9, ce qui permet de séparer le traitement des événements correspondant à différents chemins de déclenchement.

[40, 50[	[50, 60[	[60, 85[	[85, 105[
[105, 130[	[130, 175[	[175, 230[	[230, 300[
[300, 400[	[400, 500[	[500, 700[	[700, 1000[
[1000, 3000]			

**Tableau X.10** – Intervalles de  $p_T^\gamma$  en GeV.

**Intervalles de  $|\eta_{jet}|$**  La calibration en énergie des jets dépend fortement de la région du détecteur dans laquelle le jet laisse un signal, comme le montre la figure X.14 en page 15. Cet effet est dû aux différentes technologies utilisées ainsi qu’au vieillissement non uniforme du détecteur. Des intervalles de pseudo-rapidité du jet sont ainsi définis dans le tableau X.11 afin de séparer le traitement de ces différentes régions.

[0; 0,783[	[0,783; 1,305[	[1,305; 1,93[	[1,93; 2,5[
[2,5; 2,964[	[2,964; 3,2[	[3,2; 5,191[	

**Tableau X.11 – Intervalles larges de  $|\eta^{\text{jet}}|$ .**

**Pondération par l’empilement** Le profil d’empilement, c’est-à-dire la densité de probabilité du nombre d’interactions d’empilement, dépend de la période de la prise de données et du chemin de déclenchement par lequel l’événement est retenu. Ces dépendances sont illustrées sur les graphiques des figures X.25 et X.26. Les événements simulés sont ainsi pondérés pour faire correspondre leur profil d’empilement à celui des données, en prenant en compte la double dépendance avec la période de prise de donnée et le chemin de déclenchement.

**Accord données-simulations** Pour comparer les distributions des observables dans les événements, les distributions des événements simulés sont normalisées à la luminosité mesurée pour le jeu de données considéré. Les comparaisons étant faites entre les données et les événements simulés  $\gamma + \text{jets}$ , un désaccord dû à la contamination à bas  $p_T$  d’événements multijet est attendu, ces événements n’étant pas présents dans les simulations utilisées. De plus, l’utilisation d’une simulation au premier ordre perturbatif seulement influe sur le nombre de jets dans l’état final qui s’en trouve plus faible, en particulier dans les queues des distributions. Ces désaccords se constatent sur les graphiques de la figure X.27 présentant les distributions de l’impulsion transverse du photon, l’énergie transverse manquante et les impulsions transverses du premier et du second jet. Afin de déterminer la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets ainsi que la correction de leur résolution en énergie, seule la comparaison des distributions de  $R_{\text{bal}}$  et  $R_{\text{MPF}}$  est nécessaire. L’accord ainsi obtenu entre données et simulations est considéré comme suffisant.

**Activité additionnelle des jets supplémentaires** La présence d’un jet secondaire, comme sur la figure X.22b, crée un déséquilibre dans  $R_{\text{bal}}$  dû à la physique de l’événement et non à la JES. Il ne faut donc pas corriger cet effet. Pour cela, il faut pouvoir se ramener au cas où un seul jet est présent, comme dans l’événement de la figure X.22a. L’activité additionnelle liée aux jets supplémentaires est quantifiée par la variable

$$\alpha = \frac{p_{T\text{reco}}^{\text{jet } 2}}{p_T^\gamma}. \quad (\text{X.37})$$

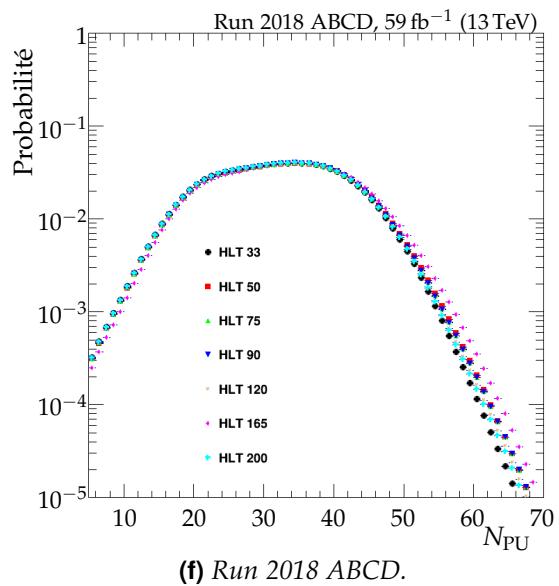
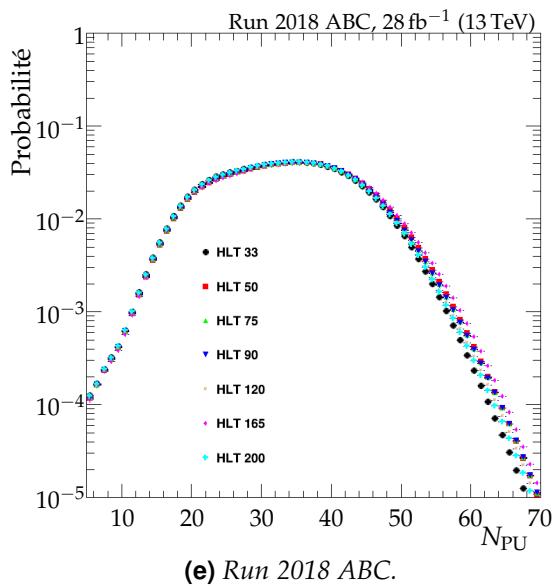
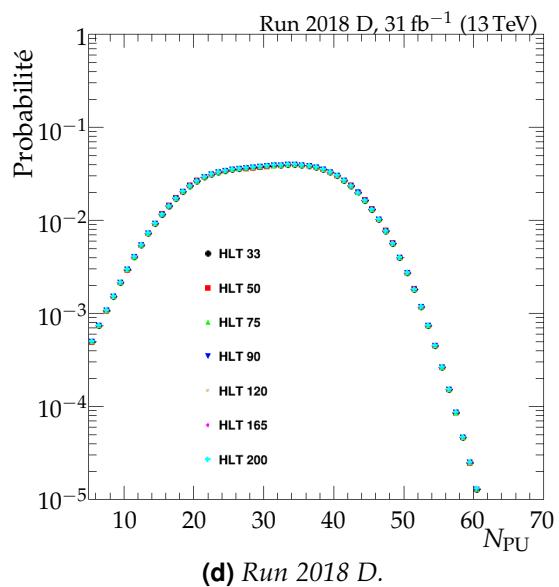
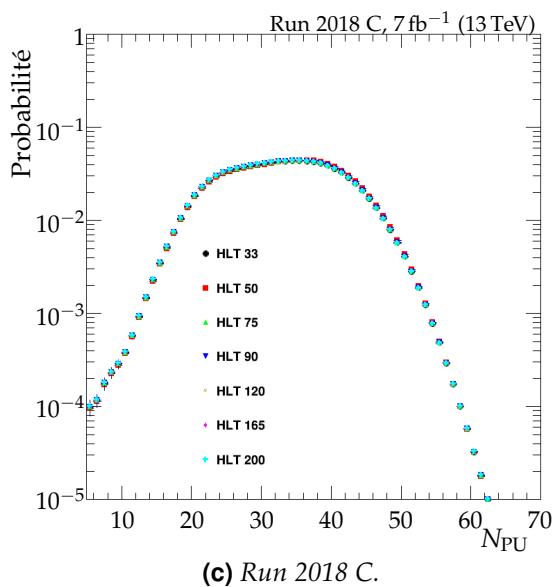
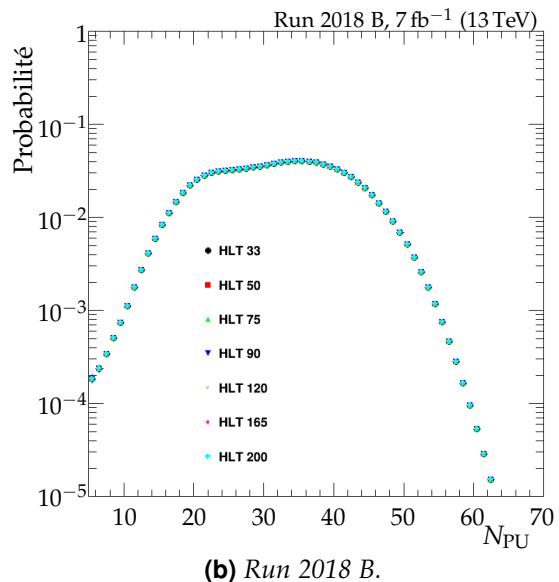
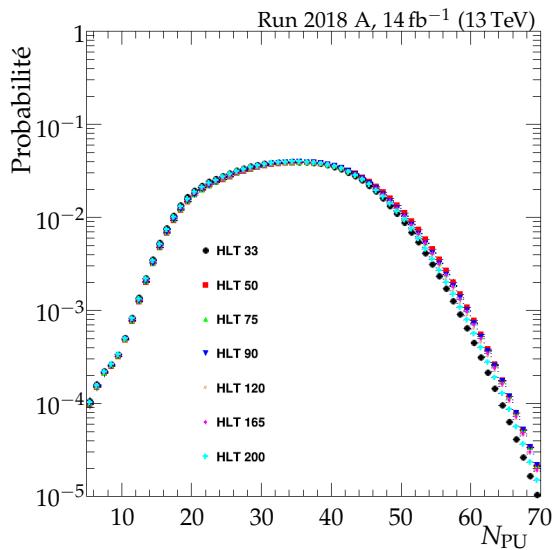
L’analyse des événements  $\gamma + \text{jets}$  est alors réalisée pour différents intervalles de  $\alpha$  afin de pouvoir réaliser par la suite une extrapolation à  $\alpha = 0$ , correspondant au cas idéal d’événements  $\gamma + \text{jet}$ . Les intervalles utilisés sont présentés dans le tableau X.12. Il s’agit d’intervalles inclusifs, c’est-à-dire que chaque intervalle contient l’intervalle précédent. L’évolution des réponses moyennes en fonction de  $\alpha$  y étant linéaire *a posteriori*, ce qui se retrouve dans les résultats de la figure X.29, page 32, ce choix rend possible une extrapolation simple vers  $\alpha = 0$ .

[0; 0,10[	[0; 0,15[	[0; 0,20[	[0; 0,25[	[0; 0,30[
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

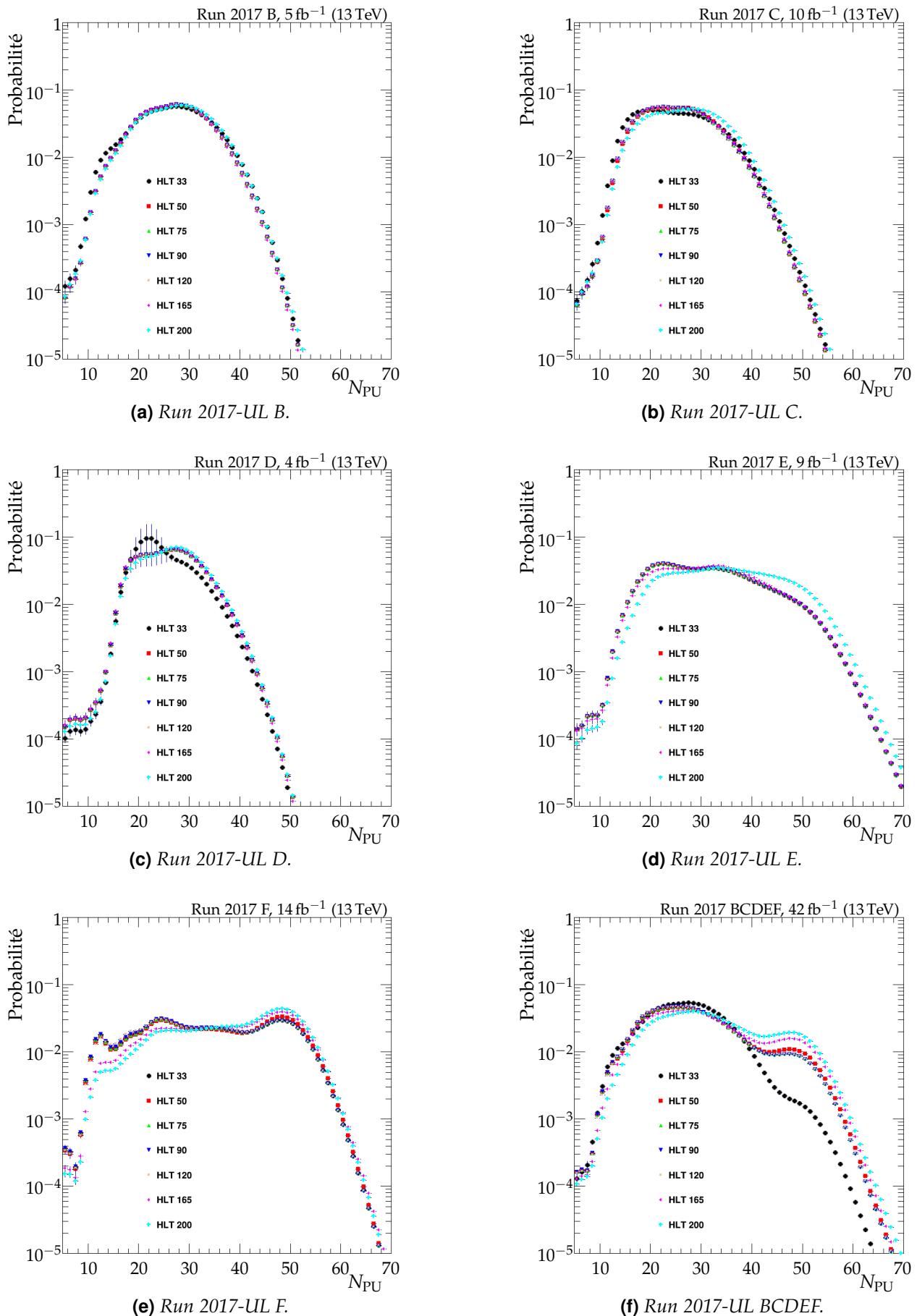
**Tableau X.12 – Intervalles de  $\alpha$  utilisés pour la JES.**

Des études sont en cours afin d’inclure des valeurs de  $\alpha$  allant jusqu’à 1. L’exploitation des événements tels que  $\alpha > 0,3$  est doublement motivée. Ces événements permettraient d’améliorer les corrections vis-à-vis du FSR introduit page 22 et les corrections à bas  $p_T$ . En effet, pour  $p_T^\gamma < 100 \text{ GeV}$ , imposer  $\alpha < 0,3$  implique  $p_T^{\text{jet } 2} < 30 \text{ GeV}$ , ce qui limite fortement le nombre d’événements exploitables.

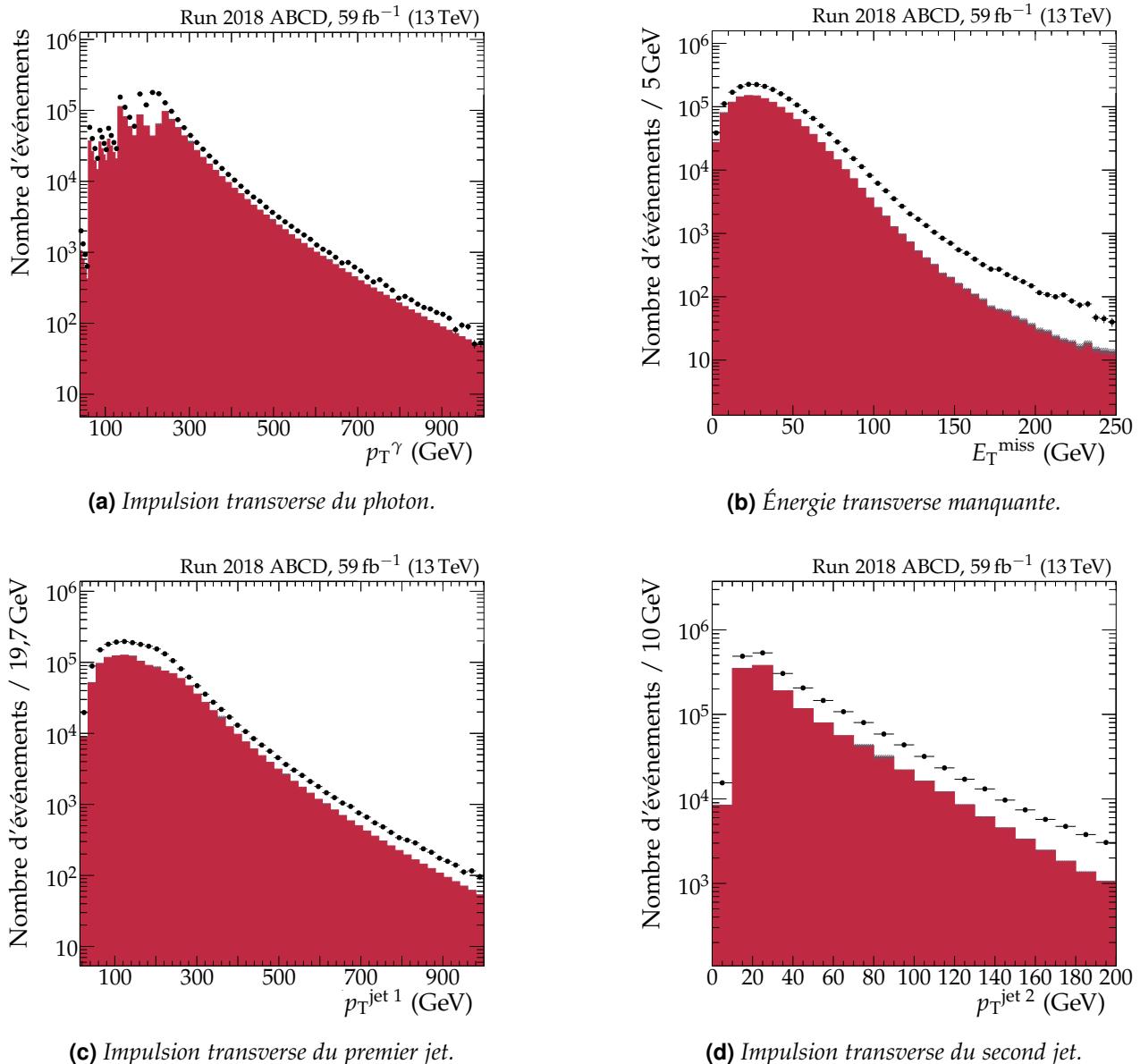
**Obtention des corrections pour  $p_T^\gamma, \eta^{\text{jet}}, (\alpha^{\max})$  donnés** Pour chaque domaine de  $p_T^\gamma$  défini dans le tableau X.10, de  $\eta^{\text{jet}}$  défini dans le tableau X.11 et de  $\alpha$  défini dans le tableau X.12, les distributions des réponses balancée et MPF des données et des simulations sont déterminées. Certaines de ces distributions sont représentées sur la figure X.28.



**Figure X.25** – Densités de probabilité du nombre d’interactions d’empilement  $N_{\text{PU}}$  pour les périodes de prises de données de 2018.



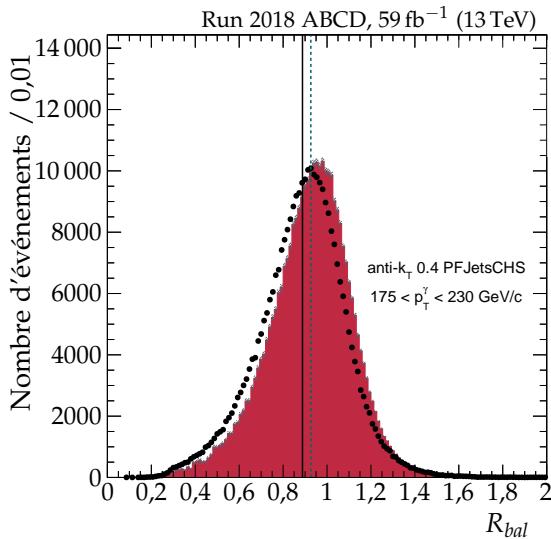
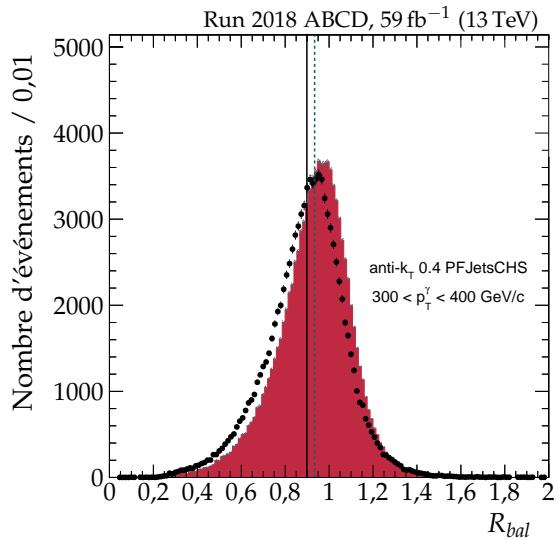
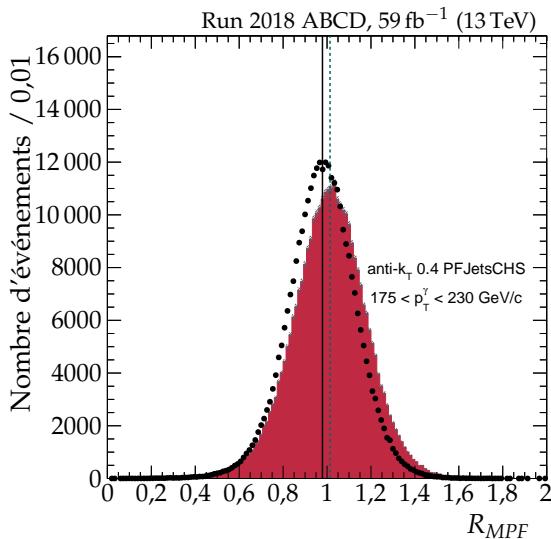
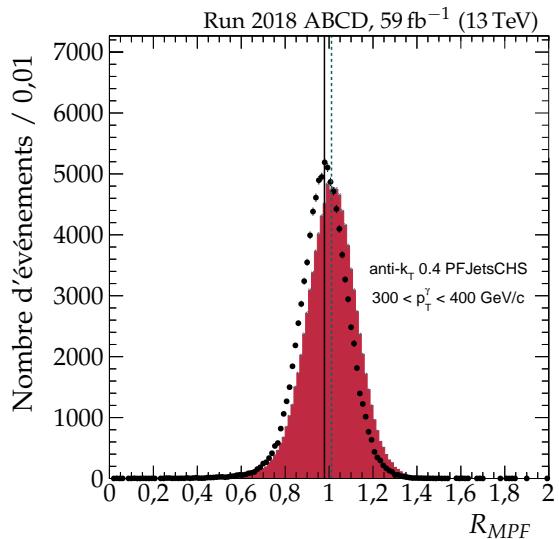
**Figure X.26** – Densités de probabilité du nombre d'interactions d'empilement  $N_{\text{PU}}$  pour les périodes de prises de données de 2017-UL.



**Figure X.27 – Distributions d’observables dans les données (points noirs) et les simulations (histogramme en rouge) pour l’année 2018. Sur la figure X.27a, l’effet des prescales (voir page 26) donnant une distribution en dents de scie est clairement visible.**

Afin de limiter les effets des queues de ces distributions, en particulier dans le cas de la réponse balancée, une troncature leur est appliquée pour n’en conserver que les parties centrales. Pour cela, un ajustement à une gaussienne est réalisé pour chaque distribution. Les points considérés dans la suite sont alors ceux appartenant à un intervalle  $[\bar{R} - \Delta R, \bar{R} + \Delta R]$  où  $\bar{R}$  est le centre de la gaussienne obtenue et  $\Delta R$  est fixé tel que l’intégrale de la distribution tronquée représente 98,5 % de l’intégrale de la distribution initiale. Une estimation des moyennes de ces distributions tronquées est alors obtenue ; ces moyennes sont représentées sur la figure X.28. Un écart est effectivement observé entre données et simulations. Il s’agit précisément de l’écart que la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets doit corriger.

**Extrapolation vers  $\alpha = 0$**  Une extrapolation vers  $\alpha = 0$  est réalisée afin de s’affranchir de l’activité additionnelle des jets décrite dans la section 5.2. Les intervalles de  $\alpha$  utilisés pour la JES sont présentés dans le tableau X.12. L’utilisation des ces intervalles inclusifs permet une extrapolation linéaire en  $\alpha$ , ce qui est réalisé sur la figure X.29.

(a) Réponse balancée pour  $p_T^\gamma \in [175, 230]$  [GeV].(b) Réponse balancée pour  $p_T^\gamma \in [300, 400]$  [GeV].(c) Réponse MPF pour  $p_T^\gamma \in [175, 230]$  [GeV].(d) Réponse MPF pour  $p_T^\gamma \in [300, 400]$  [GeV].**Figure X.28** – Réponses balancée et MPF dans les données (points noirs) et simulations (histogramme en rouge) pour  $\alpha < 0,3$ ,  $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$  et deux intervalles de  $p_T^\gamma$  en 2018.

### 6.3 Résultats

La correction à appliquer aux données, définie par la formule (X.19) d'après la démarche exposée dans la section 4.3, s'obtient en calculant la valeur moyenne des réponses  $R_{bal}$  ou  $R_{MPF}$  pour les données et les simulations dans chacun des intervalles de  $p_T^\gamma$  défini dans le tableau X.10 et de  $\eta^{\text{jet}}$  défini dans le tableau X.11. Elle permet de ramener la réponse moyenne des jets dans les données à celle constatée dans les simulations.

Les résultats ainsi obtenus à l'aide des méthodes de la balance et MPF, avant et après extrapolation vers  $\alpha = 0$ , sont présentés dans les sections 6.3.1 et 6.3.2. Les distributions moyennes des réponses en fonction de  $p_T^\gamma$  dans les données et les simulations, ainsi que leurs rapports, y sont représentés. Un ajustement constant est réalisé dans chaque intervalle de  $\eta^{\text{jet}}$  afin d'obtenir un ordre de grandeur de la correction à appliquer dans cet intervalle. La dépendance en  $p_T$  de la correction est déterminée grâce à un ajustement global réalisé avec les résultats d'autres analyses, présenté dans la section 6.3.3. Enfin, une vérification de la bonne mise en œuvre de la correction ainsi déterminée est présentée dans la section 6.3.4.

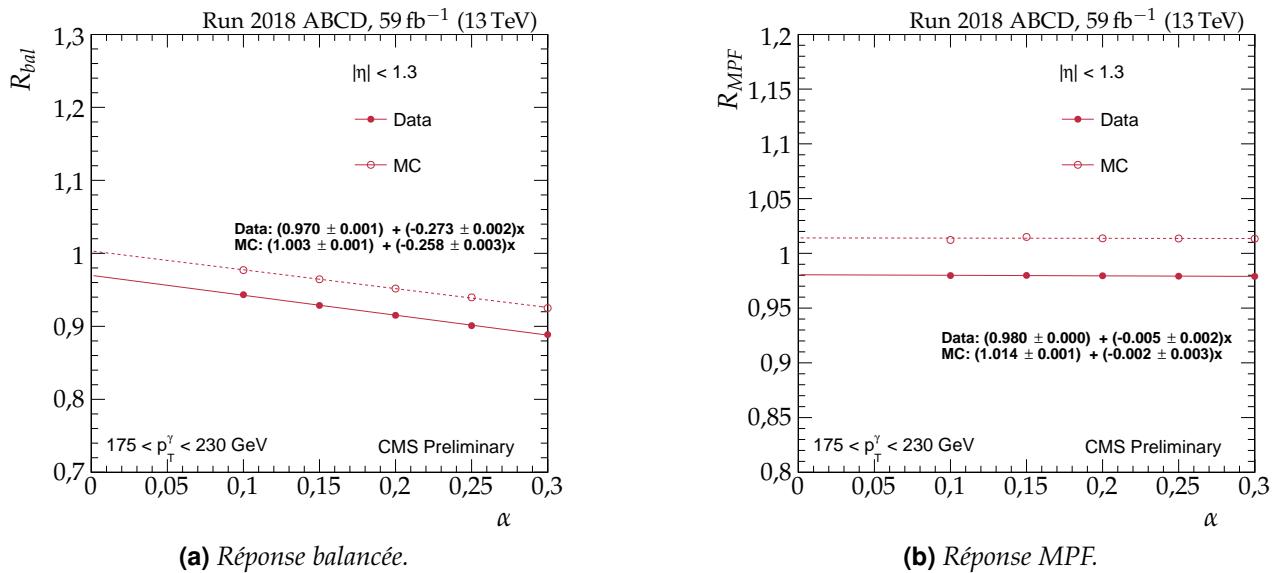


Figure X.29 – Extrapolation vers  $\alpha = 0$  de la réponse des jets pour  $|\eta| < 1,3$  et  $175 < p_T^\gamma < 230 \text{ GeV}$  en 2018.

### 6.3.1 Résultats avant extrapolation

Les distributions des réponses balancées avant extrapolation se trouvent figure X.30, page 33. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 4 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$ , de 6 % pour  $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$  et de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$ .

Les distributions des réponses MPF avant extrapolation se trouvent figure X.31, page 34. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$ , de 5 % pour  $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$ , soit environ 1 % de moins qu'avec la méthode balancée, et de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$ ,

Il est à noter que ces résultats sont obtenus avant extrapolation vers  $\alpha = 0$ . Or, cette extrapolation a un effet beaucoup plus important sur la réponse balancée que sur la réponse MPF, comme le montre la figure X.29.

### 6.3.2 Résultats après extrapolation

L'extrapolation des réponses vers  $\alpha = 0$  est réalisée comme expliqué dans la section 6.2.

Les distributions des réponses balancées après extrapolation se trouvent figure X.32, page 35. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$ , de 5 % pour  $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$ , soit environ 1 % de moins qu'avant extrapolation, et de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$ .

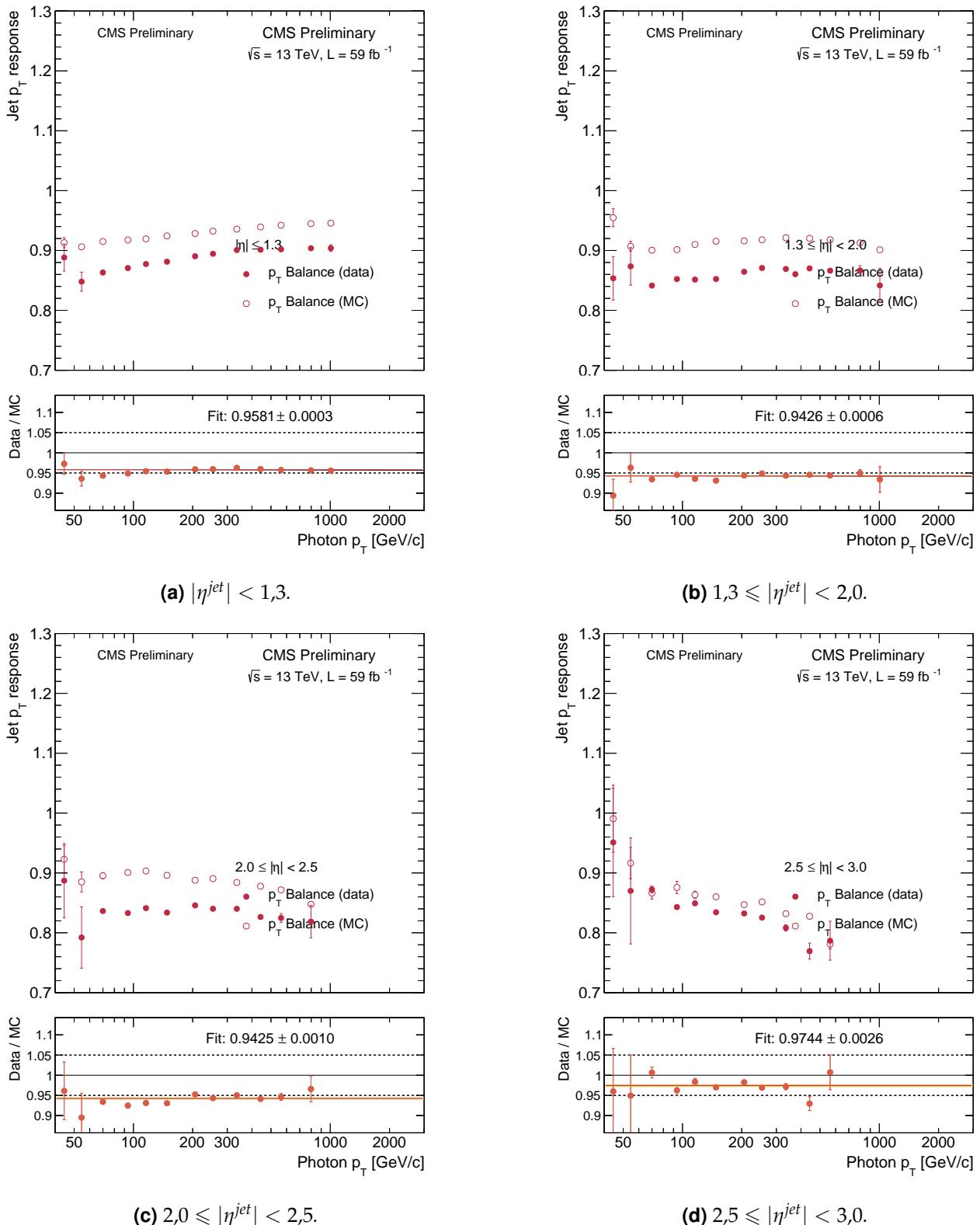
Les distributions des réponses MPF après extrapolation se trouvent figure X.33, page 36. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$ , de 5 % pour  $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$  et de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$ , soit du même ordre qu'avant extrapolation. L'extrapolation a donc bien un effet très faible sur  $R_{MPF}$ .

Les valeurs des rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus sont résumés dans le tableau X.13. L'extrapolation vers  $\alpha = 0$  permet de rétablir l'accord entre les rapport des réponses balancée et MPF. Cet accord permet de valider l'utilisation de ces méthodes afin d'estimer la JES.

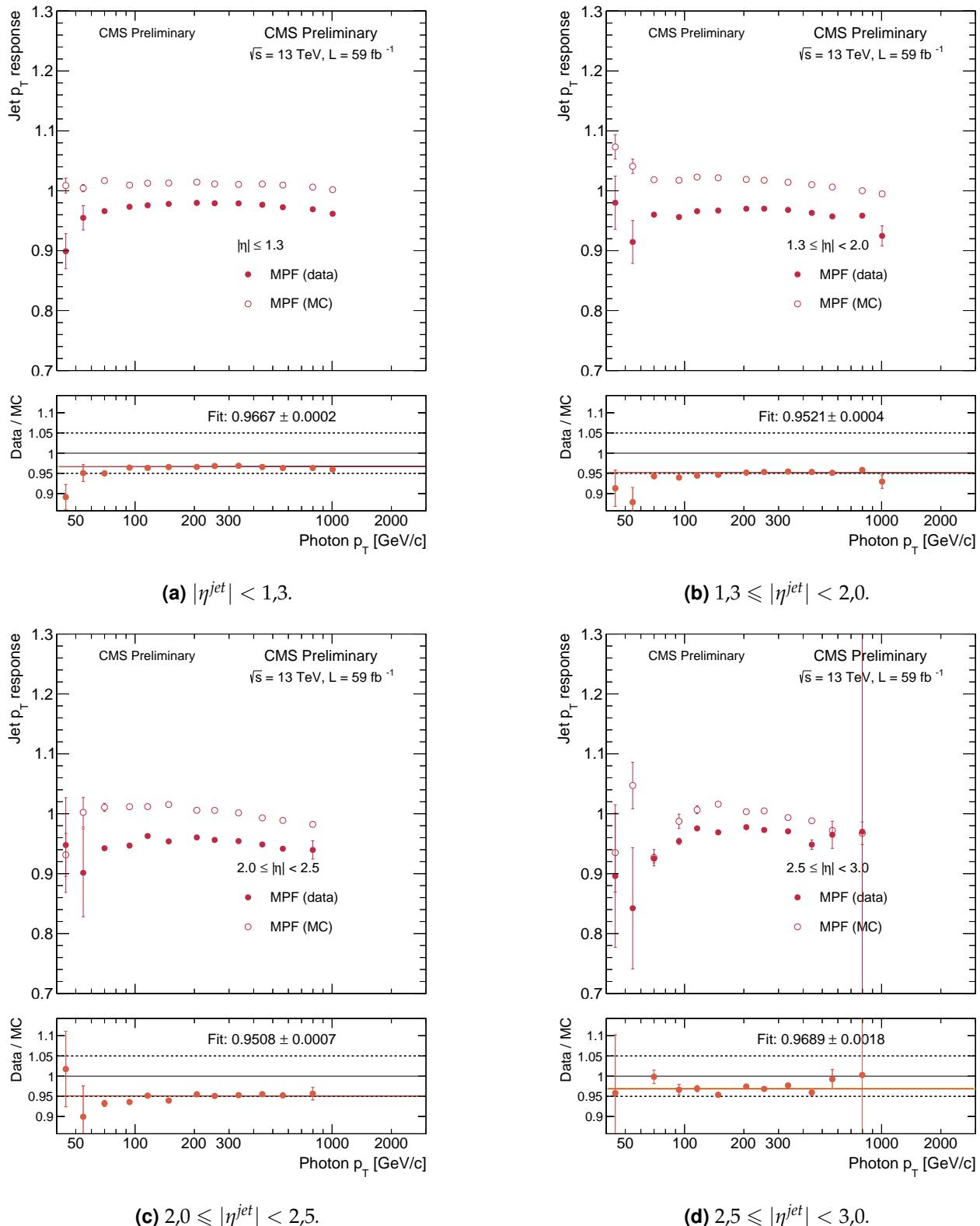
### 6.3.3 Ajustement global

Les événements  $\gamma + \text{jets}$  ne permettent pas à eux seuls de couvrir avec une statistique suffisante l'ensemble de la gamme d'impulsions transverses à calibrer. De plus, l'utilisation de différentes catégories d'événements permet de valider *a posteriori* les résultats des analyses entre elles. Un ajustement global est alors réalisé sur les événements  $Z + \text{jets}$ ,  $\gamma + \text{jets}$  et multijet afin d'obtenir la correction finale à appliquer aux données.

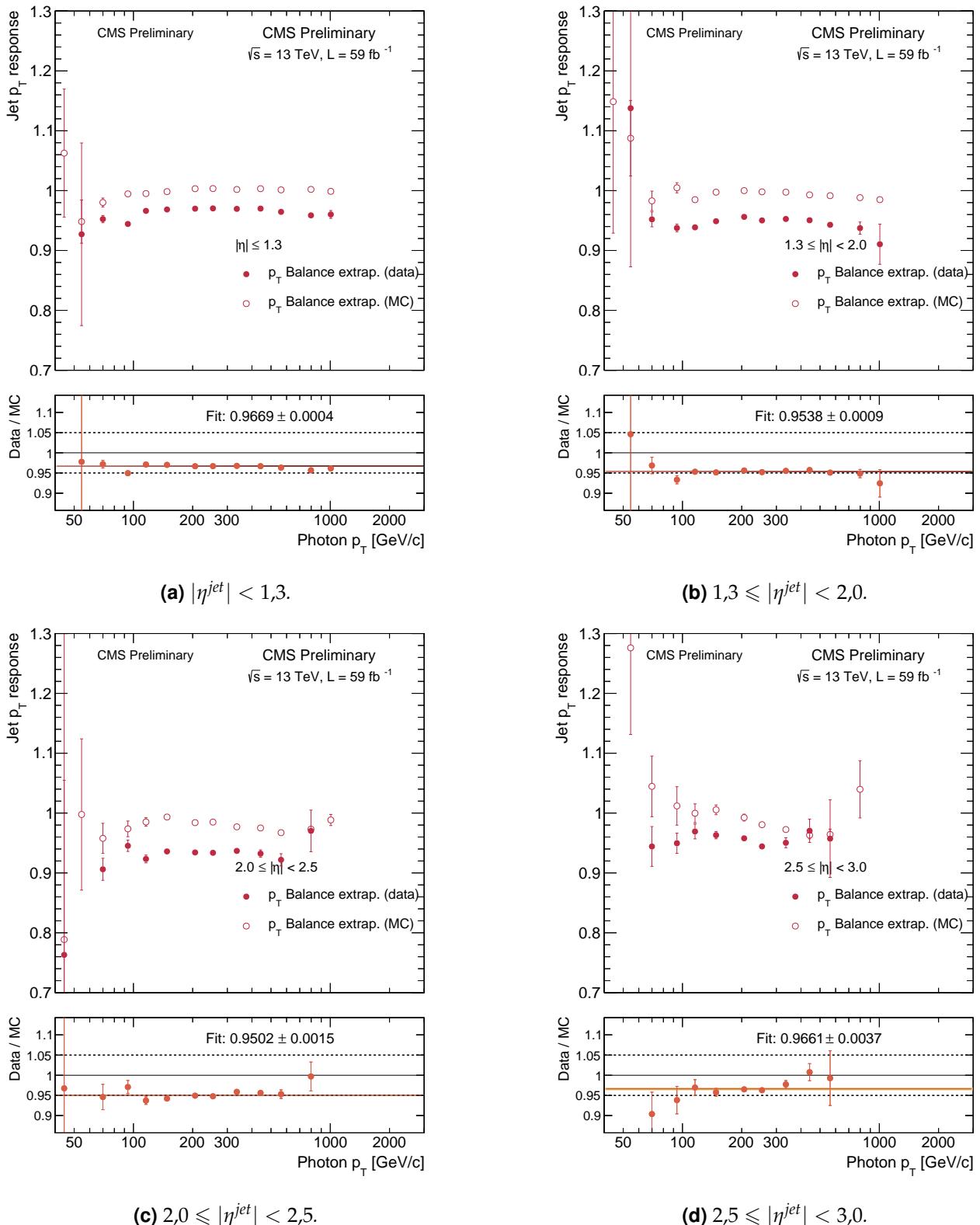
Cet ajustement est réalisé en minimisant un  $\chi^2$  prenant en compte les contraintes de chaque catégorie d'événements. La correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets correspond ainsi à l'ajustement



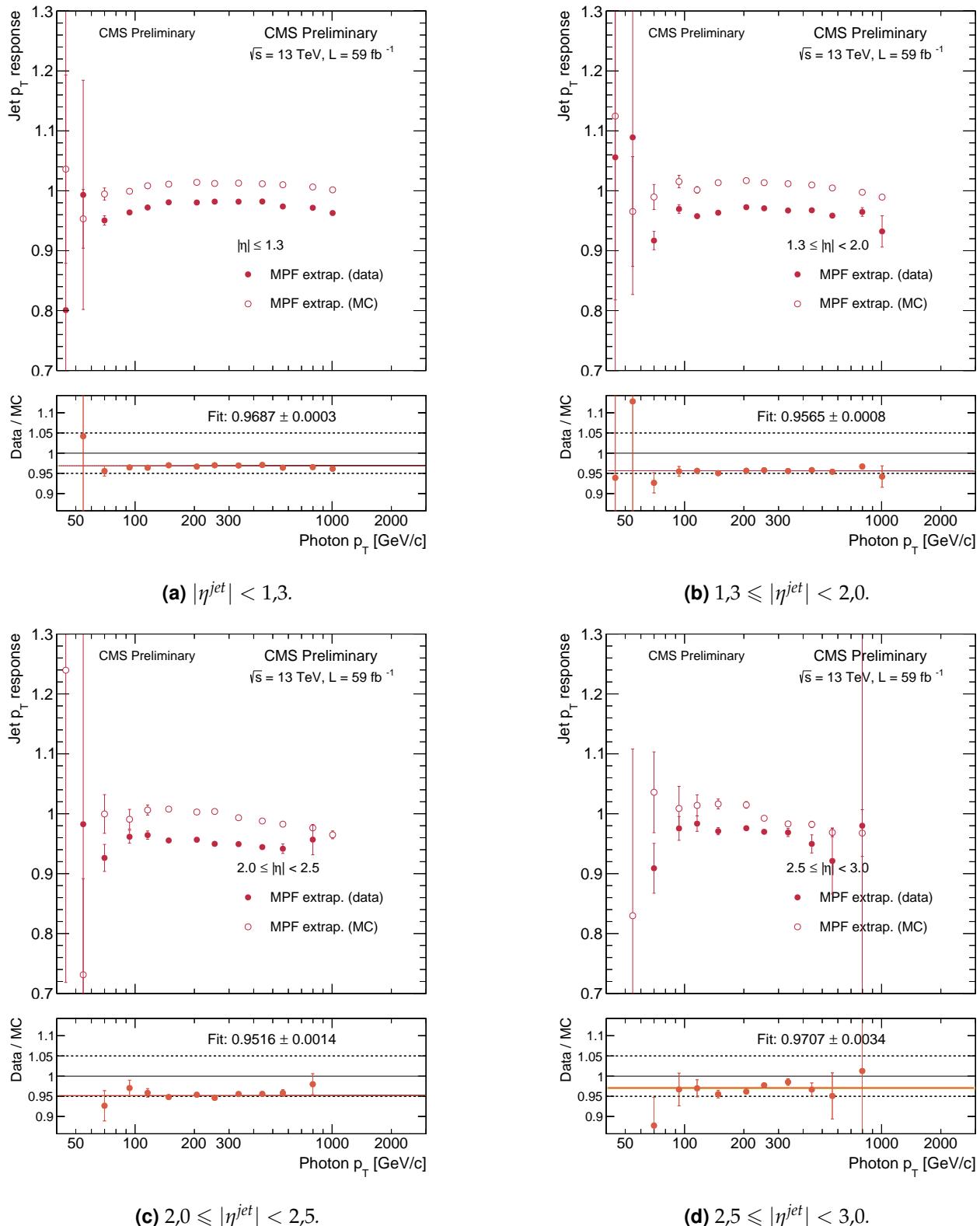
**Figure X.30 – Distributions des réponses balancées moyennes en fonction de  $p_T^\gamma$  pour différents intervalles de  $|\eta^{jet}|$  en 2018 avant extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.**



**Figure X.31 – Distributions des réponses MPF moyennes en fonction de  $p_T^\gamma$  pour différents intervalles de  $|\eta^{jet}|$  en 2018 avant extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.**



**Figure X.32 – Distributions des réponses balancées moyennes en fonction de  $p_T^\gamma$  pour différents intervalles de  $|\eta^{jet}|$  en 2018 après extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.**



**Figure X.33 – Distributions des réponses MPF moyennes en fonction de  $p_T^\gamma$  pour différents intervalles de  $|\eta^{jet}|$  en 2018 après extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.**

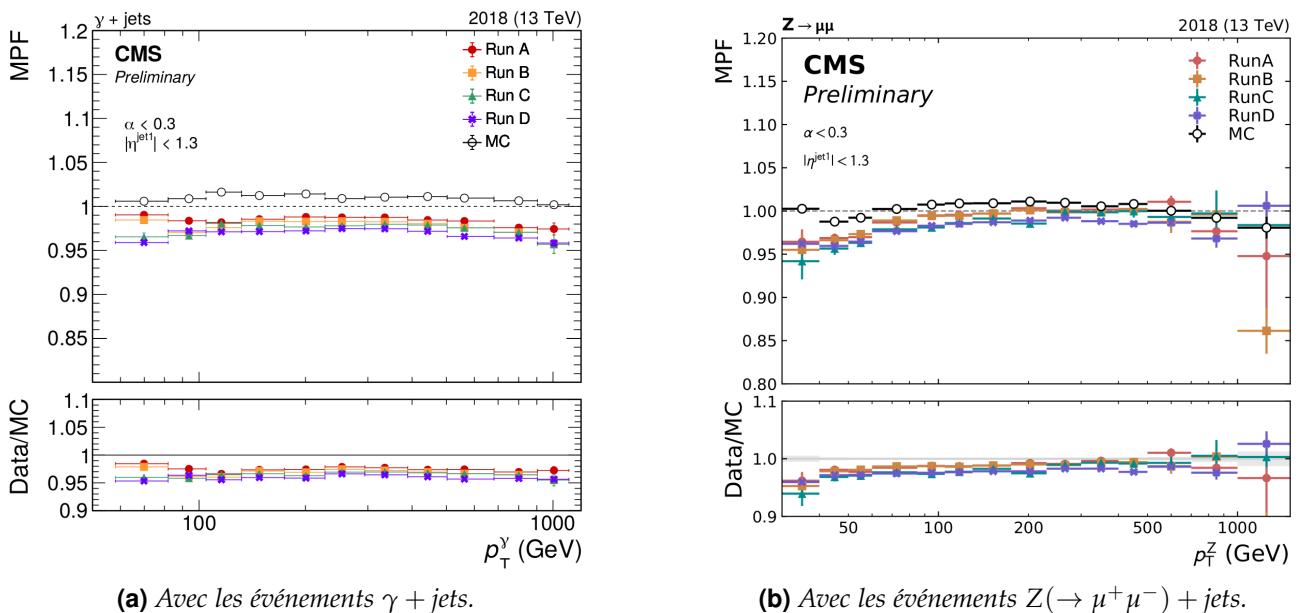
$ \eta^{\text{jet}}  \in$	Réponse balancée		Réponse MPF	
	$\alpha < 0,3$	$\alpha \rightarrow 0$	$\alpha < 0,3$	$\alpha \rightarrow 0$
[0;1,3[	$0,9581 \pm 0,0003$	$0,9669 \pm 0,0004$	$0,9667 \pm 0,0002$	$0,9687 \pm 0,0003$
[1,3;2,0[	$0,9426 \pm 0,0006$	$0,9538 \pm 0,0009$	$0,9521 \pm 0,0004$	$0,9565 \pm 0,0008$
[2,0;2,5[	$0,9425 \pm 0,0010$	$0,9502 \pm 0,0015$	$0,9508 \pm 0,0007$	$0,9516 \pm 0,0014$
[2,5;3,0[	$0,9744 \pm 0,0026$	$0,9661 \pm 0,0037$	$0,9689 \pm 0,0018$	$0,9707 \pm 0,0034$

**Tableau X.13** – Rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus en 2018.

d'une fonction paramétrique. Les incertitudes présentes dans les différentes analyses sont considérées comme des paramètres de nuisance pour l'ajustement. Ces incertitudes sont :

- 4,6 % sur la section efficace de collision inélastique  $pp$  utilisée pour estimer les profils d'empilement;
- les incertitudes de la JEC, décrites section 4.4, page 18;
- l'échelle en énergie des objets de référence, 0,2 % pour les photons et les muons, 0,5 % pour les électrons;
- les effets de l'ISR et du FSR se retrouvant dans l'incertitude de l'extrapolation en  $\alpha$ ;
- la propagation des calibrations des photons et des électrons dans l'énergie transverse manquante.

La figure X.34 compare les résultats produits lors de ma thèse avec les événements  $\gamma + \text{jets}$  à ceux de l'analyse basée sur les événements  $Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) + \text{jets}$  pour l'année 2018. La réponse des jets dans les données diminue du Run A au Run D dans les deux analyses, ce qui est dû à l'évolution des conditions d'acquisition des données au cours du temps. Le vieillissement du détecteur est une des sources de dépendance temporelle de la réponse des jets. La calibration en énergie des jets est ainsi déterminée à la fois pour une année entière, pour les différents *runs* individuellement et éventuellement pour des ensembles de *runs* successifs, ce qui permet d'améliorer la précision obtenue sur l'énergie des jets.

**Figure X.34** – Distributions de la réponse MPF moyenne en fonction de  $p_T$  dans les événements avec  $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$  et  $\alpha < 0,3$  pour chaque période de prise de données et pour les simulations en 2018 [11].

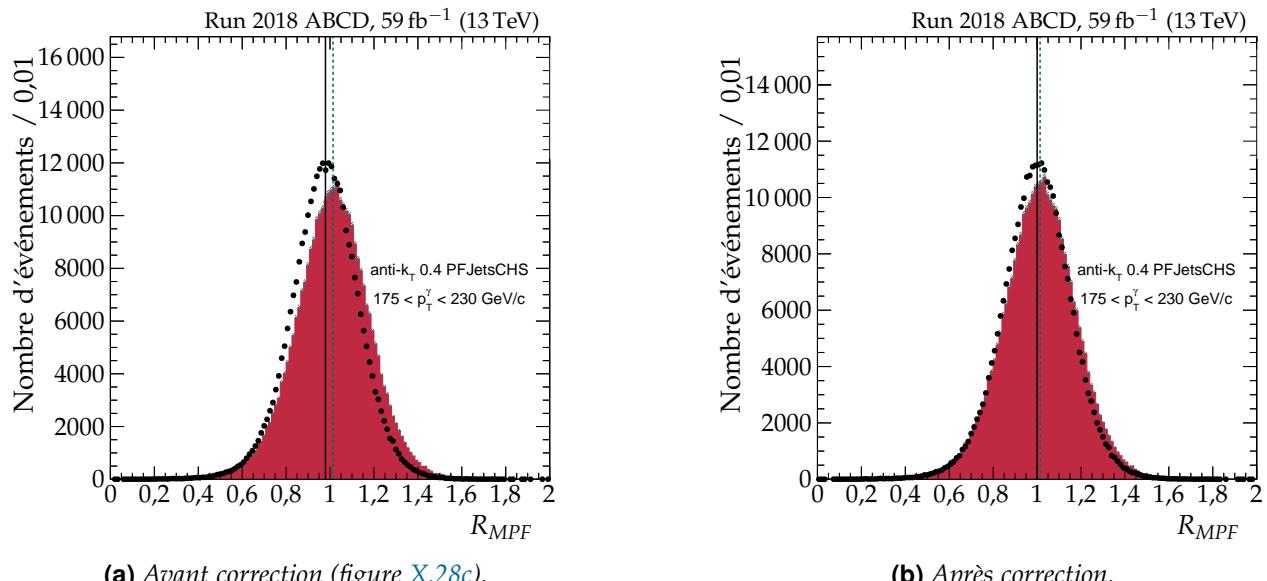
L'ajustement global sur les résultats des différentes analyses est illustré, pour les trois années du Run II, sur la figure X.16 en page 17. La correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets utilisée par la collaboration CMS est ainsi obtenue.

### 6.3.4 Test d'intégrité

Il est possible de vérifier que la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets déterminée permet bien de rapprocher les réponses des jets entre données et simulations. Pour cela, l'analyse est à nouveau réalisée en appliquant la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets lors de leur calibration. Les valeurs des rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus avant et après utilisation de cette correction sont présentés dans le tableau X.14. Ces rapports se rapprochent de 1, ce qui montre que la correction améliore l'accord données-simulations. Cette amélioration peut également se constater sur les distributions des réponses des jets, dont une comparaison est proposée sur la figure X.35 où les deux distributions sont plus proches l'une de l'autre après correction complète.

$ \eta^{\text{jet}}  \in$	Réponse balancée		Réponse MPF	
	avant $\mathcal{C}_{\text{Res}}$	après $\mathcal{C}_{\text{Res}}$	avant $\mathcal{C}_{\text{Res}}$	après $\mathcal{C}_{\text{Res}}$
[0; 1,3[	$0,9669 \pm 0,0004$	$0,9867 \pm 0,0004$	$0,9687 \pm 0,0003$	$0,9877 \pm 0,0003$
[1,3; 2,0[	$0,9538 \pm 0,0009$	$0,9739 \pm 0,0009$	$0,9565 \pm 0,0008$	$0,9753 \pm 0,0008$
[2,0; 2,5[	$0,9502 \pm 0,0015$	$0,9698 \pm 0,0016$	$0,9516 \pm 0,0014$	$0,9724 \pm 0,0014$
[2,5; 3,0[	$0,9661 \pm 0,0037$	$0,9884 \pm 0,0039$	$0,9707 \pm 0,0034$	$0,9922 \pm 0,0035$

**Tableau X.14 – Rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus en 2018 après extrapolation vers  $\alpha = 0$ .**



**Figure X.35 – Comparaison des réponses MPF avant et après correction résiduelle absolue pour  $p_T^\gamma \in [175, 230[ \text{ GeV}$  et  $|\eta| < 1,3$  en 2018.**

## 7 Correction de la résolution en énergie avec les événements $\gamma + \text{jets}$

Déterminer la correction de la résolution en énergie des jets, ou JER, en 2018 et 2017-UL avec les événements  $\gamma + \text{jets}$  a été un des mes travaux de thèse. La méthode est sensiblement la même que pour déterminer la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets, ou JES.

Dans le cas de la JES, la moyenne de la distribution des réponses des jets est corrigée. Pour la JER, c'est la largeur de cette distribution qui doit être corrigée. La sélection des événements est ainsi faite comme dans le cas de la JES décrite section 6.1, à ceci près que la correction résiduelle absolue en  $p_T$  des jets est appliquée.

## 7.1 Définition de la résolution en énergie des jets

La résolution en énergie des jets se détermine à l'aide de leur réponse balancée  $R_{bal}$ . À partir de la définition de  $R_{bal}$  en page 15, il est possible d'écrire dans le cas des événements  $\gamma + \text{jets}$

$$R_{bal} = \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^\gamma} = \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{reco}}} = \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{reco}}} \times \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{ptcl}}} \times \frac{p_T^\gamma}{p_T^{\text{ptcl}}}, \quad (\text{X.38})$$

ce qui se traduit en terme des largeurs des distributions de chacune de ces fractions sous la forme

$$\sigma_{R_{bal}} = \sigma \left( \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{jet } 1}} \right) \oplus \sigma \left( \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{ptcl}}} \right) \oplus \sigma \left( \frac{p_T^\gamma}{p_T^{\text{ptcl}}} \right), \quad (\text{X.39})$$

où  $\oplus$  désigne une somme quadratique. Des termes de cette dernière équation, le premier rend compte de la résolution en énergie des jets au niveau reconstruit et est noté  $\sigma_{\text{JER}}$  dans la suite. Il s'agit de la grandeur d'intérêt dans cette analyse. Le second terme est lié à la physique de l'événement sous-jacent, c'est-à-dire de l'empilement, des émissions de particules secondaires et des neutrinos. Après extrapolation vers  $\alpha = 0$ , la contribution des émissions de particules secondaires devient négligeable. Ce terme est noté  $\sigma_{\text{PLI}}$  dans la suite ; « PLI » signifie interaction au niveau particule (*Particle Level Interaction*). Enfin, le dernier terme est lié à la résolution en énergie des photons, noté  $\sigma_\gamma$ .

L'équation (X.39) se réécrit alors, en utilisant les notations introduites,

$$\sigma_{R_{bal}} = \sigma_{\text{JER}} \oplus \sigma_{\text{PLI}} \oplus \sigma_\gamma, \quad (\text{X.40})$$

ce qui peut se réarranger afin d'exprimer  $\sigma_{\text{JER}}$  sous la forme

$$\sigma_{\text{JER}} = \sigma_{R_{bal}} \ominus \sigma_{\text{PLI}} \ominus \sigma_\gamma. \quad (\text{X.41})$$

La bonne qualité de reconstruction des photons permet de négliger le terme  $\sigma_\gamma$  dans la suite.

## 7.2 Analyse

**Similitudes avec l'analyse menée pour la JES** L'analyse des événements  $\gamma + \text{jets}$  dans le cas de la JER est semblable à celle pour la JES, décrite dans la section 6.2. Les intervalles de  $p_T^\gamma$ ,  $|\eta^{\text{jet}}|$  et  $\alpha$  sont toutefois différents. Les intervalles de ces grandeurs utilisés pour la JER sont définis dans les tableaux X.15, X.16 et X.17. En particulier, les intervalles de  $\alpha$  sont exclusifs, contrairement aux intervalles inclusifs utilisés pour la JES.

[105, 130[	[130, 175[	[175, 200[	[200, 230[	[230, 300[
[300, 400[	[400, 500[	[500, 700[	[700, 3000[	

**Tableau X.15 – Intervalles de  $p_T^\gamma$  en GeV utilisés pour la JER.**

[0,0; 0,522[	[0,522; 0,783[	[0,783; 1,131[	[1,131; 1,305[	[1,305; 1,740[
[1,740; 1,930[	[1,930; 2,043[	[2,043; 2,322[	[2,322; 2,5[	[2,5; 2,853[
[2,853; 2,954[	[2,954; 3,139[	[3,139; 5,191[		

**Tableau X.16 – Intervalles fins de  $|\eta^{\text{jet}}|$  utilisés pour la JER.**

[0; 0,10[	[0,10; 0,15[	[0,15; 0,20[	[0,20; 0,25[	[0,25; 0,30[
-----------	--------------	--------------	--------------	--------------

**Tableau X.17 – Intervalles de  $\alpha$  utilisés pour la JER.**

**Obtention de  $\sigma_{R_{bal}}$  et  $\sigma_{PLI}$  pour  $(p_T^\gamma, \eta^{\text{jet}}, \alpha)$  donnés** Pour chaque domaine de  $p_T^\gamma$  défini dans le tableau X.15, de  $\eta^{\text{jet}}$  défini dans le tableau X.16 et de  $\alpha$  défini dans le tableau X.17, les distributions de la réponse balancée dans les données et les simulations sont déterminées.

Comme dans le cas de la JES, seuls les centres de ces distributions sont considérés afin de limiter les effets des leurs queues. Alors,  $\sigma_{R_{bal}}$  s'obtient à partir des points restant comme étant le rapport de la variance de la distribution de ces points divisée par leur valeur moyenne.

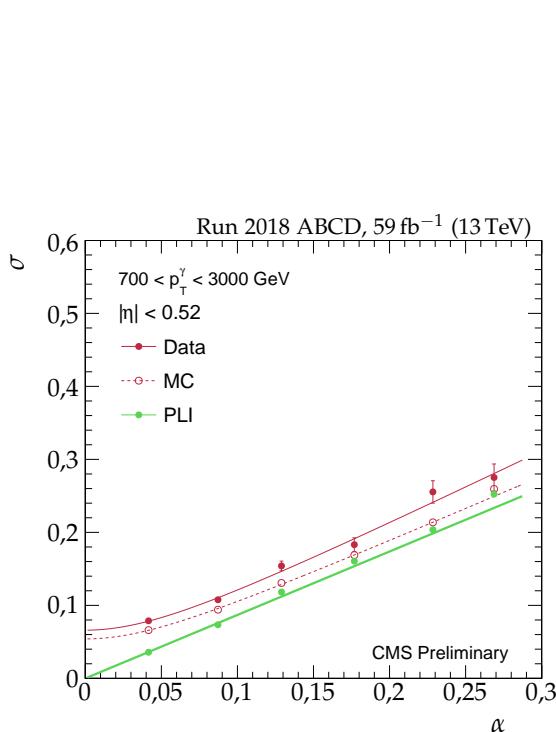
Dans ces mêmes domaines de  $p_T^\gamma$ ,  $\eta^{\text{jet}}$  et  $\alpha$ , les distributions de  $p_T^{\text{jet}1}$  et  $p_T^{\gamma}$  sont estimées à partir des événements simulés. Il est alors possible d'obtenir  $\sigma_{PLI}$ .

**Extrapolation vers  $\alpha = 0$**  Une extrapolation vers  $\alpha = 0$  est réalisée afin de s'affranchir de l'activité additionnelle des jets décrits dans la section 5.2. Les intervalles de  $\alpha$  utilisés pour la JER sont présentés dans le tableau X.17. L'extrapolation n'est plus linéaire comme dans le cas de la JES. Une fonction de la forme

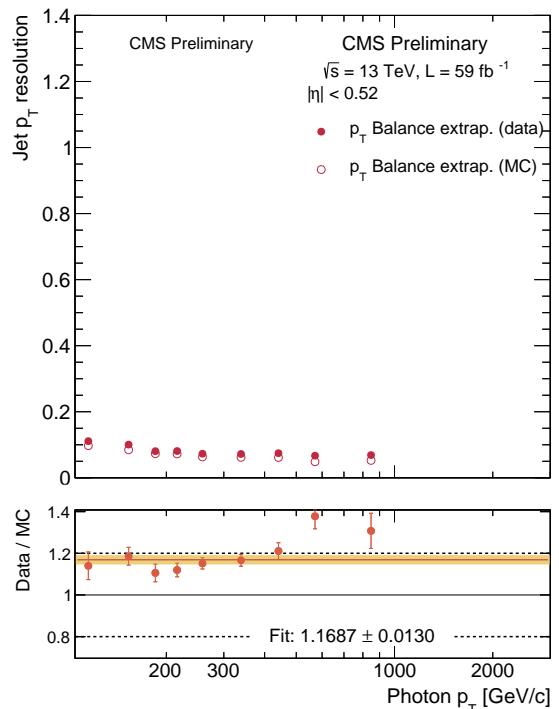
$$\sigma_i = \sqrt{(a_i\alpha)^2 + b_i^2} \quad (\text{X.42})$$

est utilisée pour  $\sigma_{R_{bal}}^{\text{données}}$ ,  $\sigma_{R_{bal}}^{\text{simulations}}$  et  $\sigma_{PLI}$ . L'extrapolation est illustrée sur la figure X.36a.

**Détermination de  $\sigma_{JER}$  en fonction de  $\eta^{\text{jet}}$**  Dans chacun des intervalles de  $p_T^\gamma$  et  $\eta^{\text{jet}}$ , pour les données et les simulations, la contribution estimée de l'événement sous-jacent est soustraite en quadrature à  $\sigma_{R_{bal}}$  afin d'obtenir  $\sigma_{JER}$  en suivant l'équation (X.41). Puis, un ajustement constant en  $p_T$  des rapports de  $\sigma_{JER}$  extrapolés à  $\alpha = 0$  entre données et simulations est déterminé dans chaque intervalle de  $\eta^{\text{jet}}$ , comme sur la figure X.36b. La valeur de cet ajustement correspond au facteur à appliquer à la JER dans l'intervalle de  $\eta^{\text{jet}}$ .



(a) Extrapolation vers  $\alpha = 0$  de la résolution des jets pour  $|\eta| < 0,52$  et  $700 < p_T^\gamma < 3000 \text{ GeV}$  en 2018.



(b) Résolution en énergie des jets extrapolée à  $\alpha = 0$  pour  $|\eta| < 0,52$  en 2018.

Figure X.36 – Détermination de la résolution en énergie des jets.

**Incertitudes** Les incertitudes prises en compte dans la mesure de la JER sont :

- 4,6 % sur la section efficace de collision inélastique  $pp$  utilisée pour estimer les profils d'empilement;

— les incertitudes de la JEC, décrites section 4.4, page 18.

Les incertitudes sur l'échelle en énergie des photons ainsi que leur résolution sont négligées face aux autres incertitudes considérées.

### 7.3 Résultats

Les résultats issus de l'analyse des événements  $\gamma + \text{jets}$  pour l'année 2018 sont présentés sur la figure X.37a. La combinaison avec l'analyses des événements dijet permet d'obtenir les facteurs correctifs utilisés par la collaboration, présentés sur la figure X.37b. Ces facteurs sont de l'ordre de 1,2 dans le barilet et peuvent atteindre 2,3 dans les bouchons.

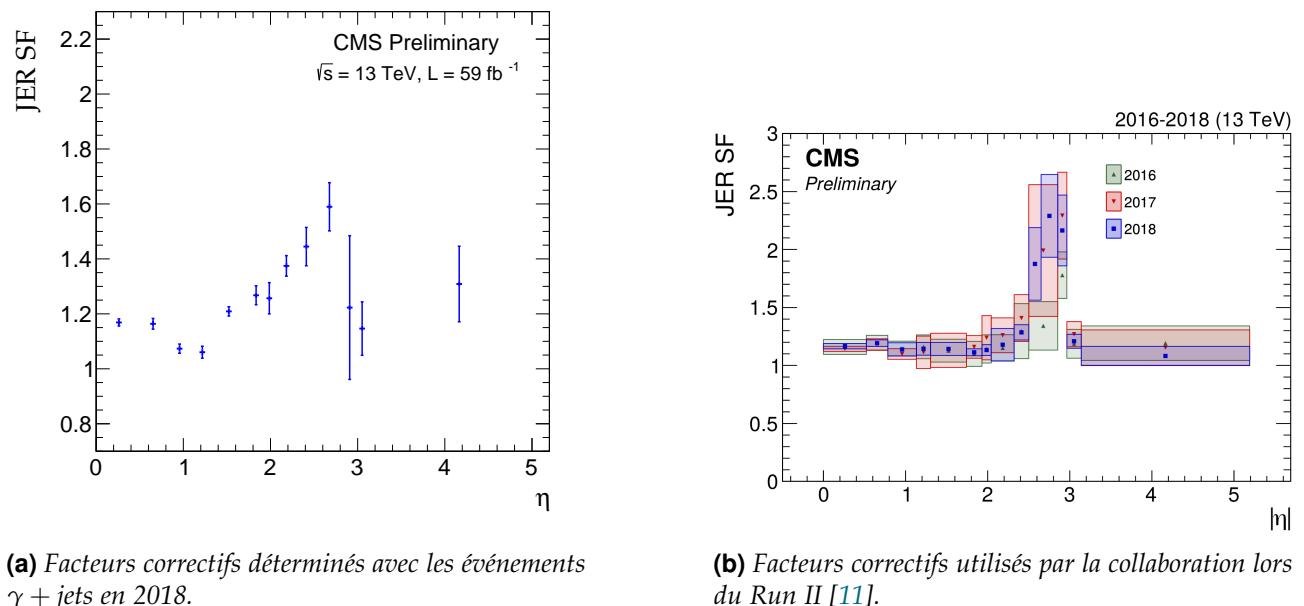


Figure X.37 – Facteurs correctifs de la résolution en énergie des jets.

L'effet de l'application des facteurs correctifs de la résolution en énergie des jets est particulièrement visible dans la région  $2,5 \leq |\eta| < 3,0$  où sa valeur est de l'ordre de 2. Les distributions des réponses balancées des jets dans les données et les simulations avant et après application de ces facteurs sont illustrées pour cette région sur la figure X.38. Les réponses des jets dans les données ne sont pas modifiées par la correction de la résolution en énergie des jets, ces distributions sont donc identiques dans les figures X.38a et X.38b.

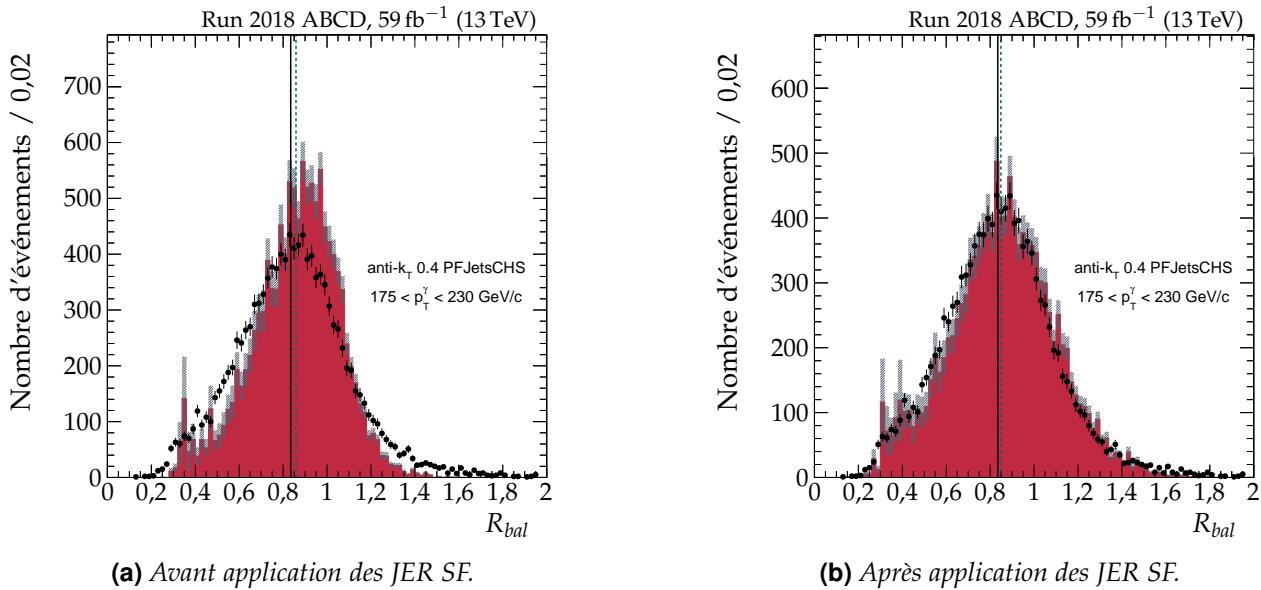
## 8 Conclusion

Ce chapitre a abordé le sujets des jets.

Dans un premier temps, leur mécanisme de formation a été décrit. Leur apparition est due à l'interaction forte, d'abord dans un régime de haute énergie menant à une gerbe partonique, puis dans un régime de basse énergie donnant lieu au phénomène d'hadronisation.

Dans un second temps, la reconstruction des jets a été abordée. Plusieurs algorithmes permettent de regrouper les particules individuellement reconstruites en jets. La forme exacte des jets reconstruits dépend de la méthode utilisée. Au sein de la collaboration CMS, l'algorithme de regroupement principalement utilisé est l'algorithme « anti- $k_T$  ». Une liste de « candidats » jets est ainsi obtenue. Ces candidats doivent alors remplir des critères d'identification afin d'être effectivement considérés comme des jets.

La saveur des jets a brièvement été discutée. En effet, selon le type de particule initiant le jet, ce dernier présente des caractéristiques variables. Bien qu'il soit impossible de remonter à coup sûr à cette particule initiale, ces caractéristiques permettent de l'estimer.



**Figure X.38** – Comparaison des réponses balancées avant et après correction de la résolution en énergie des jets pour  $p_{\text{T}}^{\gamma} \in [175, 230] \text{ GeV}$  et  $2,5 \leq |\eta| < 3,0$  en 2018.

Les jets ainsi reconstruits et identifiés sont des objets dits de « haut niveau » qu'il est nécessaire de calibrer, comme tout autre objet reconstruit. La procédure de calibration en énergie des jets utilisée dans la collaboration CMS a été présentée. Elle permet d'obtenir des jets de la meilleure qualité possible pour les analyses de physique menées par l'ensemble de la collaboration. Il s'agit d'une approche factorisée de plusieurs corrections, chacune ayant pour but de corriger un effet en particulier.

L'obtention d'une de ces corrections pour les années 2018 et 2017-UL a fait partie de mon travail de thèse et a été développée plus en détails, ainsi que la phénoménologie des événements utilisés. Il s'agit d'événements  $\gamma + \text{jets}$  dans lesquels la balance entre le photon et un jet permet d'estimer l'échelle en énergie du jet connaissant celle du photon. Pour l'année 2018, la réponse des jets dans ces événements est inférieure dans les données par rapport aux simulations de 3 % pour  $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$  à 5 % pour  $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$ . L'incertitude absolue sur ces mesures est inférieure à 0,3 %.

La résolution en énergie des jets doit également être corrigée. À l'aide d'une étude similaire menée sur les mêmes événements, également détaillée dans ce chapitre, les facteurs d'échelle ont été obtenus lors de ma thèse pour les années 2018 et 2017-UL.

Pour l'année 2018, la résolution en énergie des jets dans ces événements est inférieure dans les données par rapport aux simulations de  $(6 \pm 3) \%$  pour  $1,131 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 1,305$  à  $(60 \pm 9) \%$  pour  $2,5 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,8$ .

Les jets sont omniprésents dans les collisions du LHC. Ces travaux permettent la bonne caractérisation des jets et sont donc essentiels pour réaliser des analyses de physique de qualité. Parmi ces analyses se trouve celle des événements  $h \rightarrow \tau\tau$ , sujet du chapitre 5.

## Références

- [1] G. P. SALAM. *Elements of QCD for hadron colliders*. 2010. arXiv : [1011.5131 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/pdf/1011.5131.pdf). URL : <https://arxiv.org/pdf/1011.5131.pdf>.
- [2] B. ANDERSSON & coll. « Parton fragmentation and string dynamics » (avr. 1983). URL : <http://cds.cern.ch/record/143980>.
- [3] J.-C. WINTER, F. KRAUSS & G. SOFF. « A modified cluster-hadronisation model ». *European Physical Journal* **C36.3** (août 2004), p. 381-395. doi : [10.1140/epjc/s2004-01960-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s2004-01960-8). URL : <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s2004-01960-8>.

- [4] G. P. SALAM & G. SOYEZ. « A practical seedless infrared-safe cone jet algorithm ». *Journal of High Energy Physics* **05** (mai 2007). DOI : [10.1088/1126-6708/2007/05/086](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2007/05/086). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2007/05/086>.
- [5] M. CACCIARI, G. P. SALAM & G. SOYEZ. « FASTJET user manual ». *European Physical Journal* **C72** (nov. 2012). DOI : [10.1140/epjc/s10052-012-1896-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-1896-2). arXiv : [1111.6097 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1111.6097).
- [6] S. CATANI & coll. « New clustering algorithm for multijet cross sections in  $e^+e^-$  annihilation ». *Physics Letters* **B269**.3 (1991), p. 432-438. DOI : [10.1016/0370-2693\(91\)90196-W](https://doi.org/10.1016/0370-2693(91)90196-W).
- [7] Y. L. DOKSHITZER & coll. « Better Jet Clustering Algorithms » (1997). arXiv : [hep-ph/9707323 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9707323).
- [8] M. WOBISCH & T. WENGLER. « Hadronization Corrections to Jet Cross Sections in Deep-Inelastic Scattering » (1999). arXiv : [hep-ph/9907280 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9907280).
- [9] M. CACCIARI, G. P. SALAM & G. SOYEZ. « The Anti- $k_T$  jet clustering algorithm ». *Journal of High Energy Physics* **04** (avr. 2008). DOI : [10.1088/1126-6708/2008/04/063](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2008/04/063). arXiv : [0802.1189 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/0802.1189).
- [10] G. P. SALAM. « Towards jetography ». *European Physical Journal* **C67**.3-4 (mai 2010), p. 637-686. DOI : [10.1140/epjc/s10052-010-1314-6](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1314-6). URL : <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1314-6>.
- [11] The CMS Collaboration. « Jet energy scale and resolution performance with 13 TeV data collected by CMS in 2016-2018 » (avr. 2020). URL : <https://cds.cern.ch/record/2715872>.
- [12] The DØ Collaboration. « Measurement of the  $B_s^0$  lifetime in the exclusive decay channel  $B_s^0 \rightarrow J/\Psi\phi$  ». *Physical Review Letters* **94** (2005).
- [13] G. BELLINI, I. BIGI & P. DORNAN. « Lifetimes of charm and beauty hadrons ». *Physics Reports* **289**.1 (1997), p. 1-155. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(97)00005-7). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157397000057>.
- [14] The CMS Collaboration. *Performance of quark/gluon discrimination in 8 TeV pp data*. Rapp. tech. CMS-PAS-JME-13-002. Geneva : CERN, 2013. URL : [http://cds.cern.ch/record/1599732](https://cds.cern.ch/record/1599732).
- [15] The CMS Collaboration. « Identification of b-quark jets with the CMS experiment ». *Journal of Instrumentation* **8**.04 (avr. 2013). DOI : [10.1088/1748-0221/8/04/p04013](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/p04013). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/P04013>.
- [16] D. GUEST & coll. « Jet flavor classification in high-energy physics with deep neural networks ». *Physical Review* **D94**.11 (déc. 2016). DOI : [10.1103/physrevd.94.112002](https://doi.org/10.1103/physrevd.94.112002). URL : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.112002>.
- [17] The CMS Collaboration. « Identification of heavy-flavour jets with the CMS detector in  $pp$  collisions at 13 TeV ». *Journal of Instrumentation* **13**.05 (mai 2018). DOI : [10.1088/1748-0221/13/05/p05011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/p05011). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/P05011>.
- [18] F. CHOLLET & coll. KERAS. <https://keras.io>. 2015.
- [19] M. ABADI & coll. TENSORFLOW : Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems. Software available from tensorflow.org. 2015. URL : <https://www.tensorflow.org/>.
- [20] The CMS Collaboration. « Jet energy scale and resolution in the CMS experiment in  $pp$  collisions at 8 TeV ». *Journal of Instrumentation* **12**.02 (fév. 2017). DOI : [10.1088/1748-0221/12/02/p02014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/p02014). URL : <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/F02%2Fp02014>.
- [21] A. DOMINGUEZ & coll. *CMS Technical Design Report for the Pixel Detector Upgrade*. Rapp. tech. Sept. 2012. URL : <https://cds.cern.ch/record/1481838>.
- [22] The CMS Collaboration. *The Phase-1 Upgrade of the CMS Pixel Detector*. Rapp. tech. CMS-CR-2017-135. 06. Geneva : CERN, mai 2017. DOI : [10.1088/1748-0221/12/07/C07009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/C07009). URL : <https://cds.cern.ch/record/2265423>.
- [23] J. MANS & coll. *CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter*. Rapp. tech. Sept. 2012. URL : <https://cds.cern.ch/record/1481837>.

- [24] The CMS Collaboration. « First results from the CMS SiPM-based hadronic endcap calorimeter ». Geneva, août 2018. DOI : [10.1088/1742-6596/1162/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1162/1/012009). URL : <https://cds.cern.ch/record/2636475>.
- [25] S. AGOSTINELLI & coll. « GEANT4 – A simulation toolkit ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A506**.3 (2003), p. 250-303. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
- [26] J. ALLISON & coll. « GEANT4 developments and applications ». *IEEE Transactions on Nuclear Science* **53**.1 (fév. 2006), p. 270-278. DOI : [10.1109/tns.2006.869826](https://doi.org/10.1109/tns.2006.869826).
- [27] J. ALLISON & coll. « Recent developments in GEANT4 ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A835** (2016), p. 186-225. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216306957>.
- [28] T. SJÖSTRAND, S. MRENNA & P. SKANDS. « PYTHIA 6.4 physics and manual ». *Journal of High Energy Physics* **05** (mai 2006). DOI : [10.1088/1126-6708/2006/05/026](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026>.
- [29] The CMS Collaboration. « Event generator tunes obtained from underlying event and multi-parton scattering measurements ». *European Physical Journal* **C76**.3 (2016). DOI : [10.1140/epjc/s10052-016-3988-x](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-3988-x). arXiv : [1512.00815 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1512.00815).
- [30] H. LATTAUD. « Photon et jets avec l’expérience CMS du LHC : de la calibration à la mesure ». Thèse de doct. Université Claude Bernard Lyon 1, sept. 2019. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02422226>.
- [31] J. BELLM & coll. « HERWIG 7.0/HERWIG++ 3.0 release note ». *European Physical Journal* **C76**.196 (avr. 2016). DOI : [10.1140/epjc/s10052-016-4018-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4018-8).
- [32] The CMS Collaboration. « Performance of photon reconstruction and identification with the CMS detector in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  ». *Journal of Instrumentation* **10** (fév. 2015). DOI : [10.1088/1748-0221/10/08/P08010](https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/08/P08010). URL : <https://cds.cern.ch/record/1988093>.
- [33] The CMS Collaboration. « Measurement of differential cross sections for inclusive isolated-photon and photon+jets production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  ». *European Physical Journal* **C79**.20 (juil. 2018). DOI : [10.1140/epjc/s10052-018-6482-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6482-9). URL : [http://cds.cern.ch/record/2628267](https://cds.cern.ch/record/2628267).
- [34] T. SJÖSTRAND & coll. « An Introduction to PYTHIA 8.2 ». *Computer Physics Communications* **191** (2015), p. 159-177. DOI : [10.1016/j.cpc.2015.01.024](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.01.024). arXiv : [1410.3012 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1410.3012).
- [35] The CMS Collaboration. « Extraction and validation of a new set of CMS PYTHIA 8 tunes from underlying-event measurements ». *European Physical Journal* **C80** (mar. 2019). DOI : [10.1140/epjc/s10052-019-7499-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7499-4). URL : <https://cds.cern.ch/record/2669320>.
- [36] J. ALWALL & coll. « MADGRAPH 5 : Going Beyond ». *Journal of High Energy Physics* **06** (2011). DOI : [10.1007/jhep06\(2011\)128](https://doi.org/10.1007/jhep06(2011)128). arXiv : [1106.0522 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1106.0522).
- [37] Particle Data Group. « Review of Particle Physics ». *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **8** (août 2020). DOI : [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104).

