

# Calibration Globale Séquentielle (GS) dans l'expérience ATLAS au LHC

**Reina Camacho**

*Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC)  
Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal-CNRS/IN2P3.  
Aubière, France*



## Résumé

La Calibration Globale Séquentielle (GS : acronyme de Global Sequential Calibration) est une méthode de calibration en énergie pour les jets fondée sur leurs structures longitudinales et transversales. Elle améliore la résolution en énergie des jets calibrés à l'échelle EM+JES, qui est la calibration utilisée dans ATLAS actuellement. Les performances de GS dans le Monte Carlo, sa validation sur les données réelles et les premiers résultats sur l'évaluation de l'incertitude systématique qui lui est associée seront discutés ici.

## 2.1 Introduction

Un jet calorimétrique est un objet reconstruit à partir des dépôts d'énergie mesurés dans les calorimètres provenant des particules issues de l'hadronisation des quarks et des gluons. Habituellement, l'énergie mesurée ne correspond pas à l'énergie initiale transportée par les particules, i.e. la réponse du calorimètre est différente de un. Cela est dû principalement à la nature des calorimètres utilisés, à l'algorithme de reconstruction des jets, aux événements sous-jacents et au pile-up. Comme les jets sont présents dans l'état final de nombreux canaux de désintégration à analyser, la détermination précise de l'échelle en énergie des jets (JES : acronyme de Jet Energy Scale) ainsi que l'obtention d'une résolution optimale sont extrêmement importantes dans ATLAS. ATLAS a mis au point plusieurs systèmes de calibration afin d'atteindre ce but, l'un d'eux est la Calibration Globale Séquentielle (GS).

## 2.2 ATLAS et ses calorimètres

ATLAS (acronyme de A Toroidal LHC ApparatuS : dispositif instrumental toroïdal pour le LHC) est l'un des six détecteurs du Grand Collisionneur de Hadrons (LHC : acronyme de Large Hadron Collider). Ce détecteur de particules à usage général se compose d'une série de cylindres concentriques autour du point d'interaction proton-proton. Il est divisé en 4 grandes parties : le détecteur interne, les calorimètres, le spectromètre à muons et les systèmes magnétiques.

Nous allons décrire dans cette section les calorimètres de l'expérience ATLAS où les particules produites pendant la collision proton-proton déposent leur énergie. ATLAS dispose de quatre calorimètres (comme le montre la FIG. 2.1). La calorimétrie électromagnétique est

assurée par des calorimètres à argon liquide (LAr) avec une haute granularité. Ceux-ci sont divisés en région baril ( $|\eta| < 1.475$ ) et région end-cap ( $1.375 < |\eta| < 3.2$ ). Le calorimètre hadronique est divisé en trois parties distinctes : la région baril ou centrale ( $|\eta| < 0.8$ ) et la région baril prolongé ( $0.8 < |\eta| < 1.7$ ) instrumentée avec un calorimètre à tuiles scintillantes et fer ; la région End-Cap Hadronique (HEC ;  $1.5 < |\eta| < 3.2$ ) avec ses modules de LAr/cuivre et finalement la région du Calorimètre Forward (FCal ;  $3.1 < |\eta| < 4.9$ ) fabriquée avec des modules de LAr/cuivre et LAr/tungstène.

La non-compensation, la présence de matériaux morts et de régions non-instrumentées génèrent une réponse du détecteur (définie comme la fraction entre l'énergie reconstruite à partir des signaux calorimétriques et la vraie énergie portée par les particules,  $E_{reco}/E_{true}$ ) différente de 1. Elle doit par conséquent être corrigée en utilisant un schéma de calibration des jets.

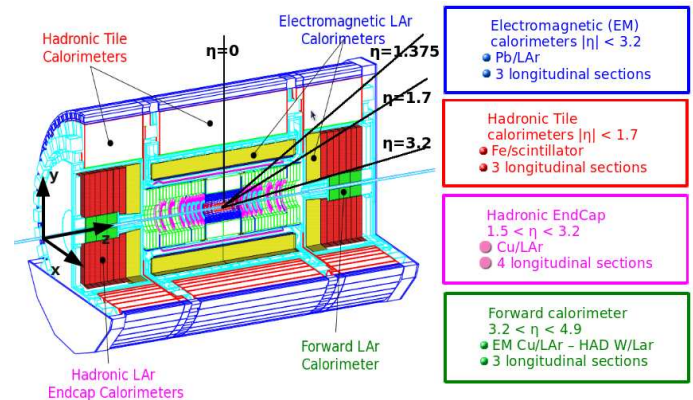


FIGURE 2.1 – Description des calorimètres dans ATLAS

## 2.3 Description de la Calibration Global Séquentielle (GS)

GS est divisée en deux étapes : la première correspond à la correction dite EM+JES qui permet d'obtenir une réponse égale à 1 en moyenne et la deuxième à des corrections globales visant à améliorer la résolution en énergie des jets.

$ \eta $ région	Corr 1	Corr 2	Corr 3	Corr 4
[0, 1.2]	$f_{tile}$	$f_{em3}$	$f_{pres}$	width
[1.2, 1.3]	$f_{tile}$			width
[1.3, 1.4]	$f_{tile}$			width
[1.4, 1.7]	$f_{tile}$	$f_{hec0}$		width
[1.7, 3.0]		$f_{hec0}$		width
[3.0, 3.2]		$f_{em3}$		width
[3.2, 3.4]		$f_{em3}$		
[3.4, 3.5]		$f_{em3}$		width
[3.5, 3.8]	$f_{fcal1}$			width
[3.8, 4.4]	$f_{fcal1}$			width

TABLE 2.1 – Différentes propriétés du jet utilisées pour améliorer la résolution de l'énergie des jets dans chaque région en  $|\eta|$ .

### 2.3.1 Correction de l'échelle d'énergie des jets (JES) (connue comme calibration EM+JES)

Dans cette étape, les coefficients de calibration sont calculés et appliqués en fonction de l'énergie reconstruite du jet non calibré  $E_{reco}^{EM}$  et de son  $\eta$ . Après la correction EM+JES, la réponse en énergie est à un. La détermination des coefficients se fait sur le Monte Carlo à l'aide de la technique d'inversion numérique (NI : acronyme de Numerical Inversion) décrite dans [1]. En plus de cette correction en énergie on applique deux autres corrections sur la position du jet : la première tient compte du fait que le jet provient du vertex primaire et pas du centre du détecteur et l'autre corrige le biais observé dans la reconstruction de  $\eta$  pour certaines régions de transition entre les calorimètres. La calibration EM+JES offre une calibration simple qui est utilisée par défaut dans ATLAS, mais sa résolution en énergie n'est pas optimale.

### 2.3.2 Technique de correction pour améliorer la résolution

L'objectif de cette deuxième étape est d'améliorer la résolution en énergie des jets ( $\sigma_R/R$ ). Il a été montré que la réponse ne dépend pas seulement de l'énergie du jet et de son  $\eta$  mais aussi de variables caractérisant sa structure longitudinale et transversale. Nous noterons ces variables  $x$  par la suite. La correction de cette dépendance en  $x$  permet d'améliorer la résolution, tandis que la valeur moyenne de la réponse reste inchangé. Des informations plus détaillées sur la dérivation des constantes de calibration sur le Monte Carlo se trouvent dans la référence [2].

La structure longitudinale du jet est caractérisée par la fraction d'énergie déposée dans les différentes couches longitudinales des calorimètres  $f_{layer}$ . La structure transversale est caractérisée par la largeur du jet (*width*). Les propriétés utilisées dans les différentes régions en  $\eta$  ainsi que l'ordre dans lequel elles sont appliquées sont résumés dans le Tableau 2.1. L'amélioration de la résolution obtenue est indépendante de l'ordre dans lequel les corrections sont appliquées.

## 2.4 Performances de la Calibration GS

Les performances de GS ont été largement étudiées sur la simulation Monte Carlo. En particulier, des résultats concernant l'estimation quantitative de l'amélioration de la résolution après chaque correction, la sensibilité à la saveur du jet et à la présence de pile-up ont été présentés dans [3]. Dans cette section, nous montrons la réponse et la résolution dans la région centrale du détecteur ( $|\eta| < 0.8$ ) après chaque correction. D'autres systèmes de calibration utilisés dans ATLAS sont également montrés en guise de comparaison : EM+JES, Local Cell Weighting (LCW) et Global Cell Weighting (GCW). La FIG. 2.2 montre que la réponse dans le Monte Carlo reste inchangée lorsque la calibration globale séquentielle est appliquée.

La FIG. 2.3 montre que l'amélioration de la résolution sur les données est compatible avec celle prédite par le Monte Carlo. Ces mesures ont été décrites en détail dans [4]. L'amélioration relative par rapport à EM+JES est d'environ 30% à 200 GeV et la performance de la calibration GS est comparable à celles de LCW et GCW.

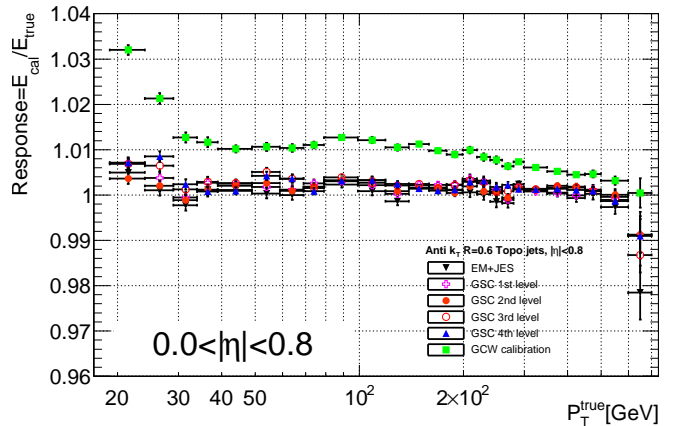


FIGURE 2.2 – Réponse sur le Monte Carlo en fonction du  $p_T$  du jet pour  $|\eta| < 0.8$ .

## 2.5 Validation de GS sur les données réelles

Jusqu'à présent, la GS a montré d'excellentes performances sur le Monte Carlo. Toutefois, nous avons besoin de valider les corrections GS dérivés sur le Monte Carlo en utilisant des données réelles, pour être sûr que nous pouvons les appliquer aux données réelles sans dégradation de la réponse. La validation des corrections GS peut être faite en utilisant la méthode dite **Di-jet Balance**. Cette méthode est également utilisée pour évaluer l'incertitude systématique sur la GS provenant des différences entre les données réelles et la simulation Monte Carlo.

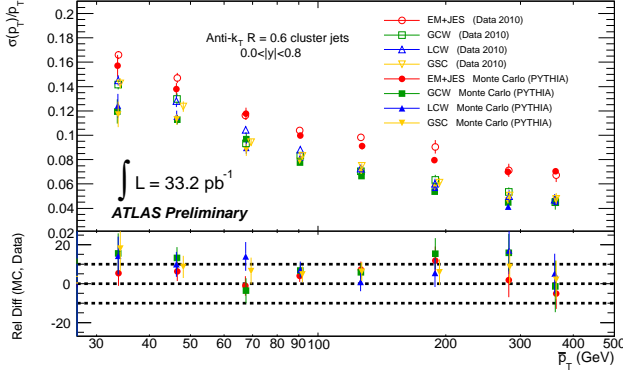


FIGURE 2.3 – Résolution relative sur  $p_T$  déterminée sur les données réelles et sur le Monte Carlo en fonction de  $p_T$  pour  $|\eta| < 0.8$ .

### 2.5.1 Méthode Di-jet Balance

Cette méthode exploite le déséquilibre en  $p_T$  dans les événements avec deux jets dos-à-dos ( $\Delta\phi > 2.8$ ). Les deux jets doivent être dans la même région en  $\eta$ . Pour établir le déséquilibre en  $p_T$  nous utilisons une variable d'asymétrie :

$$A(x) = \frac{p_T^{\text{jet1}}(x) - p_T^{\text{jet2}}}{\bar{p}_T}, \quad (2.1)$$

où  $x$  est l'une des variables utilisées dans la calibration GS (voir Table 2.1) et  $\bar{p}_T = (p_T^{\text{jet1}}(x) + p_T^{\text{jet2}})/2$ . La valeur moyenne de la réponse en énergie des jets en fonction de  $x$  peut être calculée en utilisant :

$$\langle R(x) \rangle = \frac{1 + \langle A(x) \rangle / 2}{1 - \langle A(x) \rangle / 2} \quad (2.2)$$

La mesure de la réponse en utilisant l'asymétrie définie dans l'Équation 2.1 suppose que l'asymétrie au niveau des vrais jets (reconstruits à partir des vraies particules et non pas des signaux calorimétriques) est égale à zéro, ce qui n'est pas vrai. L'asymétrie mesurée est un mélange des effets du détecteur (ce que nous voulons mesurer) et du déséquilibre au niveau des vrais jets. Il a été montré que les deux effets peuvent être découplés si le déséquilibre est faible. En soustrayant l'asymétrie vraie  $A_{\text{truth}}$  à l'asymétrie mesurée  $A(x)$  nous éliminons la contribution du déséquilibre au niveau des vrais jets :

$$A(x) \rightarrow A(x) - A_{\text{truth}}(x) \quad (2.3)$$

où

$$A_{\text{truth}}(x) = 2 \times \frac{p_{T,\text{truth}}^{\text{jet1}}(x) - p_{T,\text{truth}}^{\text{jet2}}}{p_{T,\text{truth}}^{\text{jet1}}(x) + p_{T,\text{truth}}^{\text{jet2}}}. \quad (2.4)$$

Ce calcul a été effectué en bins en  $\eta$  du jet et bins en  $\bar{p}_T$ . La méthode peut être utilisé dans les données (où  $A_{\text{truth}}$  vient toujours de la simulation) pour valider les corrections déterminées en Monte Carlo, grâce à l'ac-

cord entre données et simulation dans les distributions des asymétries.

### 2.5.2 Comparaison données/MC des distributions des asymétries

La FIG. 2.4 montre une comparaison entre les asymétries mesurées sur le Monte Carlo et sur les données réelles pour  $80 \text{ GeV} < \bar{p}_T < 110 \text{ GeV}$  et  $|\eta| < 0.6$  en fonction de quelques propriétés utilisées pour calculer les corrections GS. Le désaccord est au maximum de 1%. Des résultats similaires sont trouvés dans les autres intervalles en  $p_T$  et  $\eta$  pour les variables  $f_{\text{layer}}$ . Pour la variable  $width$ , l'accord est aussi meilleur que 1% sauf pour  $1.7 < |\eta| < 2.1$  où les désaccords peuvent aller jusqu'à 5% pour des faibles valeurs de la largeur.

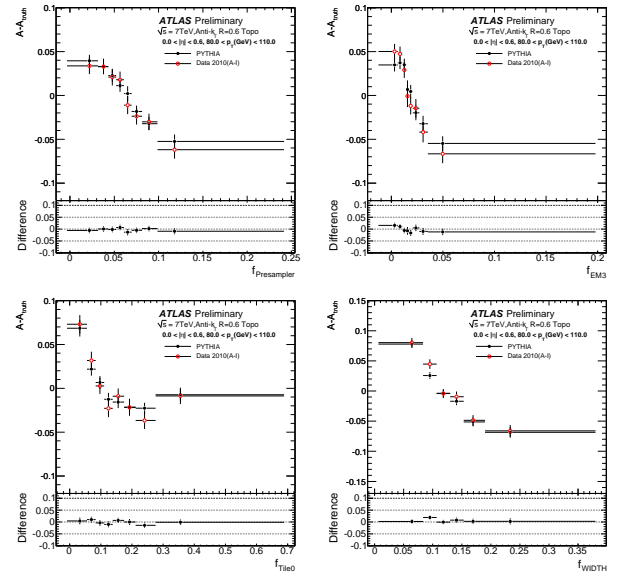


FIGURE 2.4 –  $A - A_{\text{truth}}$  sur les données réelles (points noirs) et sur la simulation Monte Carlo (carrés vides). Les jets utilisés ont  $80 \text{ GeV} < \bar{p}_T < 110 \text{ GeV}$  et  $|\eta| < 0.6$ .

### 2.5.3 Différence entre les corrections GS dérivées sur le Monte Carlo et sur les données réelles

L'incertitude systématique sur la GS provenant des différences entre les données réelles et la simulation Monte Carlo est liée à la différence entre les corrections GS dérivées sur le Monte Carlo et les corrections GS dérivées sur les données réelles (ces dernières sont calculées en utilisant la méthode Di-jet Balance).

La FIG. 2.5 compare la réponse en énergie des jets en fonction de  $p_T$  après application des corrections GS dérivées des données réelles (points rouges) et de la simulation (points noirs). Les corrections dérivées sur le Monte Carlo et sur les données réelles donnent des réponses compatibles à mieux que 2.5% (5%) pour  $p_T > 60 \text{ GeV}$  ( $p_T < 60 \text{ GeV}$ ) et  $|\eta| < 2.8$ .

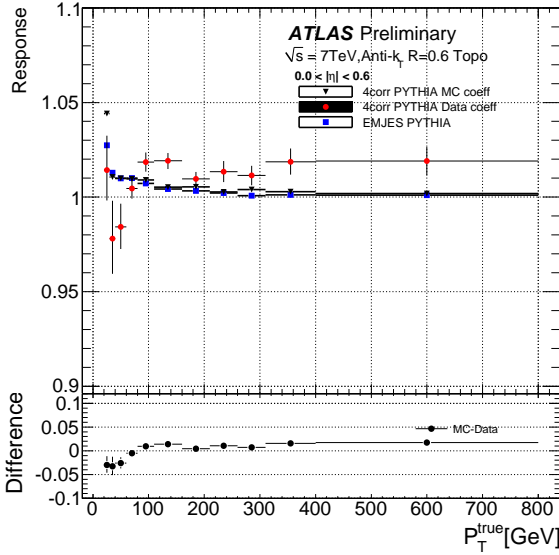


FIGURE 2.5 – Réponse en fonction de  $p_T$  après application des corrections provenant de la simulation Monte Carlo (en rouge) et des données (en noir) pour des jets ayant  $|\eta| < 0.6$ . La différence entre données et Monte Carlo est présentée sur la figure du bas.

### 2.5.4 Incertitude liée à l’asymétrie

$$A_{truth}$$

L’asymétrie vraie est soustraite de l’asymétrie reconstruite afin d’éliminer le déséquilibre au niveau des vrais jets comme indique l’Equation 2.3. L’asymétrie vraie dépend de la simulation Monte Carlo utilisée pour la calculer. Les résultats présentés jusqu’ici ont été obtenus en utilisant un échantillon Monte Carlo de référence (Pythia). Afin d’estimer l’incertitude sur l’asymétrie vraie, nous avons considéré deux échantillons simulés supplémentaires : un échantillon Pythia avec une modélisation des événements sous-jacents différente (Perugia2010) et un échantillon produit avec un générateur différent (Herwig++).

Deux nouveaux ensembles de corrections ont été calculés en utilisant les asymétries vraies provenant des échantillons Perugia2010 et Herwig++. La FIG. 2.6 montre la réponse en fonction de  $P_T$  en Monte Carlo après application des trois ensembles de corrections déterminés sur les données. Nous observons des différences de moins de 1% pour  $p_T > 60$  et  $|\eta| < 2.8$ .

## 2.6 Conclusion

GS est une méthode de calibration qui permet d’améliorer la résolution en énergie des jets à la fois dans la simulation et sur les données réelles. Ses performances sont comparables à celles des autres méthodes de calibration utilisées dans ATLAS : LCW et GCW. Une caractéristique très intéressante de la méthode GS est qu’il est possible de la valider sur les données réelles en utilisant la méthode di-jet balance. Les résultats obtenus jusqu’à présent montrent un bon accord entre

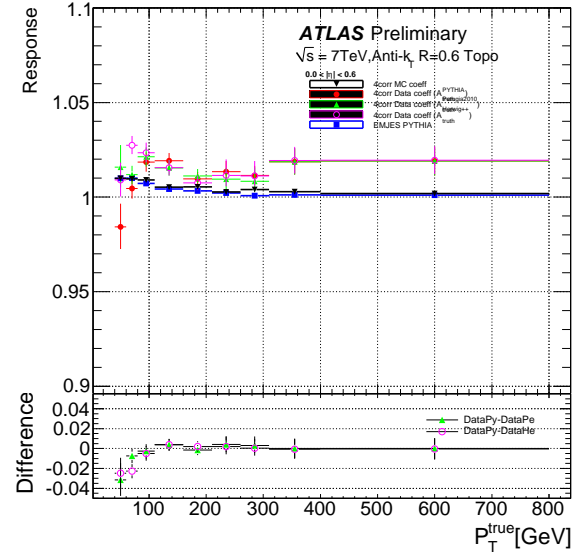


FIGURE 2.6 – Réponse en fonction de  $p_T$  après application des différentes corrections pour des jets ayant  $|\eta| < 0.6$

les données réelles et la simulation. Différentes études dédiées pour estimer les incertitudes systématiques associées à GS sont en cours.

## Remerciements

Je voudrais remercier les organisateurs des JJC 2010 et les coordinateurs des différentes sessions qui ont rendu possible un tel événement de rencontres et d’échanges. Cette thèse est financée par le Conseil Régional d’Auvergne, France.

## Références

- [1] D. Lopez Mateos, E.W. Hughes and A. Schwartzman (ATLAS NOTE ATL-PHYS-INT-2009-077, 2009).
- [2] D. Lopez Mateos, E.W. Hughes and A. Schwartzman (ATLAS NOTE ATL-PHYS-INT-2009-051, 2009)
- [3] D. Lopez Mateos, E.W. Hughes and A. Schwartzman (ATLAS NOTE ATL-COM-PHYS-2010-058, 2010)
- [4] The ATLAS Collaboration (ATLAS-CONF-2010-054, 2010)
- [5] The ATLAS Collaboration (ATLAS-CONF-2010-053, 2010)