

EFFET DES ZONES NON INSTRUMENTÉES D'UN CALORIMÈTRE HADRONIQUE SEMI DIGITAL POUR LE DÉTECTEUR ILD

Matteo Loup
Encadrant : Gérald Grenier
Université Claude Bernard Lyon 1

13/05/2024 au 21/06/2024.
E-mail : matteo.loup@etu.univ-lyon1.fr

Table des matières

1	Introduction	2
2	Le calorimètre hadronique semi-digital SDHCAL	2
2.1	Les gerbes hadroniques	2
2.2	Estimation de l'énergie des hadrons	2
2.3	Géométrie et zones non instrumentées du SDHCAL	3
3	Correction angulaire	5
3.1	Correction appliquée	5
3.2	Résultats	6
4	Correction inter-module	7
4.1	Corrections appliquées	7
4.1.1	1ère correction	8
4.1.2	2ème correction	8
4.1.3	3ème correction	9
4.1.4	4ème correction	10
5	Conclusion	11

Resumé

Ce stage s'est déroulé à l'institut de physique des 2 infinis à Lyon et plus précisément dans l'équipe FLC. Il a été donné pour objectif d'étudier les zones non instrumentées d'un prototype de calorimètre hadronique conçu à l'IP2I pour le futur détecteur ILD. La partie principale du détecteur est composée de 5 modules espacées par des zones démunies de cellule de détection. Ces zones ont ainsi une influence sur le nombre de cellules touchées, entraînant ainsi une mauvaise estimation de l'énergie de la particule mesurée. Plusieurs corrections ont ainsi été étudiées afin de compenser l'effet de ces régions dépourvues de cellule de détection.

1 Introduction

Dans l'étude du modèle standard et plus particulièrement du boson de Higgs, des projets d'accélérateur de particules sont en cours de développement. L'un d'eux est le **Collisionneur Linéaire International (ILC)**, un accélérateur linéaire leptonique électron positron d'une longueur de $31km$. Le projet ILC a débuté au début des années 2000 et pourrait être installé au Japon sur le site de Iwate.

L'ILC accueillera deux détecteurs, le **SiD (Silicon Detector)** et l'**ILD (International Large Detector)**. Possédant tous les deux une structure en couches d'oignons, ils sont composés d'un détecteur de vertex, d'un trajectographe, d'un calorimètre électromagnétique, d'un calorimètre hadronique et de chambres à muons. Toutefois, le calorimètre hadronique de l'ILD est la seule partie du détecteur étudiée ici.

2 Le calorimètre hadronique semi-digital SDHCAL

Une des options de calorimètre hadronique pour l'ILD est le **SDHCAL (Semi-Digital Hadron Calorimeter)**[3], conçu pour l'utilisation des algorithmes de suivi de particules (PFA). L'intérêt d'un tel calorimètre réside dans son importante granularité ainsi que dans son mode de lecture semi-digitale permettant d'avoir 3 seuils d'énergies.

2.1 Les gerbes hadroniques

Lorsqu'un hadron de haute énergie interagit avec la matière du calorimètre hadronique, il crée de nouvelles particules qui interagissent à leurs tours avec le calorimètre. Ce phénomène se répète ainsi jusqu'à ce que l'énergie des dernières particules créées soit trop faible pour provoquer de nouvelles réactions. Ce processus est connu sous le nom de gerbe hadronique et est illustré par la figure (1). C'est finalement en mesurant toutes les énergies des particules créées par ce phénomène qu'il est ainsi possible de retrouver l'énergie du hadron responsable de la gerbe.

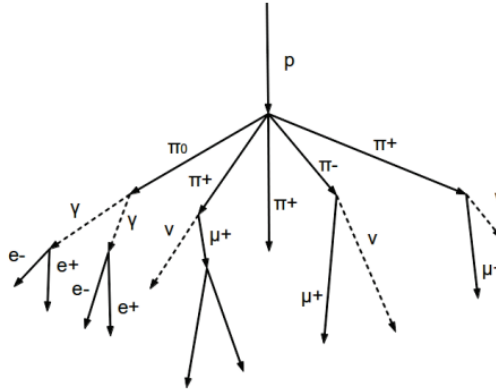


FIGURE 1 – Illustration d'une gerbe hadronique provoquée par l'interaction d'un proton avec de la matière (image provenant de [2])

2.2 Estimation de l'énergie des hadrons

Les calorimètres hadroniques ont pour objectif de mesurer l'énergie des hadrons de manière destructive à l'aide du phénomène de gerbe hadronique. Pour remplir cette fonction, le SDHCAL

va mesurer le nombre de cellules de détection touchées, aussi appelé le nombre de hits, pour ensuite faire une estimation de l'énergie du hadron ayant interagi avec le calorimètre. Cette énergie est donnée par la formule :

$$E = \alpha N_1 + \beta N_2 + \gamma N_3$$

avec N_1 , N_2 et N_3 le nombre de hits pour chaque seuil du SDHCAL et α , β et γ les constantes de calibration énergétique pour chacun des seuils du SDHCAL [2].

2.3 Géométrie et zones non instrumentées du SDHCAL

Ayant une forme cylindrique, le SDHCAL est composé de 3 régions : les bouchons, correspondant aux bases du cylindre, le tonneau, qui est la partie parallèle à la direction de propagation de l'électron et du positron incident et correspondant à l'axe z , et pour finir les anneaux, situés entre les bouchons et le tonneau, servant ainsi à relier ces deux parties. Ces trois régions sont représentées sur la figure (2), cependant le tonneau est la seule région étudiée ici.

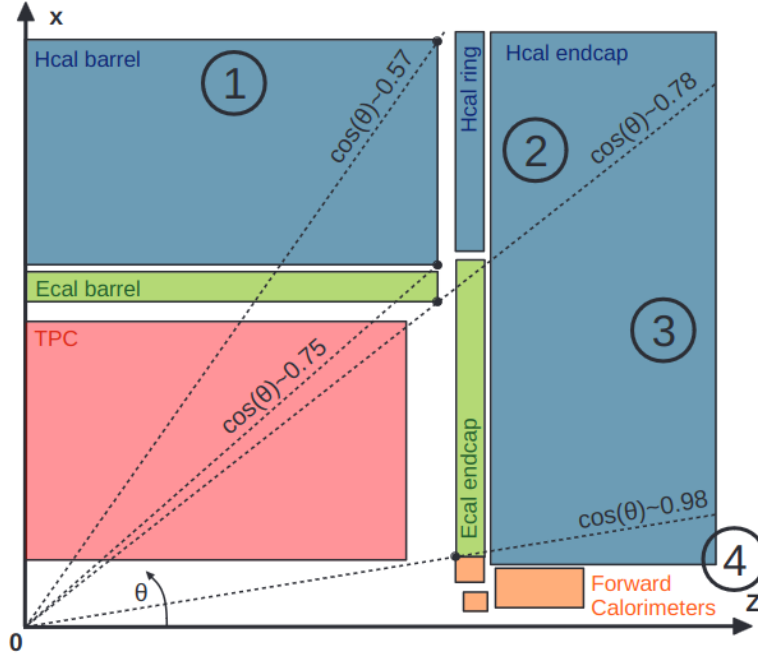


FIGURE 2 – Schéma illustrant le découpage du détecteur ILD en quatre zones : la région (1) ne comprenant que le tonneau, la région (2) comprenant une partie du tonneau et du bouchon, la région (3) ne comprenant que le bouchon et la région (4) composée d'un calorimètre à l'avant (image provenant de [2])

Le tonneau est divisé en 8 staves se chevauchant, formant ainsi une géométrie VIDEAU comme illustré sur la figure (3). Chacune de ces staves est décomposées en 5 modules alignés sur l'axe des z et numérotés de 1 à 5, le premier et le cinquième étant ceux situés aux extrémités du tonneau. Afin que le calorimètre puisse tenir, il est nécessaire d'insérer un support entre chacun des modules, créant ainsi des zones dépourvues de cellules de détection. Ces interstices sont d'une épaisseur équivalentes à deux cellules. Le nombre de hits mesuré est donc incorrect, ce qui entraîne une mauvaise estimation de l'énergie des particules mesurées. Une correction pour corriger ce problème a donc été étudiée et est détaillée dans la partie (4).

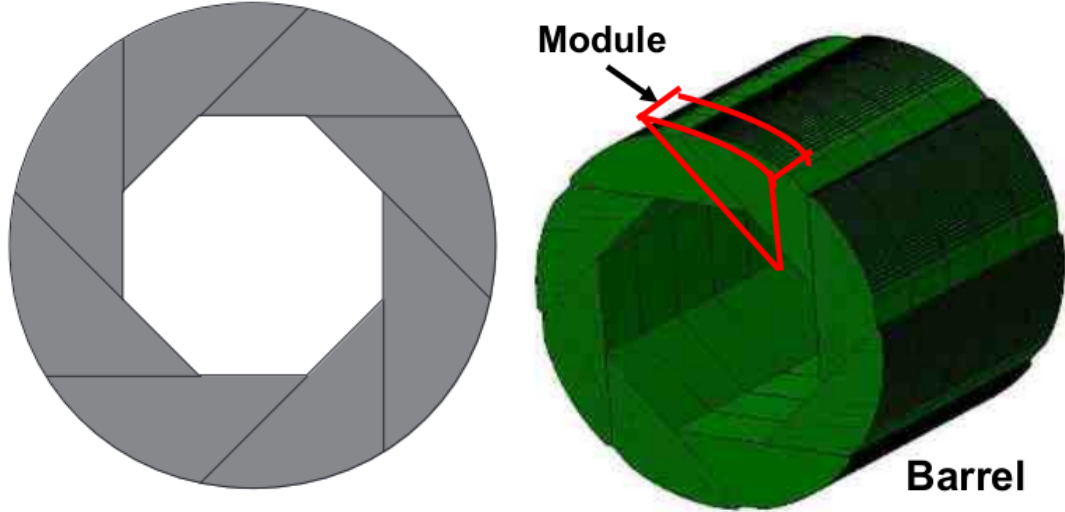


FIGURE 3 – Schéma illustrant la structure du SDHCAL dans la région du tonneau avec : une représentation 2D des staves (à gauche) et une représentation 3D de la décomposition des staves en modules (à droite) (image provenant de [2] et de [4] respectivement)

De plus, chaque module est composé de chambres à plaques résistives de verre (GRPC) qui sont chacune fragmentées en cellules de détection de $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Ces chambres sont superposées les unes sur les autres formant ainsi des couches qui sont au nombre de 48 comme illustrées sur la figure (4). Cependant, il est nécessaire d'insérer une couche d'acier de 2 cm entre chaque chambres servant à générer la gerbe hadronique [2].

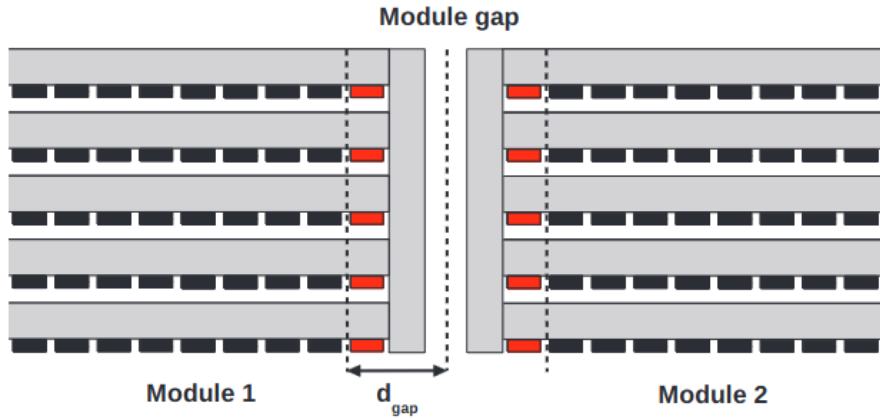


FIGURE 4 – Schéma illustrant les différentes couches de détection (en noir et rouge) et les différentes couches d'acier (en gris) présentes dans chacun des modules ainsi qu'une zone inter-module (image provenant de [2])

Des données, ayant été simulées en amont du stage à l'aide de Géant4, ont ainsi été utilisées afin de tester différentes corrections à l'aide du logiciel ROOT. En tout, ce sont 900000 événements qui ont été analysés. La première étape a été de sélectionner les données qui ont par la suite été analysées. En effet, seuls les événements où l'angle θ était inférieur à 0.57 (correspondant au tonneau, voir figure 2), ont été analysés. De plus, certains hadrons interagissent avec le calorimètre électromagnétique provoquant ainsi une gerbe avant le SDHCAL. Une sélection supplémentaire a donc dû être effectuée afin de ne pas prendre les événements où ce phénomène se produisait.

3 Correction angulaire

3.1 Correction appliquée

L'influence des couches d'acier sur le nombre de hits mesuré est observable sur les figures (5), représentant le nombre de hits total $N_{tot} = N_1 + N_2 + N_3$ en fonction de $|\cos(\theta)|$ pour des énergies initiales de 40 et 70 GeV. La présence de creux aux alentours de $\cos(\theta) \simeq 0.22$ et de $\cos(\theta) \simeq 0.5$ est due aux régions entre les modules et sera étudiée dans la partie (4).

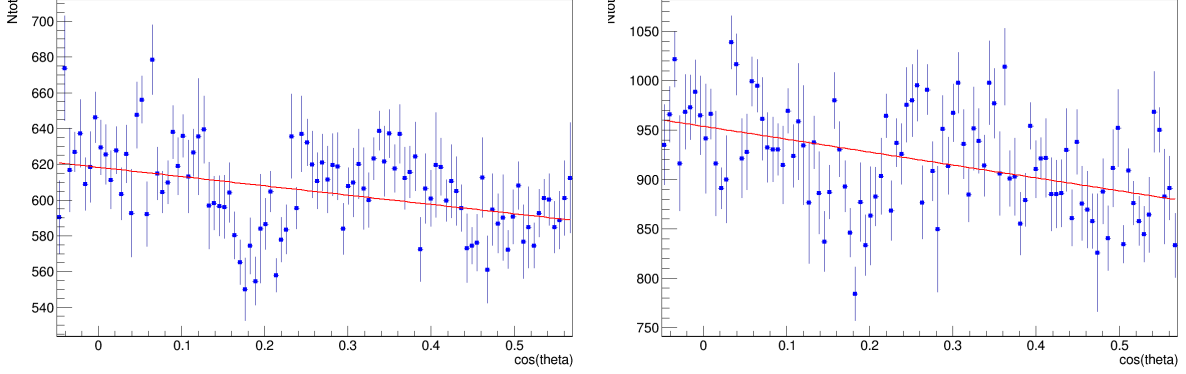


FIGURE 5 – Nombre total de hits *avant* correction pour une énergie initiale de (a) 40 GeV (à gauche) et (b) 70 GeV (à droite) en fonction de $\cos(\theta)$

Le nombre de hits devant normalement être constant pour une énergie initiale fixe, est finalement décroissant, c'est à dire, de la forme d'un polynôme de premier degré avec un coefficient directeur négatif comme le montre les données du tableau (1). Cela montre donc que l'impact des supports en acier dépend des angles θ et ϕ du hadron initial. En effet, cette dépendance peut s'expliquer par la différence de distance parcourue par une particule dans ces zones non instrumentées selon ses angles d'incidences. Cette différence est illustrée sur la figure (6) où l'angle ϕ est fixe et l'angle θ varie.

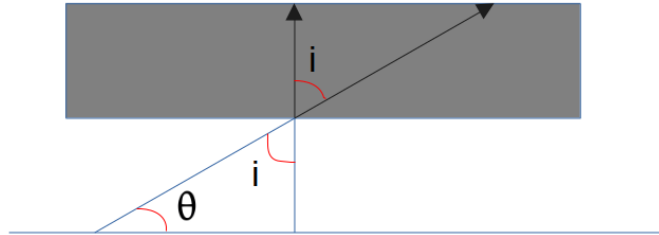


FIGURE 6 – Schéma illustrant la différence de distance parcourue dans l'acier (zone grise) par une particule ayant un angle nul et un angle θ

Ceci implique que la distance parcourue dans l'acier augmente avec la valeur de $\cos(\theta)$, entraînant ainsi une augmentation du nombre de hits non comptabilisé. Cela est donc en accord avec la décroissance des figures (5). Pour le cas où θ est fixe et ϕ varie, le raisonnement reste le même du fait de la symétrie du détecteur. La correction doit alors être similaire pour cet angle en prenant en compte cette fois le chevauchement des staves.

En utilisant une relation de trigonométrie, la correction à appliquer sur les nombres de hits

doit alors être de la forme :

$$N_{tot}^{cor} = \frac{N_{tot}}{\cos(i)} = \frac{N_{tot}}{\sin(\theta)} \quad (1)$$

Cette correction est étudiée ici directement sur N_{tot} et non sur N_1 , N_2 et N_3 étant donné la linéarité de cette équation.

3.2 Résultats

Après l'application de la formule (1), le nombre total de hits en fonction de $|\cos(\theta)|$ est toujours de la forme d'un polynôme de première ordre mais cette fois avec un coefficient directeur positif indiquant que cette correction est trop forte notamment pour les plus grandes valeurs de $\cos(\theta)$ (voir figure 7). De plus, la valeur absolue des coefficients étant plus élevée après avoir appliqué la correction indique qu'il est préférable de continuer sans correction tant qu'une meilleure n'a pas été trouvée (voir tableau 1). La correction sur l'angle ϕ , reposant sur la même logique que celle sur θ , n'est alors pas appliquée pour le reste de cette étude.

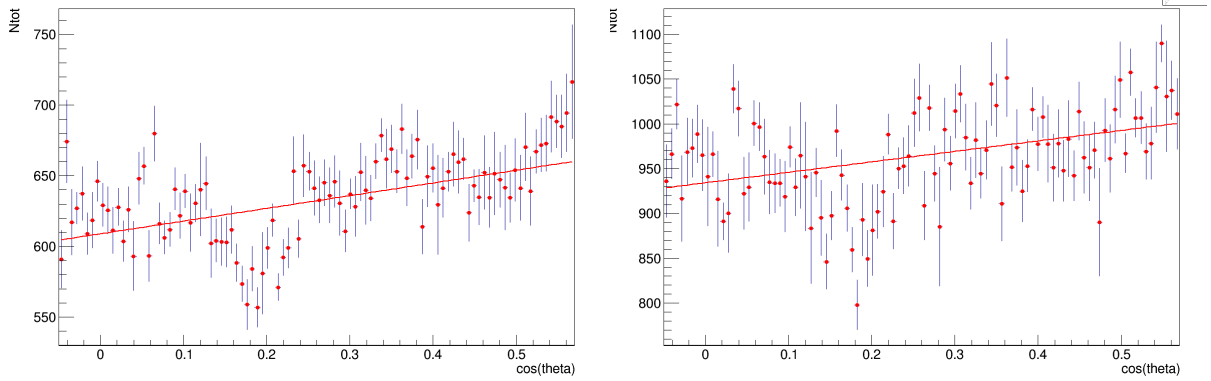


FIGURE 7 – Nombre total de hits **après** correction pour une énergie initiale de (a) 40GeV (à gauche) et (b) 70GeV (à droite) en fonction de $\cos(\theta)$

Ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenus durant les essais du prototype du SDHCAL qui ont été effectués au CERN en 2015 [1]. En effet, il a aussi été remarqué qu'avec l'utilisation de cette même formule, le nombre de hits mesuré était trop élevé par rapport à ce qui est attendu pour les valeurs de $\cos(\theta)$ les plus grandes.

Une des raisons qui pourrait expliquer cette trop forte correction est que le volume de couche d'acier recouvert par la gerbe n'est pas pris en compte. Cette piste d'amélioration n'a malheureusement pas pu être développée d'avantage durant ce stage.

Énergie initial	30GeV	40GeV	50GeV	60GeV	70GeV
coeff directeur avant correction	-10±4	-52±9	-95±13	-106±17	-131±18
coeff directeur après correction	48±5	90±11	117±14	136±18	117±19

TABLE 1 – Coefficients directeurs des fits effectués sur les courbes $N_{tot}(\cos(\theta))$ avant et après la correction et pour des énergies initiales allant de 30GeV à 70GeV

4 Correction inter-module

Les zones non instrumentées, situées entre les modules et exerçant une influence sur le nombre de hits mesuré, sont au nombre de quatre. Cependant, les gaps situés entre les modules 2 et 3 et entre les modules 3 et 4 seront traités indistinctement, du fait de la symétrie du détecteur. Les gaps entre les modules 1 et 2 et entre les modules 4 et 5 seront aussi considérés comme similaires pour les mêmes raisons. L'impact de ces interstices est visible sur les figures (8) où est représenté le nombre de hits en fonction $|\cos(\theta)|$.

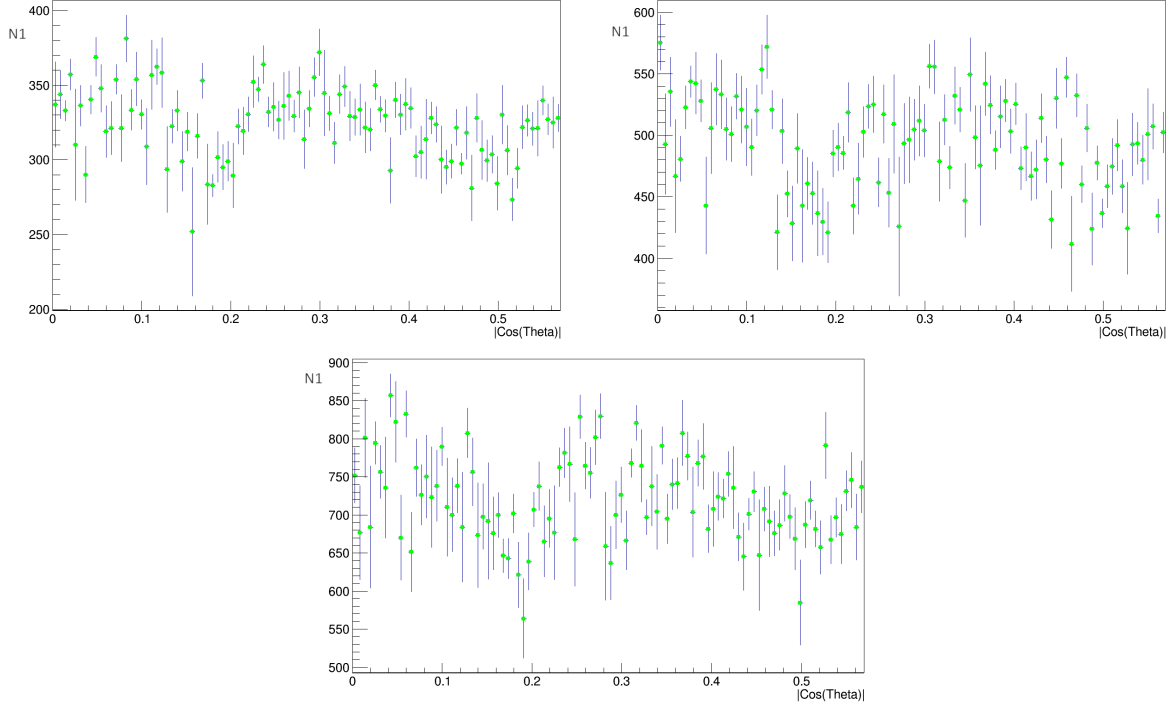


FIGURE 8 – Nombre total de hits *avant* correction pour des énergies initiales de 30GeV (en haut à gauche), 50GeV (en haut à droite) et 80GeV (en bas) en fonction de $|\cos(\theta)|$

Deux régions, présentant une diminution du nombre de hits, sont situées en $0.15 < |\cos(\theta)| < 0.2$ ainsi que en $0.45 < |\cos(\theta)| < 0.55$. Les positions de ces deux régions correspondent bien aux zones inter-modules, prouvant ainsi leur impact sur les mesures effectuées. Toutefois, la profondeur du premier creux est plus importante que pour le deuxième. Ceci s'explique par l'angle d'incidence moins important pour le premier interstice ce qui entraîne une plus grande surface de zone non instrumentée recouverte par la gerbe.

4.1 Corrections appliquées

Plusieurs corrections ont été étudiées dans l'objectif de compenser la diminution du nombre de hits afin de restaurer au mieux la linéarité attendue, et ce pour différentes valeurs d'énergies initiales. Ces corrections ont été cette fois appliquées sur les nombres de hits des trois seuils, N_1 , N_2 et N_3 . Néanmoins, les résultats obtenus pour ces trois seuils étant similaires, seul le premier, correspondant à N_1 , sera analysé ici. De plus, une gamme d'énergie, allant de 20 à 100GeV par pas de 10GeV, a été étudiée mais seules les énergies de 30GeV, 50GeV et 80GeV seront montrées ici.

4.1.1 1ère correction

Pour la première correction, il est supposé que si un hit est présent à l'extrémité d'un module, c'est-à-dire au niveau d'une interstice, alors il est probable que la particule ayant déclenché cette cellule de détection ait continué sa trajectoire dans la zone non instrumentée. Il faut alors incrémenter le nombre total de hits à chaque fois que cette situation se présente. De plus, il est nécessaire de connaître le seuil déclenché par la cellule de détection afin de connaître le nombre de hits (N_1 , N_2 ou N_3) qui doit être incrémenté. Cette vérification n'est pas propre qu'à cette première correction et est aussi appliquée aux autres.

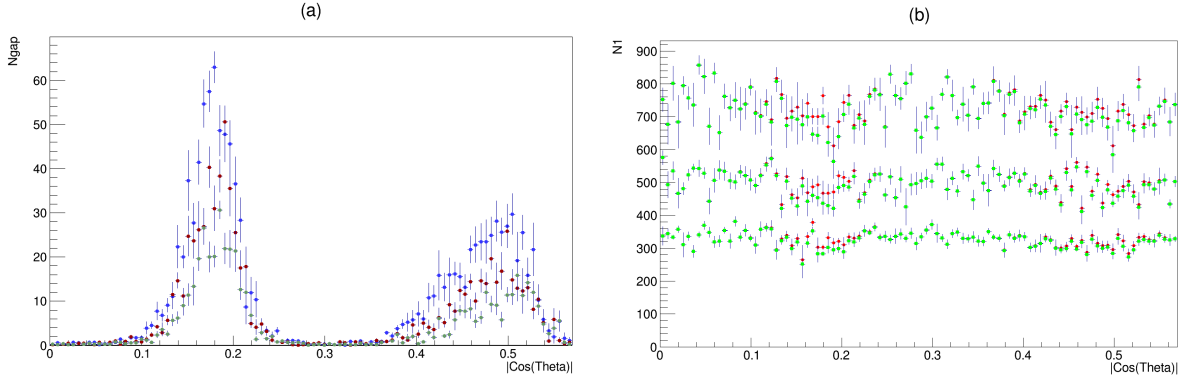


FIGURE 9 – (a) Nombre de hits incrémenté pour une énergie initiale de 30 GeV (en gris), 50 GeV (en rouge) et 80 GeV (en bleu) en fonction $|\cos(\theta)|$ pour la **1ère** correction (à gauche) et (b) nombre total de hits **avant** (vert) et **après** (rouge) correction pour une énergie initiale de 30, 50 et 80 GeV (respectivement de bas en haut) en fonction de $|\cos(\theta)|$ (à droite)

La figure (9.a), traçant le nombre de hits rajouté (noté N_{gap}) en fonction de $|\cos(\theta)|$, permet de s'assurer que les hits incrémentés correspondent bien aux zones inter-modules. De plus, cette même figure montre également que N_{gap} varie avec l'énergie. En effet, la correction est plus importante pour les hautes énergies.

En ajoutant N_{gap} au nombre de hits mesuré N_1 , il est ainsi possible d'observer l'effet de cette correction comme l'illustre la figure (9.b).

Cette correction assez simpliste, est finalement une bonne approximation et permet ainsi de compenser en partie l'effet des zones non instrumentées. Elle peut cependant être améliorée pour obtenir une meilleure compensation. Néanmoins, cette correction ne prend pas en compte le cas où une particule s'arrête sur la dernière cellule d'un module, c'est à dire juste avant le gap, ce qui entraîne un ajout de hit ne devant pas exister. L'impact de ce manque de rigueur est visible sur la figure (9.b) où le nombre de hits a été augmenté pour des régions ne nécessitant pas de correction telles qu'aux alentours de $\cos(\theta) \simeq 0.1$ ou encore aux alentours de $\cos(\theta) \simeq 0.4$.

4.1.2 2ème correction

En développant les pistes d'amélioration de la première correction, une seconde a été imaginée. Cette dernière prend en compte si la particule s'arrête au bord du module ou à l'intérieur du gap. Pour cela, un test est effectué pour chaque hit se situant sur l'extrémité d'un module pour vérifier si il existe d'autres hits voisins au premier. Cela permet ainsi de supposer si la branche de la gerbe déborde dans le gap comme illustré dans la figure (10).

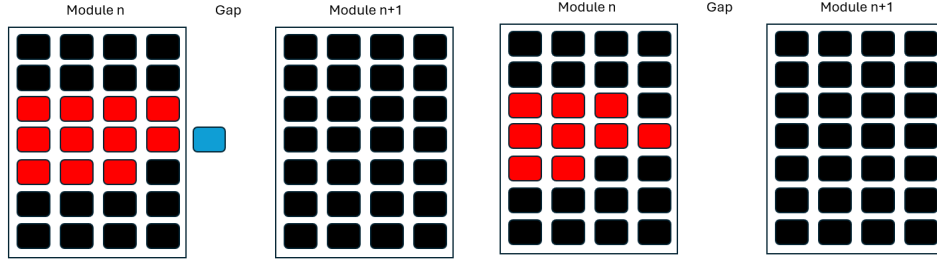


FIGURE 10 – Schéma illustrant une gerbe s’arrêtant dans le gap (à gauche) et avant le gap (à droite) avec les cellules de détection non déclenchées (en noir) et déclenchées (en rouge) ainsi que les hits supposés en bleu

Cette seconde correction montre ainsi une moins bonne efficacité que la première comme le montre la plus faible amplitude des pics sur la figure (11.a). Cette différence étant logique du fait de l’ajout d’une condition supplémentaire pour l’incrémentation du nombre de hits. Toutefois, le problème de l’ajout de hits dans les zones éloignées des gaps a été résolu par cette nouvelle condition. Cependant, les N_{gap} sont encore trop faibles pour permettre de retrouver une linéarité totale.

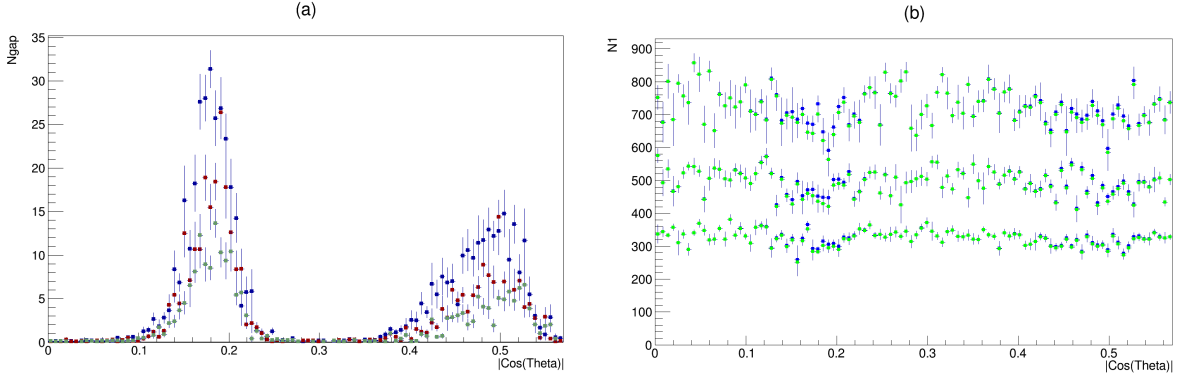


FIGURE 11 – (a) Nombre de hits incrémenté pour une énergie initiale de 30 GeV (en gris), 50 GeV (en rouge) et 80 GeV (en bleu) en fonction $|\cos(\theta)|$ pour la 2^{ème} correction (à gauche) et (b) nombre total de hits **avant** (vert) et **après** (bleu) correction pour une énergie initiale de 30, 50 et 80 GeV (respectivement de bas en haut) en fonction de $|\cos(\theta)|$ (à droite)

4.1.3 3^{ème} correction

Dans l’optique d’améliorer les précédents résultats, une nouvelle correction a été pensée mettant les hits se situant de part et d’autres des gaps en relation. En effet, pour chacun des hits sur la bordure des modules, un test est effectué afin de regarder si il existe un hit, se situant de l’autre côté du gap, sur le même numéro de couche et décalé au maximum de 2 cellules. Cette correction, plus poussée que les précédentes, donne ainsi les figures (13).

Malgré le fait que cette correction prend en compte plus de paramètres que précédemment, elle n’est pas encore assez efficace pour compenser les défauts de la structure du calorimètre.

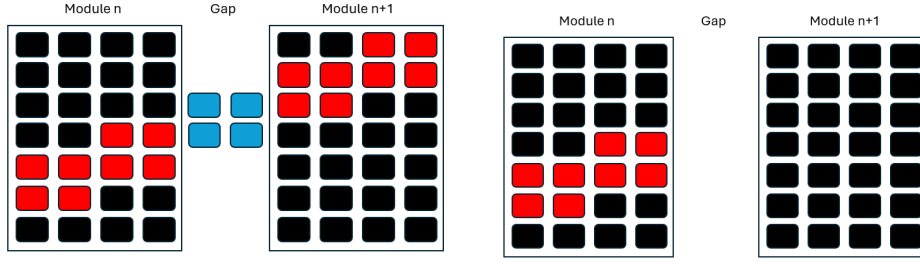


FIGURE 12 – Schéma illustrant une gerbe traversant le gap (à gauche) et s'arrêtant avant le gap (à droite) avec les cellules de détection non déclenchées (en noir) et déclenchées (en rouge) ainsi que les hits supposés en bleu

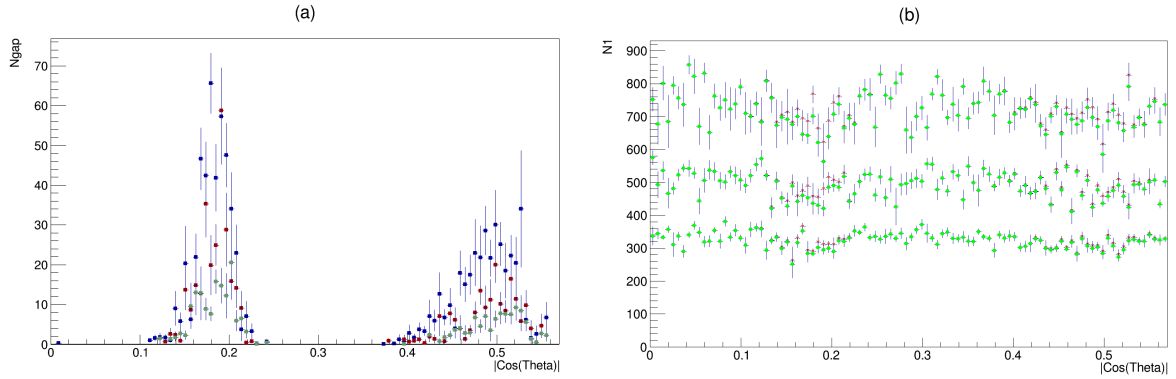


FIGURE 13 – (a) Nombre de hits incrémenté pour une énergie initiale de 30 GeV (en gris), 50 GeV (en rouge) et 80 GeV (en bleu) en fonction $|\cos(\theta)|$ pour la 3^{ème} correction (à gauche) et (b) nombre total de hits **avant** (vert) et **après** (orange) correction pour une énergie initiale de 30, 50 et 80 GeV (respectivement de bas en haut) en fonction de $|\cos(\theta)|$ (à droite)

4.1.4 4^{ème} correction

Pour finir, une dernière correction a été étudiée, prenant cette fois en compte les hits autres que ceux se situant à la limite des modules. En effet, la forme des branches de la gerbe a été d'avantage pris en compte en essayant d'analyser les regroupements de hits et en ajoutant ainsi un nombre de hits correspondant à la situation. Pour un certain nombre de cellules de détection déclenchées les unes à côté des autres, le nombre de hits à incrémenter ne sera pas forcément le même selon la forme de la gerbe arrivant sur le gap. La figure (14), montrant une branche s'atténuant et une autre s'étendant, illustre parfaitement ce phénomène.

C'est finalement cette dernière correction qui présente la meilleure compensation. Toutefois, elle n'est toujours pas encore suffisante et nécessite d'être encore améliorée. La principale piste d'amélioration est une meilleure utilisation des formes des gerbes qui ont été très simplifiées durant ces recherches. En prenant des formes plus réalistes, les résultats seront donc probablement plus satisfaisants.

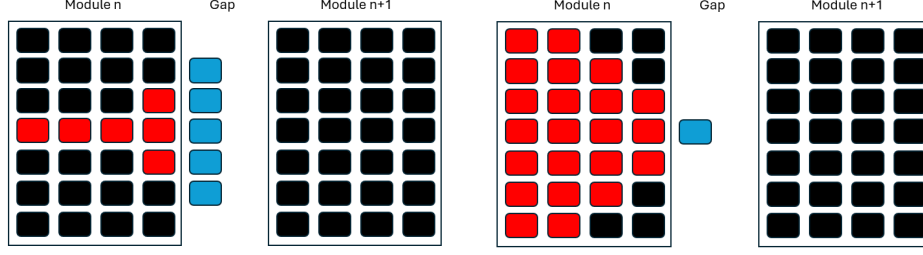


FIGURE 14 – Schéma illustrant une gerbe s’étendant (à gauche) et s’atténuant (à droite) avec les cellules de détection non déclenchées (en noir) et déclenchées (en rouge) ainsi que les hits supposés en bleu

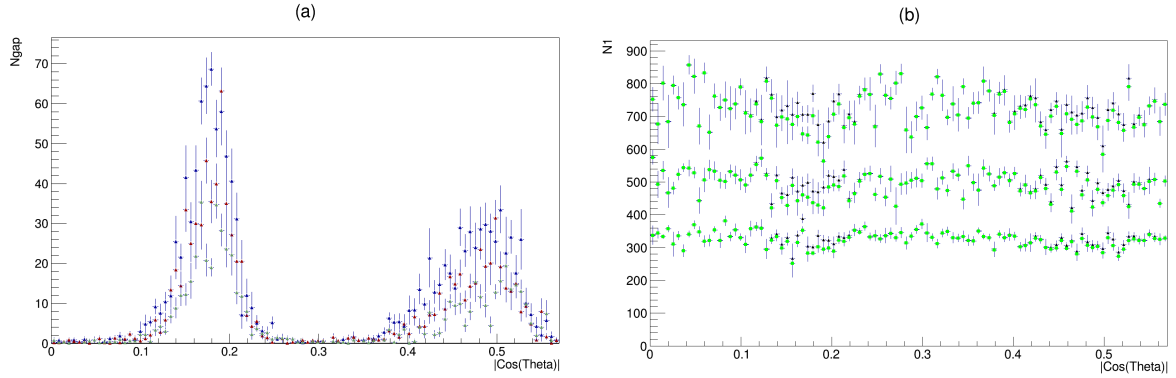


FIGURE 15 – (a) Nombre de hits incrémenté pour une énergie initiale de 30 GeV (en gris), 50 GeV (en rouge) et 80 GeV (en bleu) en fonction $|\cos(\theta)|$ pour la 4^{ème} correction (à gauche) et (b) nombre total de hits **avant** (noir) et **après** (rouge) correction pour une énergie initiale de 30, 50 et 80 GeV (respectivement de bas en haut) en fonction de $|\cos(\theta)|$ (à droite)

5 Conclusion

Après avoir étudié l’effet des zones non instrumentées du SDHCAL, de multiples corrections ont été essayées afin de compenser l’impact de ces régions dépourvues de cellules de détections. Malgré les intéressants résultats que certaines présentent, l’influence de ces zones n’a pas pu être entièrement corrigée. Toutefois, ces résultats sont encourageants et laissent supposer qu’une totale correction est possible en prenant d’avantage en compte les différentes formes possibles des gerbes. Malheureusement, cette piste n’a pu être d’avantage creusée durant ce stage. De plus, tous les résultats obtenus montrent une très grande fluctuation due à une trop faible quantité de données utilisées entraînant ainsi un manque de précision, en particulier pour les hautes énergies. Il serait alors intéressant de faire à nouveau les études effectuées au cours de ce stage avec un plus grand nombre d’évènements.

Références

- [1] Héctor García CABRERA. “Analysis of the incident angle effect in the energy reconstruction of hadrons with the SDHCAL technological prototype”. In : (2015). URL : <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.06585>.
- [2] Remi ETE. “Développement d’un algorithme de suivi de particules pour l’ILC : outils de surveillance de qualité de données en ligne. Physique Nucléaire Expérimentale [nucl-ex]. Université de Lyon. Français.” In : (2017). URL : <https://inspirehep.net/files/86bce842c63d491a5944525f139c9313>.
- [3] K. Belkadhib G. BAULIEUV M. Bedjidian. “Construction and commissioning of a technological prototype of a high-granularity semi-digital hadronic calorimeter”. In : (2015). URL : <https://arxiv.org/pdf/1506.05316>.
- [4] Gérald GRENIER. “Un calorimètre hadronique de grande granularité à détecteurs gazeux avec lecture multi-seuils embarquée”. In : (2013).