



Thèse de l'Université de Lyon

École Doctorale de Physique et Astrophysique de Lyon (PHAST)

Thèse de Doctorat en Physique des Particules

Institut de Physique Nucléaire de Lyon (IPNL)

# Caractérisation des gerbes hadroniques à l'aide d'un calorimètre à lecture semi-digital

Arnaud STEEN

JURY : M. (rapporteur)  
M. (rapporteur)  
M. (examineur)  
M. Gérard GRENIER (co-directeur de thèse)  
Pr. Imad LAKTINEH (directeur de thèse)  
M. (examineur)



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Le prototype de calorimètre à lecture semi-digitale</b>	<b>5</b>
1	Les gerbes hadroniques . . . . .	6
2	Le SDHCAL . . . . .	6
3	Les chambres à plaques de verre résistif . . . . .	7
4	Reconstruction de l'énergie dans le SDHCAL . . . . .	7
4.1	Reconstruction des événements . . . . .	7
4.2	Sélection des gerbes hadroniques . . . . .	7
4.3	Calibration en fonction du temps . . . . .	7
4.4	Reconstruction de l'énergie des pions . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Simulation du SDHCAL</b>	<b>13</b>
1	Les modèles de simulation des gerbes hadroniques . . . . .	14
1.1	Modèles de cordes partoniques . . . . .	14
1.2	Le modèles de cascade intranucléaire de Bertini . . . . .	15
1.3	Les listes physiques . . . . .	16
2	La simulation du prototype . . . . .	17
3	Modélisation de la réponse des GRPC au particules chargées . . . . .	17
3.1	Algorithme SimDigital . . . . .	17
3.2	Paramétrisation de l'algorithme . . . . .	17
3.3	Résultats . . . . .	17
4	Conclusion . . . . .	17
	<b>Bibliographie</b>	<b>25</b>



# Chapitre 1

## Le prototype de calorimètre à lecture semi-digitale

Dans ce chapitre le prototype de calorimètre à lecture semi-digitale qui a été  
5 construit au sein de l'institut de physiques nucléaire de Lyon en 2011 sera décrit. Ce  
prototype a été testé lors de plusieurs campagnes de test en faisceau au CERN. Pendant  
ces tests, le prototype a été exposé à un flux de particules tel que des pions, des protons,  
des muons et des électrons. Nous détaillerons les différentes méthodes utilisées pour  
reconstruire l'énergie des hadrons incidents.

### Contenu

	<b>1</b>	<b>Les gerbes hadroniques . . . . .</b>	<b>6</b>
	<b>2</b>	<b>Le SDHCAL . . . . .</b>	<b>6</b>
	<b>3</b>	<b>Les chambres à plaques de verre résistif . . . . .</b>	<b>7</b>
15	<b>4</b>	<b>Reconstruction de l'énergie dans le SDHCAL . . . . .</b>	<b>7</b>
	4.1	Reconstruction des événements . . . . .	7
	4.2	Sélection des gerbes hadroniques . . . . .	7
	4.3	Calibration en fonction du temps . . . . .	7
20	4.4	Reconstruction de l'énergie des pions . . . . .	7

## 1 Les gerbes hadroniques

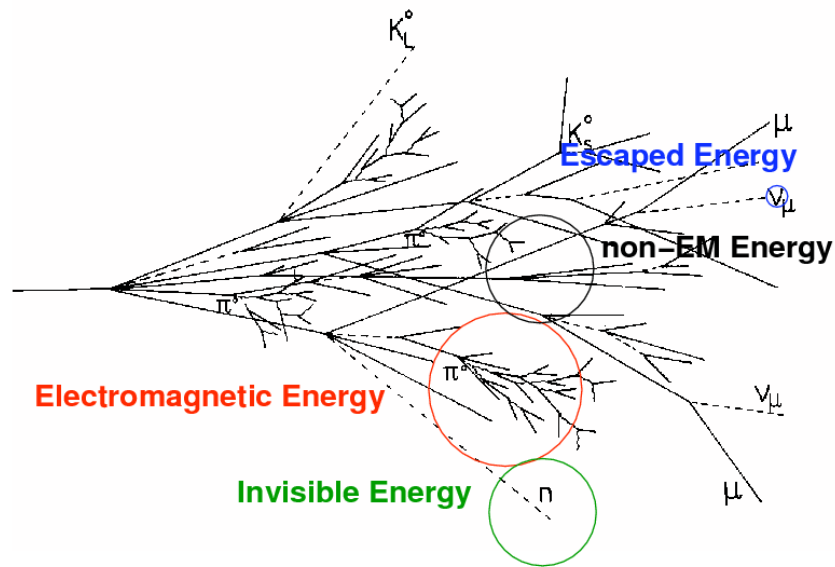


FIGURE 1.1 – Schéma du développement d'une gerbe hadronique.

## 2 Le SDHCAL

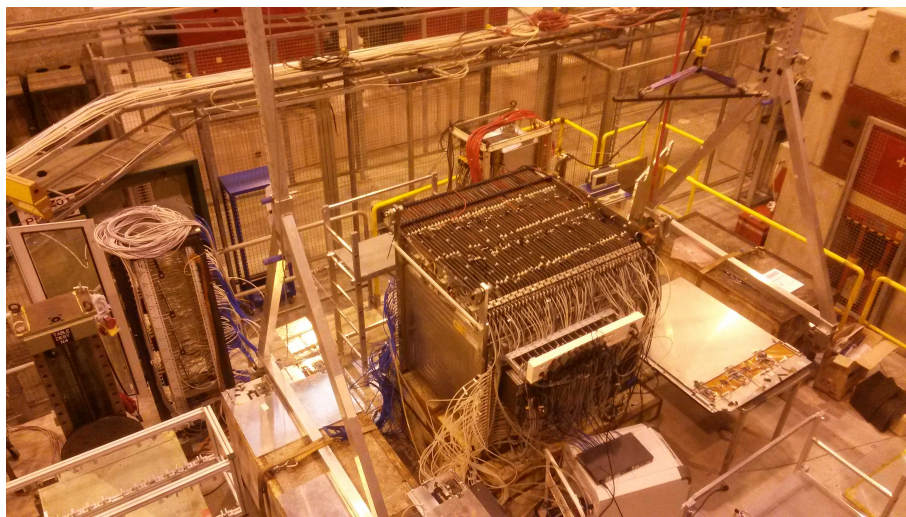


FIGURE 1.2 – Le prototype du calorimètre à lecture semi-digitale sur la ligne de faisceau H6 du CERN.

### 25 3 Les chambres à plaques de verre résistif

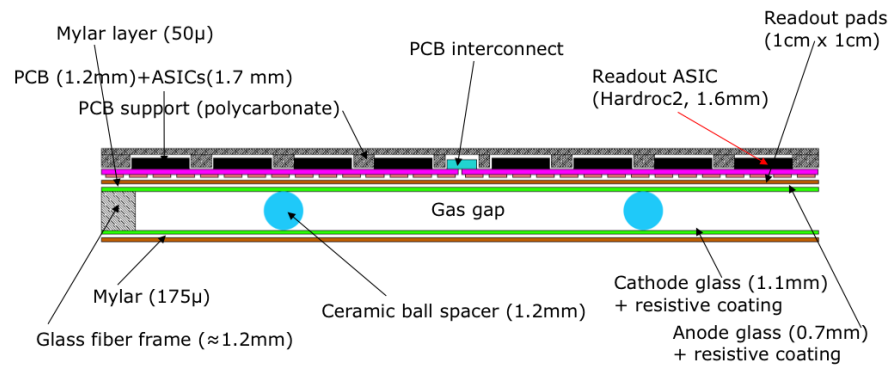


FIGURE 1.3 – Schéma d'une GRPC.

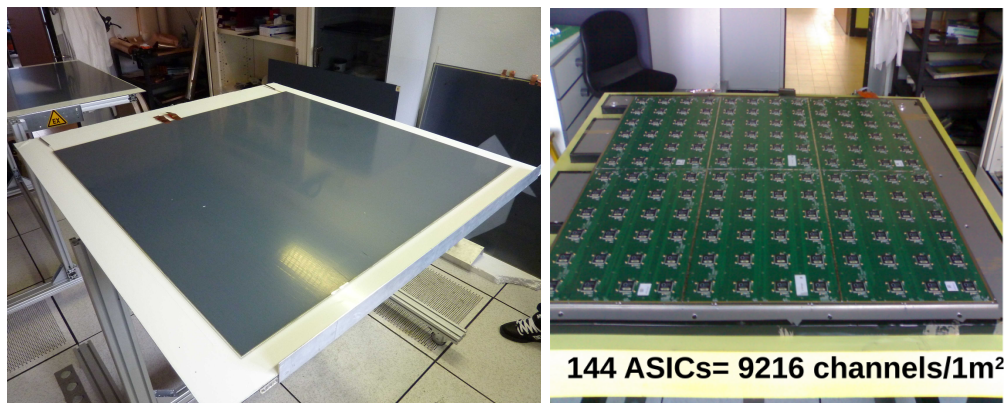


FIGURE 1.4 – Photo de plan de rpc et d'un plan d'électronique.

## 4 Reconstruction de l'énergie dans le SDHCAL

### 4.1 Reconstruction des événements

### 4.2 Sélection des gerbes hadroniques

### 4.3 Calibration en fonction du temps

### 30 4.4 Reconstruction de l'énergie des pions

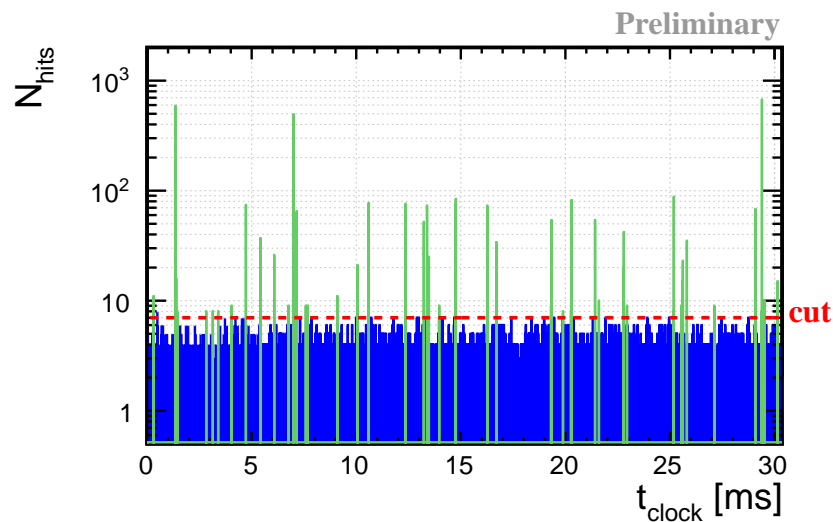


FIGURE 1.5 – Histogram des temps dans un trigger.

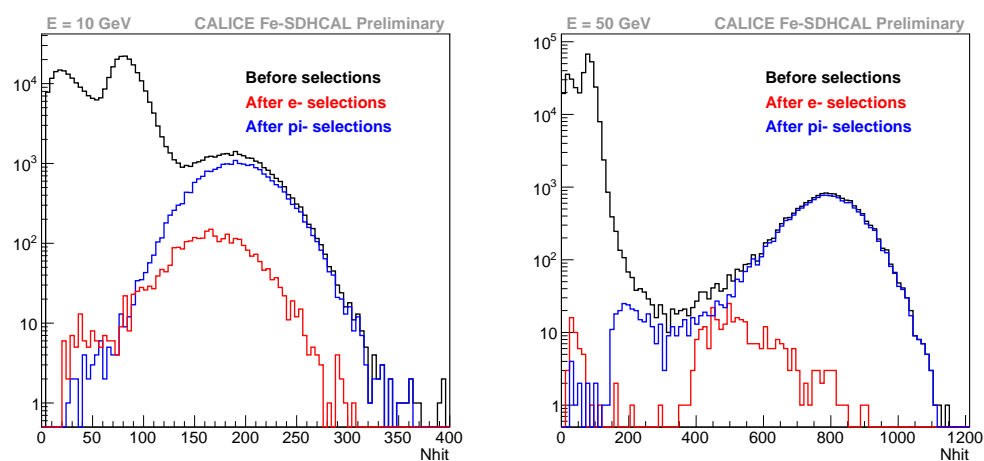


FIGURE 1.6 – Selections des pions.



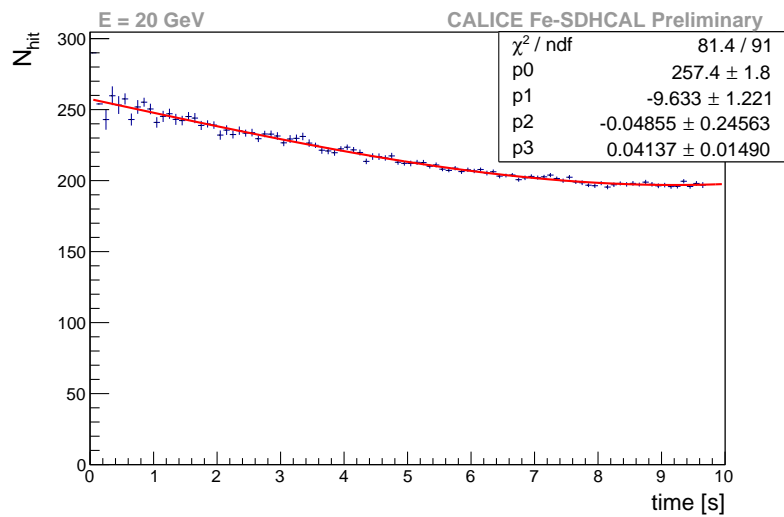


FIGURE 1.7 – Correction en fonction du temps.!! Figure avec électrons!!

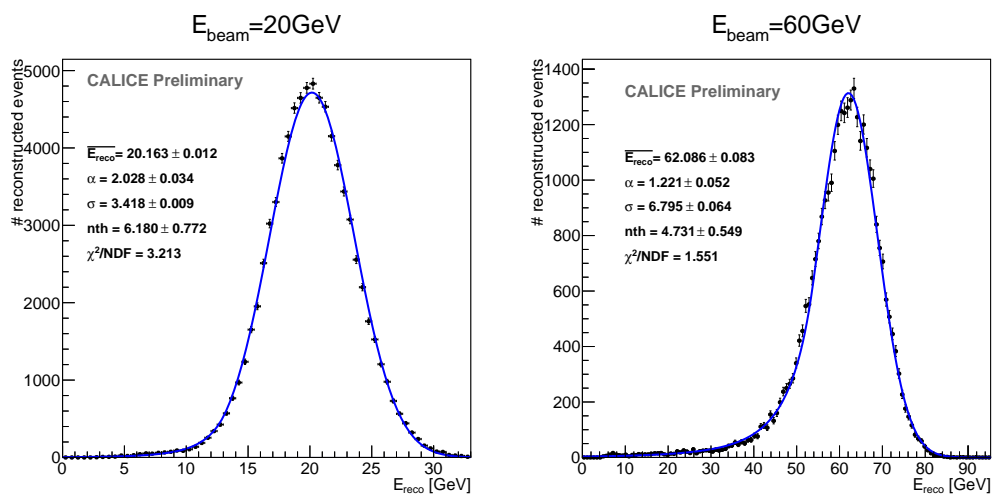


FIGURE 1.8 – Distribution en energie.

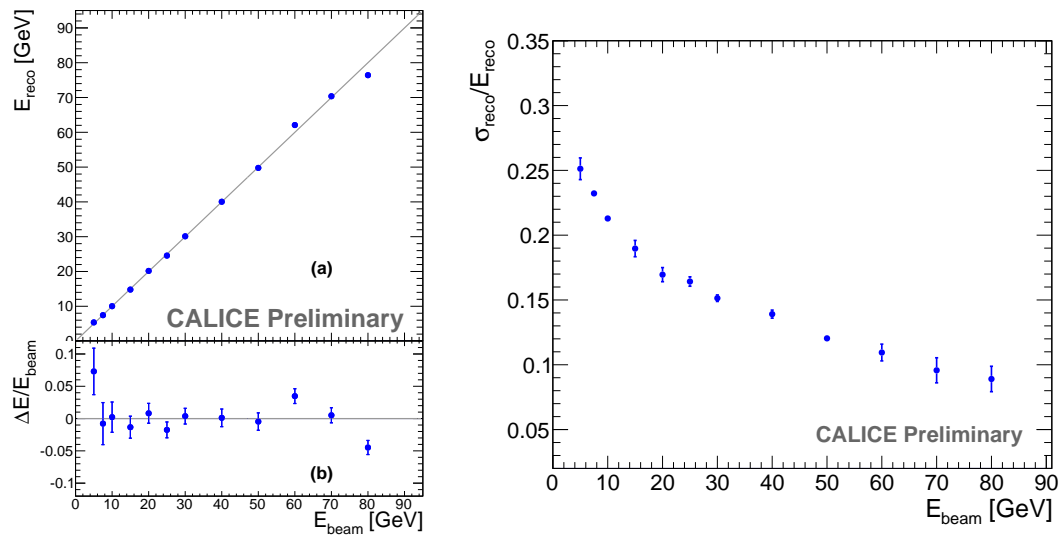


FIGURE 1.9 – Courbe de linéarité et résolution.

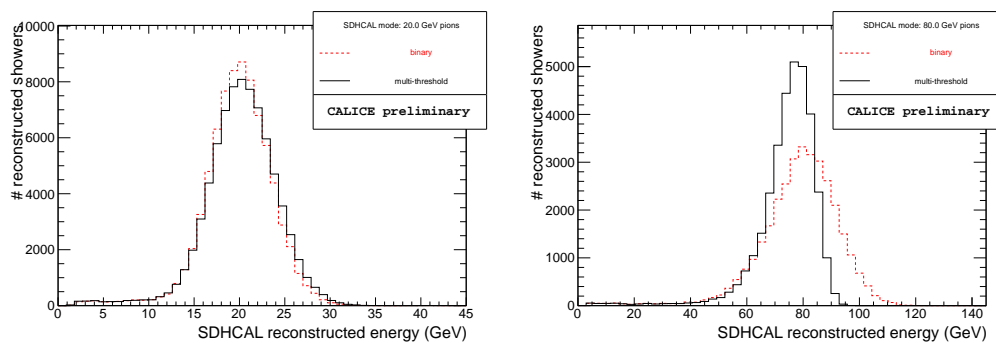


FIGURE 1.10 – Comparison mode binaire et multi-seuils.

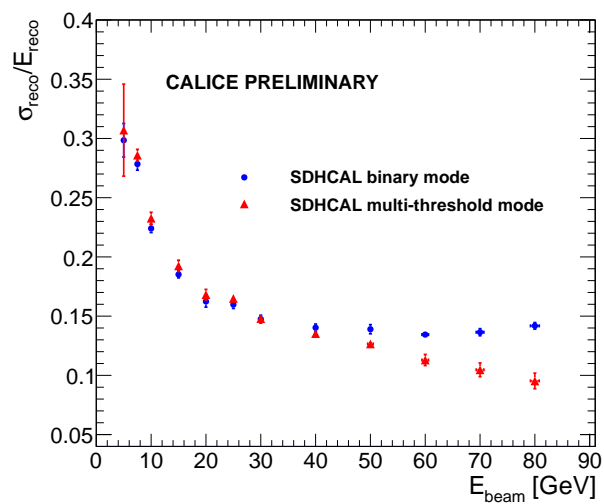


FIGURE 1.11 – Résolution en énergie en fonction de l'énergie du faisceau pour le mode binaire et multi-seuils.



## Chapitre 2

# Simulation du SDHCAL

La simulation est un aspect très important dans les expériences de physique des particules. En effet, la conception et l'optimisation d'un détecteur s'appuient toujours sur la simulation qui va permettre une estimation rapide des performances, des coûts de l'expérience. Les simulations sont aussi massivement utilisées dans l'analyse des données pour améliorer les algorithmes d'analyses, pour confirmer ou non la présence de nouvelle physique, pour estimer les biais... C'est pourquoi avoir une simulation la plus réaliste possible est un enjeu très importants. Dans ce chapitre, nous présenterons les modèles utilisés pour la simulation des gerbes hadroniques. Puis nous détaillerons la simulation du prototype SDHCAL et nous expliquerons les différentes étapes de la modélisation de la réponse des GRPC aux particules chargées. Enfin quelques des comparaisons entre les données et la simulation seront présentées.

### Contenu

45	<b>1</b>	<b>Les modèles de simulation des gerbes hadroniques . . . . .</b>	<b>14</b>
	1.1	Modèles de cordes partoniques . . . . .	14
	1.2	Le modèles de cascade intranucléaire de Bertini . . . . .	15
	1.3	Les listes physiques . . . . .	16
50	<b>2</b>	<b>La simulation du prototype . . . . .</b>	<b>17</b>
	<b>3</b>	<b>Modélisation de la réponse des GRPC au particules chargées .</b>	<b>17</b>
	3.1	Algorithme SimDigital . . . . .	17
	3.2	Paramétrisation de l'algorithme . . . . .	17
	3.3	Résultats . . . . .	17
55	<b>4</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>17</b>

# 1 Les modèles de simulation des gerbes hadroniques

La collaboration GEANT4 [2] fournit un logiciel rassemblant de nombreux modèles théoriques et phénoménologiques qui décrivent les interactions de particules avec la matière. Ces modèles n'étant valable que sur certaines gammes d'énergies (cf. figure 2.1), l'utilisateur doit les combiner pour simuler un phénomène physique. La collaboration GEANT4 fournit aussi un certain nombre de listes physiques utilisant et définissant des transitions entre ces modèles (cf. section 1.3).

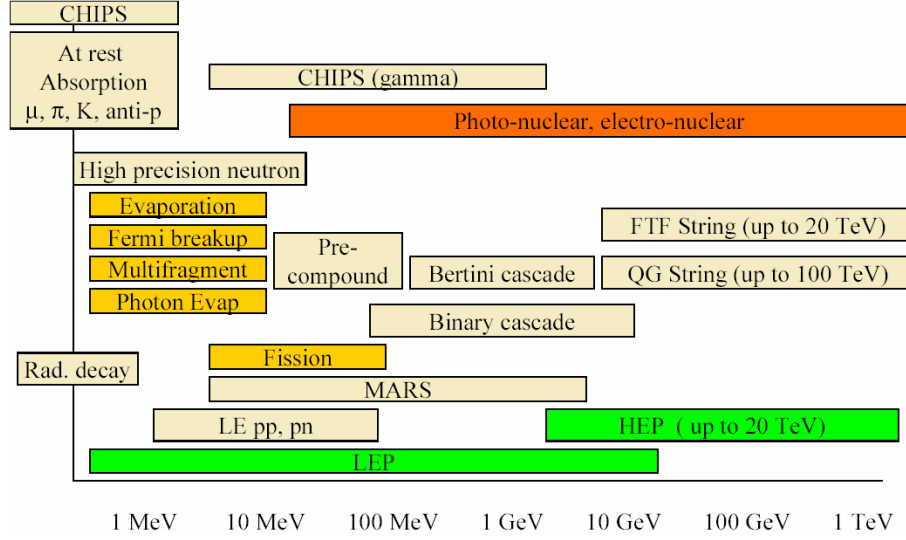


FIGURE 2.1 – Les modèles utilisés dans GEANT4.

Les principaux modèles pour les interactions hadroniques de haute énergie avec la matière sont les modèles de cordes partoniques (cf. section 1.1) qui sont valables pour des énergies supérieures à 5 – 10 GeV. Les interactions aux énergies intermédiaires ( $100 \text{ MeV} < E < 10 \text{ GeV}$ ) sont simulées avec les modèles de cascade intranucléaires (cf. section 1.2). Pour traiter les noyaux excités par des collisions de plus haute énergie et les interactions en dessous de 200 MeV, une famille de modèles de désexcitation nucléaire (fission, évaporation nucléaire...) est disponible. Les interactions des neutrons de basses énergies ( $E < 20 \text{ MeV}$ ) peuvent être simulées avec des modèles de haute précision pour neutrons où un grand nombre de sections efficaces ont été tabulés. L'utilisation ou non de ces modèles de haute précision pour les neutrons aura des conséquences sur le temps de calcul, sur la réponse simulée du détecteur ou sur la topologie des gerbes...

## 1.1 Modèles de cordes partoniques

Les modèles de cordes partoniques permettent de simuler les réactions de hautes énergies de hadrons avec des noyaux. Les deux principaux modèles utilisés dans GEANT4 sont les modèles QGS (Quark Gluon String) et FTF (Fritiof) [5]. Le résultat de l'interaction d'un hadron avec un noyau est une ou plusieurs cordes excitées. Une corde est un segment où chacune des deux extrémités sont un quark ou un di-quark se déplaçant dans des directions opposées. Les noyaux sont modélisés comme un ensemble de nucléons dont les positions sont aléatoirement choisies en utilisant une distribution de densité. Pour les noyaux lourds

85 (A>16), une distribution de densité de la forme du potentiel de Wood-Saxon est utilisée :

$$\rho(r_i) = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r_i - R)/a]} \quad (2.1)$$

où  $R$  et  $a$  dépendent de la masse du noyau. Pour les noyau léger une distribution de densité venant du modèle d'oscillateur harmonique est utilisée :

$$\rho(r_i) = (\pi R'^2)^{-3/2} \exp(-r_i^2/R'^2) \quad (2.2)$$

avec  $R'$  qui dépend de la masse du noyau. Pour calculer le paramètre d'impact avec les nucléons, ces deux distribution de densité sont réduites dans un plan perpendiculaire à la direction de la particule incidente. La probabilité de collision entre le hadron et un  
90 nucléon est calculée en utilisant une distribution gaussienne pour les fonctions d'onde du hadron et des nucléons. Ces probabilités sont utilisées pour connaître le nombre de nucléons participant à la réaction dans le noyau.

Des cordes sont ensuite créées, les quarks du hadron incident sont aléatoirement répartis  
95 entre celles-ci. Un modèle de fragmentation longitudinal de cordes est ensuite utilisé où ces cordes sont séparées en hadrons et en une nouvelle corde. Une corde se fragmente en une paire quark-antiquark  $q - \bar{q}$  ou diquark-antidiquark  $qq - \bar{q}\bar{q}$  [4]. Les probabilités relatives de création des quark ou diquark sont :

$$u : d : s : qq = 1 : 1 : 0.35 : 0.1 \quad (2.3)$$

La paire de quark-antiquark (ou diquark-antidiquark) créée est placée entre la précédente  
100 paire. Une moitié de ces nouvelles paires sont utilisées pour créer un hadron tandis que les autres constituants créent une nouvelle corde. Ce processus se répète jusqu'à ce que l'énergie d'une corde ne soit pas suffisante pour créer un hadron.

Après l'interaction du noyau avec la particule incidente, celui-ci sera dans un état excité. Le retour à l'état fondamental du noyau est simulée avec des modèle de fragmentation, précomposé et de désexcitation nucléaire.

Particule	QGS	FTF
$k+$	12 GeV – 100 TeV	4 GeV – 100 TeV
$k-$	12 GeV – 100 TeV	4 GeV – 100 TeV
$\lambda$		2 GeV – 100 TeV
$\pi+$	12 GeV – 100 TeV	4 GeV – 100 TeV
$\pi-$	12 GeV – 100 TeV	4 GeV – 100 TeV
<i>neutron</i>	12 GeV – 100 TeV	4 GeV – 100 TeV
<i>proton</i>	12 GeV – 100 TeV	4 GeV – 100 TeV
<i>ion</i>		2 GeV – 100 TeV

TABLE 2.1 – Chambers list where threshold are changed.

105

## 1.2 Le modèles de cascade intranucléaire de Bertini

Il a été montré dans [3] en 1969 qu'un modèle de cascade intranucléaire décrivait relativement bien les interactions de nucléons de 100 MeV à 2 GeV avec des noyaux. Ces réactions sont caractérisées par une rapide ( $10^{-23} - 10^{-22}s$ ) cascade intranucléaire laissant  
110 les noyaux dans un état excité, suivi d'une phase plus lente ( $10^{-18} - 10^{-16}s$ ) d'évaporation nucléaire. blabblba geant4 deux modèle...

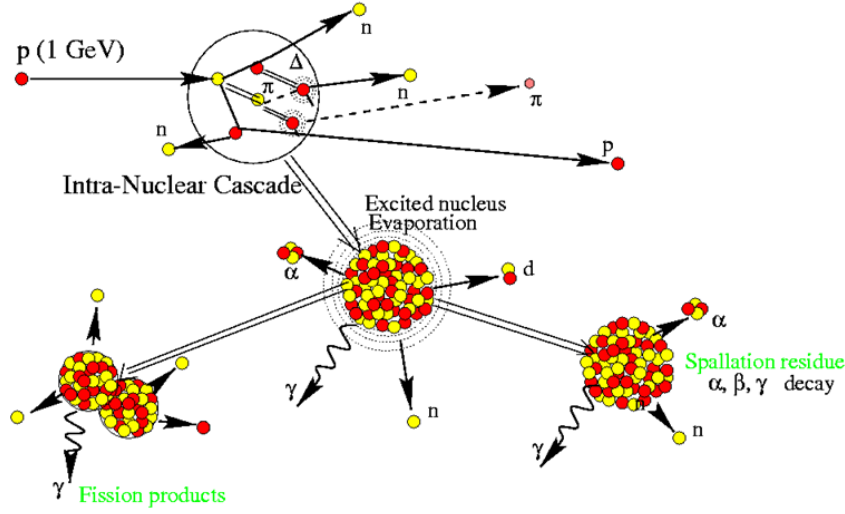


FIGURE 2.2 – Schéma d'explication du modèle de Bertini. Un hadron de 400 MeV crée une cascade intracléaire.

## Bertini

Ce modèle a depuis été étendu et est valable pour des particules incidentes ( $p, n, \pi, K, \Delta, \Sigma, \Xi, \Omega$  et  $\gamma$ ) avec une énergie cinétique comprise entre 100 MeV et 10 GeV [1]. Ce modèle est applicable lorsque la longueur d'onde de deBroglie de la particule incidente est de l'ordre de la distance moyenne entre les nucléons du noyau. Le noyau cible est modélisé par jusqu'à six couches concentriques de densité constante. La cascade commence lorsque une particule incidente rencontre un nucléon du noyau cible et produit des particules secondaires. Ces particules secondaires interagissent alors avec les autres nucléons, sont absorbés ou s'échappent du noyau. La cascade prend fin lorsque toutes les particules secondaires sont soit absorbées soit se sont échappées. La figure 2.2 illustre le phénomène de cascade intranucléaire.

## Binary

Dans GEANT4, un autre modèle de cascade intranucléaire est disponible et est utilisé par certaine liste physique. C'est le modèle de cascade binaire.

### 1.3 Les listes physiques

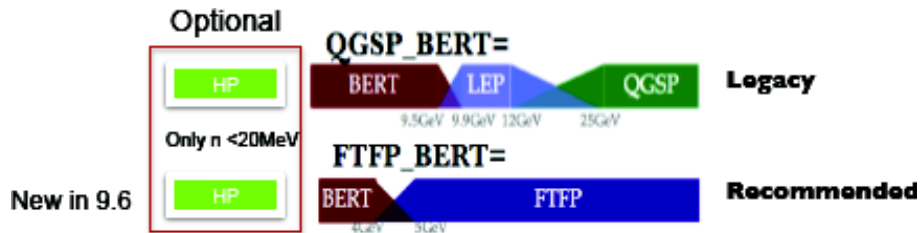


FIGURE 2.3 – Liste physique.



## 2 La simulation du prototype

## 3 Modélisation de la réponse des GRPC au particules chargées

### 3.1 Algorithme SimDigital

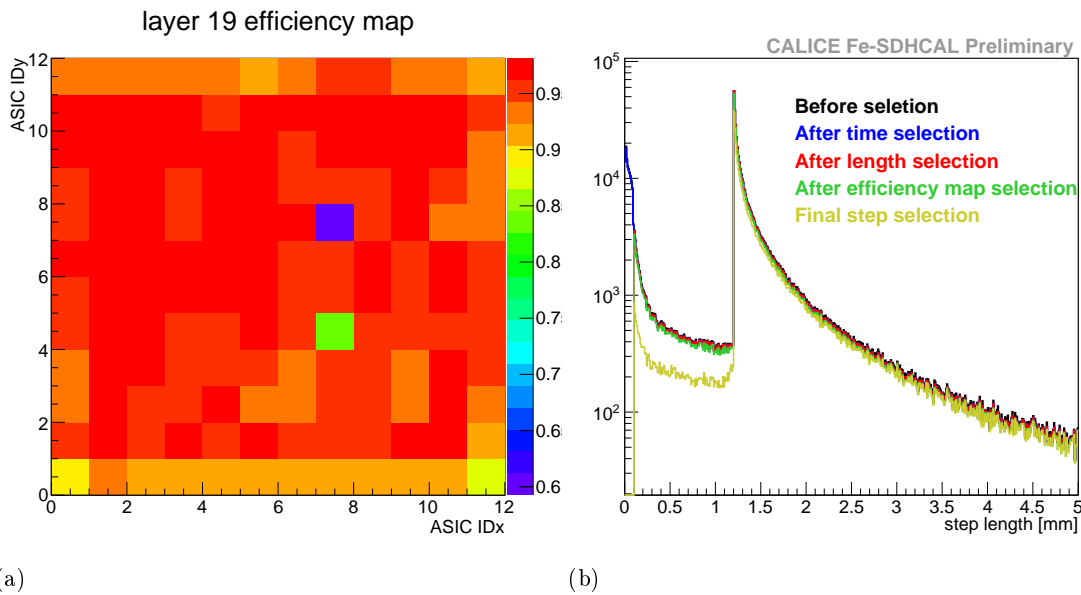


FIGURE 2.4 – (a) Exemple d'une carte d'efficacité des ASICs. (b) Distribution de la longueur des steps avant et après l'application des filters.

### 130 3.2 Paramétrisation de l'algorithme

Mesure du spectre de charge

Répartition de la charge

Dépendance de l'angle d'incidence

### 3.3 Résultats

### 135 Gerbes électromagnétique

Gerbes hadroniques

## 4 Conclusion

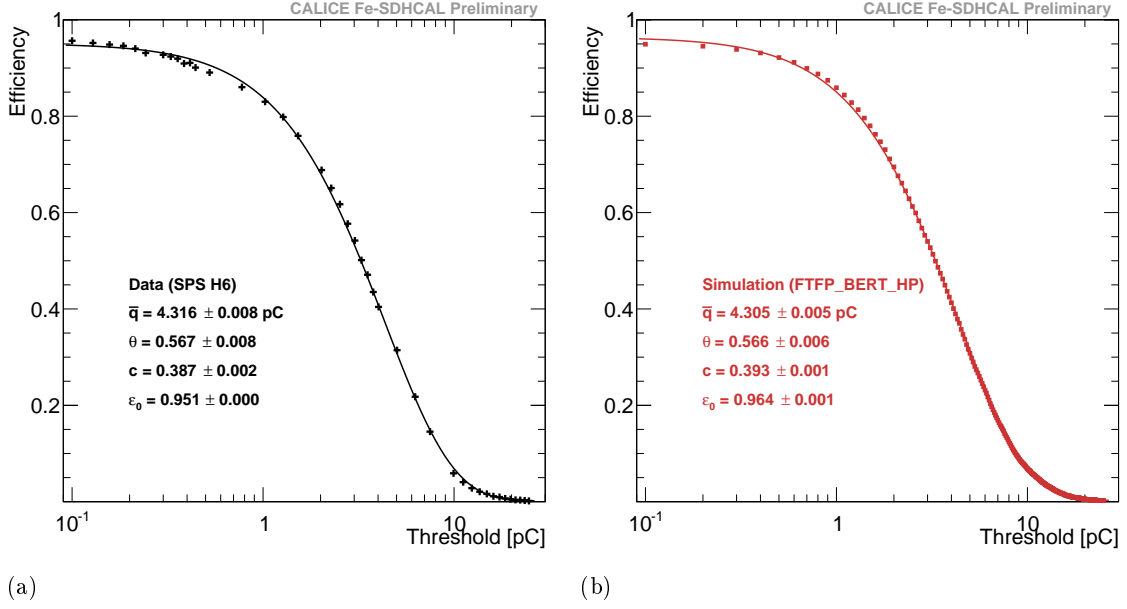


FIGURE 2.5 – (a) Résultats du scan en seuil pour les données (a) et pour la simulation (b).

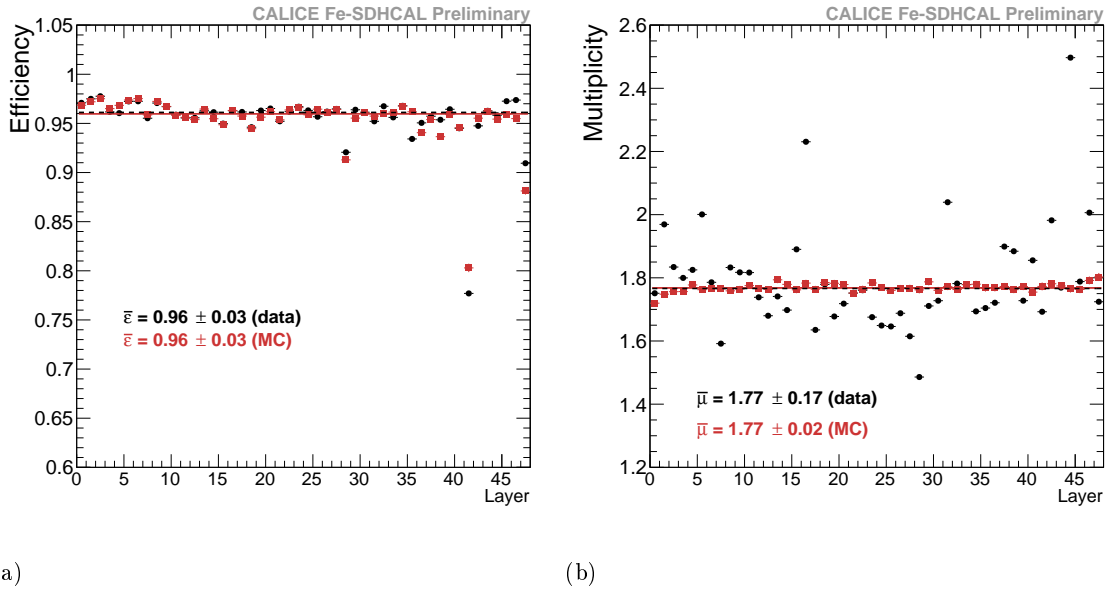


FIGURE 2.6 – Efficacité (a) et multiplicité (b) par plan. Les données sont représentées par des cercles noirs et la simulation par des carrés rouges.

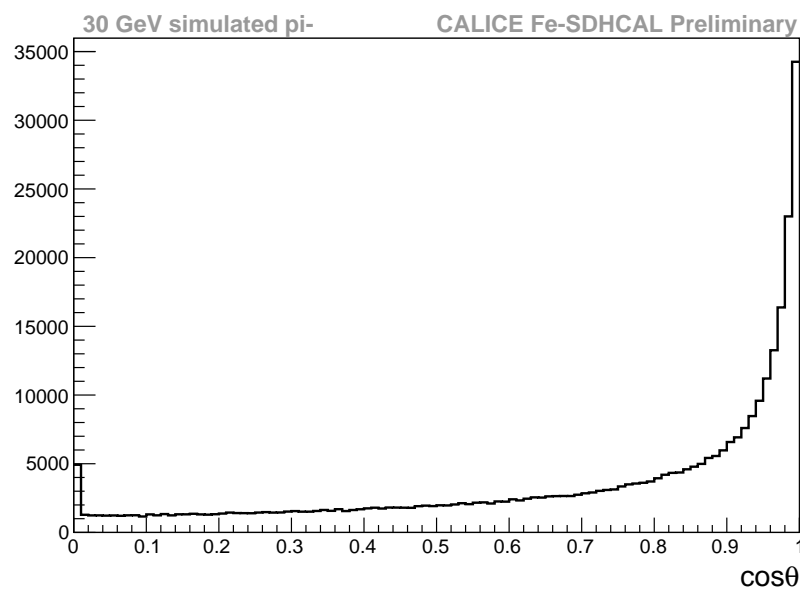
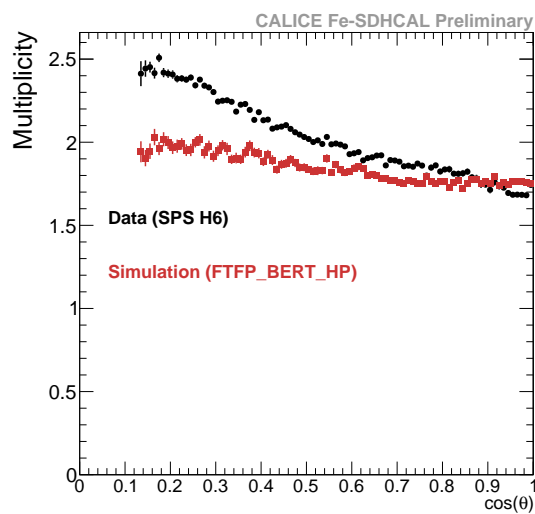
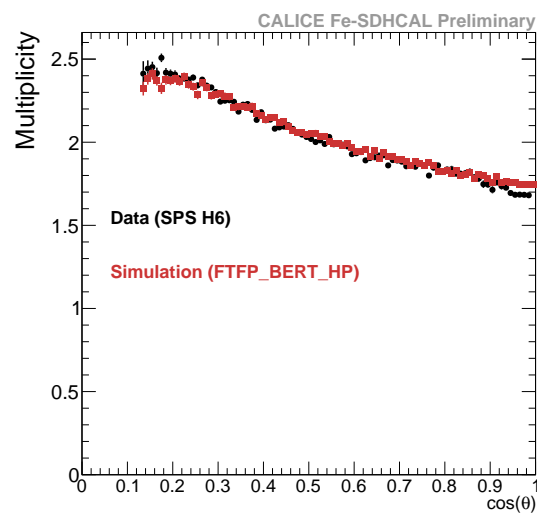


FIGURE 2.7 – Distribution du cos de l'angle de la step avec la normal à la GRPC pour une simulation d'un échantillon de pion à 30 GeV.



(a)



(b)

FIGURE 2.8 – Multiplicité moyenne en fonction de  $\cos\theta$  avec des cercles noirs et des carré rouges pour les données et la simulation respectivement. (a) : sans correction sur la longueur des steps ; (b) avec correction sur la longueur des steps.

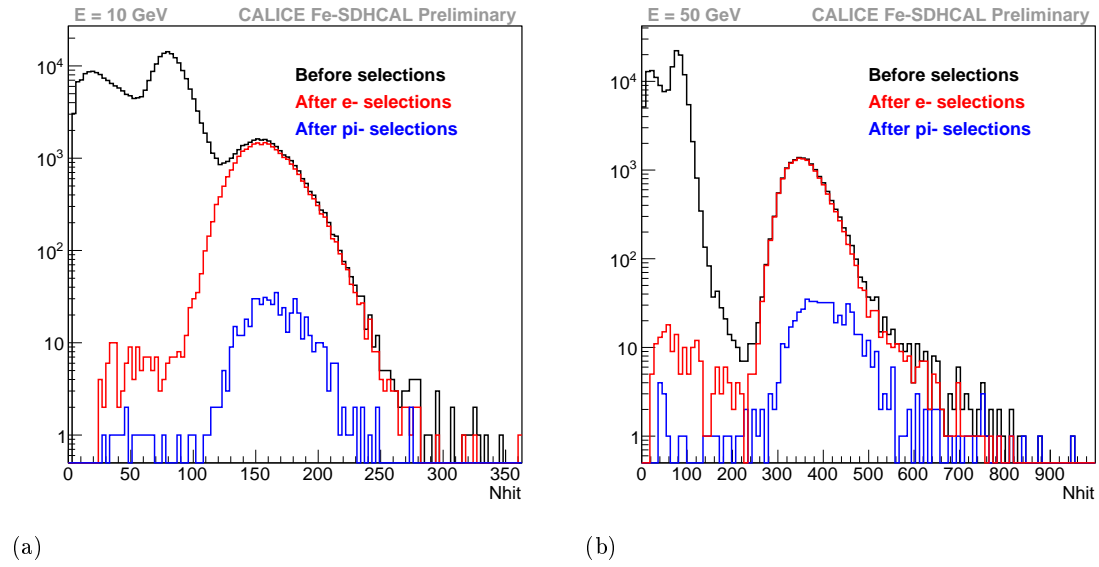


FIGURE 2.9 – Distribution du nombre de hits pour des échantillons de données d'électrons à 10 GeV (a) et 50 GeV (GeV). Les lignes noires montrent les distributions de nombres de hits avant les coupures, les lignes rouges après les coupures de sélection des électrons et les lignes bleu après les coupures de sélection des pions.

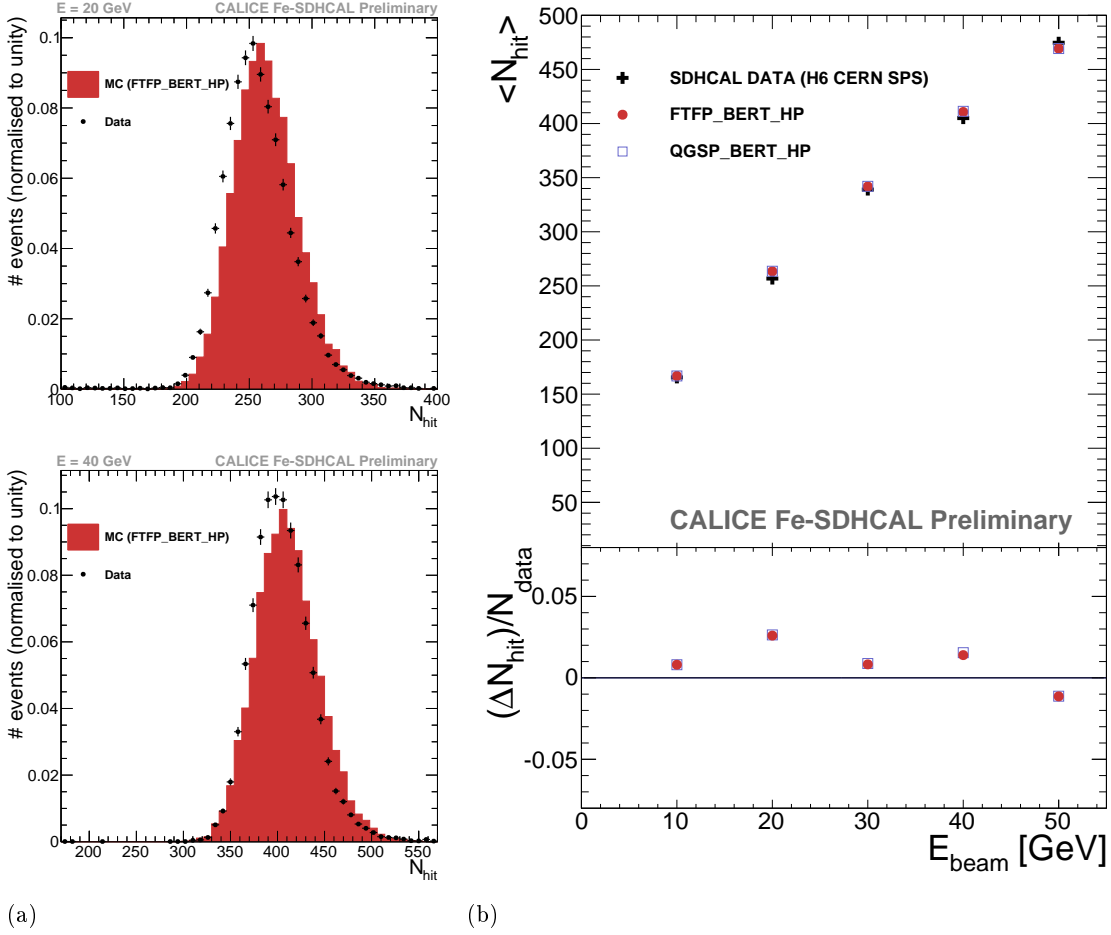


FIGURE 2.10 – (a) : Distribution de nombre de hits pour des échantillons d'électrons de 20 GeV (en haut) et 40 GeV (en bas). Les données sont représenté par des croix noires et la simulation par les histogrammes rouges. (b) : Moyenne du nombre de hits pour des échantillons d'électrons en fonction de l'énergie du faisceau. Les données sont représentés par des croix noires et la simulation par des cerles rouges (FTFP\_BERT\_HP) et des carrés bleus (QGSP\_BERT\_HP). La déviation relative est aussi présentée.

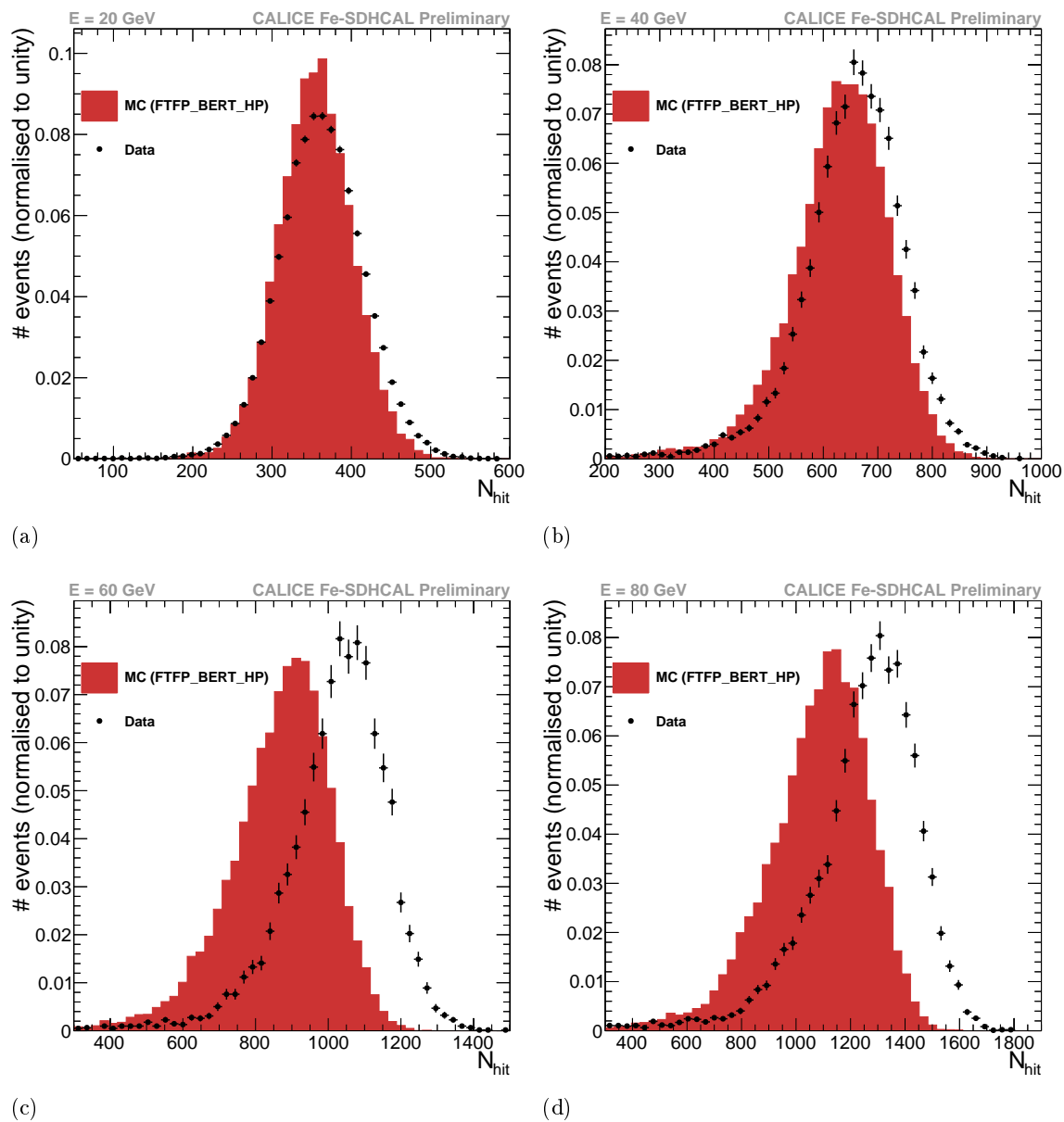


FIGURE 2.11 – Distribution du nombre de hits pour des échantillons de pions de 20 GeV (a), de 40 GeV (b), de 60 GeV (c) et de 80 GeV (d). Les données sont représentées par des croix noires et la simulation par les histogrammes rouges.

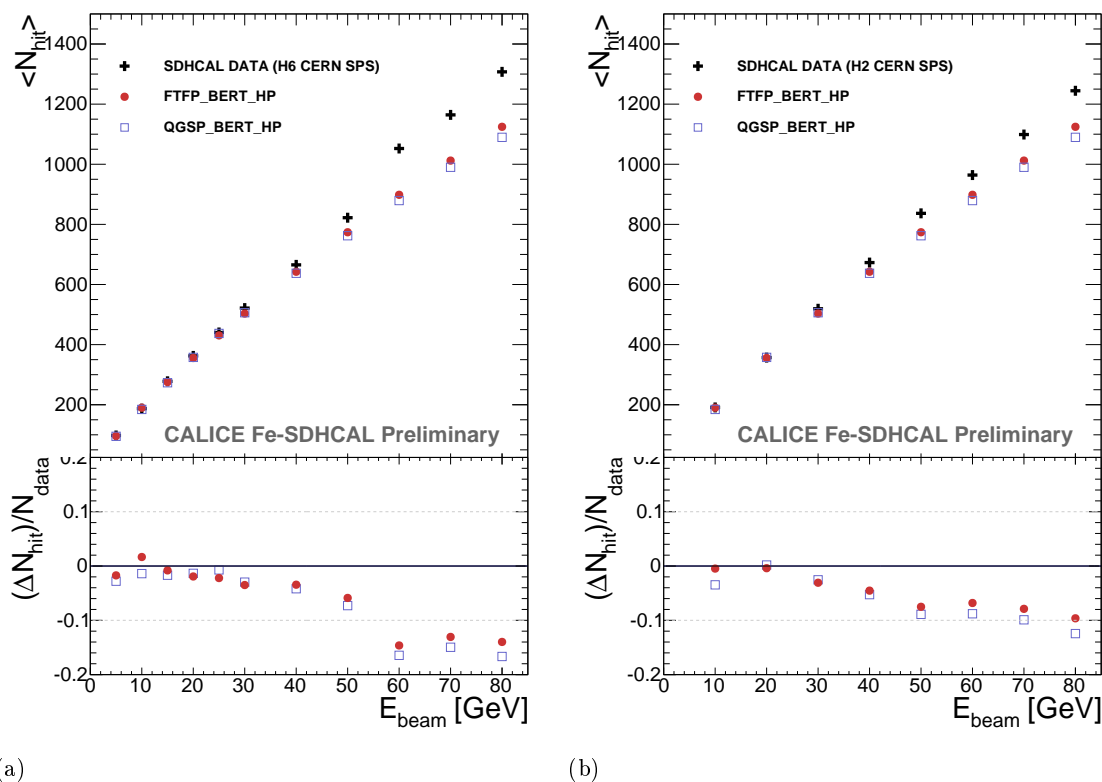


FIGURE 2.12 – Moyenne du nombre de hits for des échantillons de pions en fonction de l'énergie du faisceau. Les données sont représentées par des croix noires et la simulation par des cerles rouges (FTFP\_BERT\_HP) et des carrés bleus (QGSP\_BERT\_HP). La déviation relative est aussi présentée. (a) : données enregistrées sur la ligne H6 du SPS au CERN; (b) : données enregistrées sur la ligne H2 du SPS au CERN.





# Bibliographie

- 140 [1] J.P. Wellisch A. Heikkinen, N. Stepanov. Bertini intra-nuclear cascade implementation  
in Geant4. 2003. URL <http://arxiv.org/abs/nuc1-th/0306008>.
- [2] S. Agostinelli and al. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Me-*  
*thods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and As-*  
*sociated Equipment*, 506(3) :250 – 303, 2003. ISSN 0168-9002. doi :DOI:10.1016/  
S0168-9002(03)01368-8. URL [http://www.sciencedirect.com/science/article/](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688)  
145 [pii/S0168900203013688](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688).
- [3] H.W. Bertini. Intranuclear-Cascade Calculation of the Secondary Nucleon Spectra  
from Nucleon-Nucleus Interactions in the Energy Range 340 to 2900 MeV and Compa-  
risons with Experiment. *Physical Review*, 1969. URL [http://journals.aps.org/pr/](http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.188.1711)  
[abstract/10.1103/PhysRev.188.1711](http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.188.1711).
- 150 [4] GEANT4 collaboration. Physics Reference Manual.
- [5] J.P. Wellisch G. Folger. String Parton Models in Geant4. 2003. URL [http://arxiv.](http://arxiv.org/abs/nuc1-th/0306007)  
[org/abs/nuc1-th/0306007](http://arxiv.org/abs/nuc1-th/0306007).