

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Université Saâd DAHLAB-Blida 1
Faculté des Sciences
Département de Physique



*Laboratoire de Physique Théorique et Interactions Rayonnement–Matière
(LPTHIRM)*

Mémoire de Master

*présenté
pour l'obtention du diplôme de master en :*

PHYSIQUE DES RAYONNEMENTS

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE L'EFFET DES RAYONS COSMIQUES SUR LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES ET LE PERSONNEL NAVIGANT DANS L'ENVIRONNEMENT AVIONIQUE

présenté par :

Driouch Rekia

soutenu le 1 octobre 2020 devant le jury composé de :

MR. A. A. AIDOUNI	Maître de Conférences classe B	U. S. D.-Blida 1	Président
MR. M. S. M. OULD MOHAMED	Maître de Conférences classe B	U. S. D.-Blida 1	Rapporteur
MR. M. LAOUES	Maître de Conférences classe B	U. S. D.-Blida 1	Examineur

Blida 2020

Remerciements

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadreur Mr **OULD MOHAMED Mounir Sidi Mohamed** maître de conférences classe B à l'université de Blida 1, pour l'aide compétente qu'il m'a apporté, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Mes vifs remerciements vont à Mr **Aidouni Ahmed Amine** maître de conférences classe B à l'université de Blida 1 pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce travail. Je tiens à remercier Mr **Laous Mustapha** maître de conférences classe B à l'université de Blida 1 pour l'intérêt qu'il a porté à ce mémoire en acceptant de l'examiner.

Je remercie **Mr. Khelifi** professeur à l'université Blida 1 et *chef d'option physique des rayonnements*, je remercie également toute l'équipe pédagogique de spécialité : Mr **Chikrine**, Mr **Morchidi**, Mr **Bounemri**.

Je remercie spécialement Mr **M. Sidamou** et Mr **Mouloud Driouch** un doctorant dans l'institut aéronautique, Mr. **Abdel Krim Dehméne** professeur dans la faculté de l'architecture, pour leurs aides, leurs encouragements pendant les 5 ans de mes études.

Enfin, je n'oserais oublier de remercier tout le corps professoral de la faculté des sciences, pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.

Dédicaces

je dédie ce travail : À ma chère mère,

À mon cher père,

À mon frère Yassine

À mes chères sœurs *Khadidja et Amina*,

À mon cher grand-père, qui je le souhaite une bonne santé .

À ma chère **Kahina Belkassa**, Qui m'a aidé pendant toute l'année , et surtout dans mes études.

À mes chères amies, Rayane, Ahlem, Amele, Amira benhouhou, Khadidja Belhacem, Chirine pour leur aidé et supporté dans les moments difficiles.

À tous ma famille,

À tous mes autres ami(e)s.

Résumé

Dans ce travail, nous avons mené une étude numérique au premier temps sur l'effet des neutrons atmosphériques (issus de l'interaction des rayons cosmiques primaires-atmosphère) sur les semi-conducteurs (Silicium, Germanium et Arsenic de gallium), en second temps nous avons vu l'effet de ces neutrons sur le personnel navigants.

Pour simuler les différentes interactions particules-matière nous avons utilisé le code Monte Carlo GEANT4. Les résultats obtenus montrent que les protons cosmiques primaires d'énergie 3 GeV, déposent la totalité de leur énergie dans la zone avionique et donnent naissance aux neutrons secondaires (atmosphérique) dont l'énergie varie entre 0.1 MeV et 5 MeV. Ces derniers ne présentent aucun danger sur les semi-conducteurs et le personnel navigants.

Mots-clés

Rayons cosmiques, neutrons atmosphériques, Geant4, Atmosphère terrestres, Semi-conducteurs, corps humain

Abstract

In this work, we have study numerically the effect of atmospheric neutrons (resulting from the interaction of elementary cosmic rays - atmosphere) on semiconductors (silicon, germanium and gallium arsenic), and the effect of these neutrons on humain body.

To simulate the interaction of different particles, we used the Monte Carlo code GEANT4. The results obtained show that the primary cosmic protons with an energy of 3 GeV deposit all their energy in the avionic area and give the secondary neutrons whose energy is between 0.1 MeV and 5 MeV. These neutrons present no risk to the semiconductor and the humain body.

Keywords

primary cosmic rays, secondary cosmic rays, Earth's atmosphere, Geant4, semiconductors, humain body

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Introduction Générale	1
1 Interaction rayonnement-matière	3
1.1 Interactions particules chargées matière	3
1.1.1 Interaction électron-matière	3
1.1.2 Interaction proton-matière	3
1.2 Interactions particules neutres matière	4
1.2.1 Interaction des photons avec la matière	4
1.2.1.1 Effet photoélectrique	5
1.2.1.2 Effet Compton	5
1.2.1.3 Production de paires	5
1.2.2 Interaction neutron-matière	6
2 Généralité sur les rayons cosmiques	8
2.1 Composition des rayons cosmiques	8
2.2 Spectre énergétique des rayons cosmiques	9
2.3 Origine des rayons cosmiques	10
2.4 Les gerbes atmosphériques	10
3 Outil de Simulation et Modèle géométrique de l’atmosphère terrestre	13
3.1 Geant4	13
3.1.1 Utilisation de Geant4	14
3.1.2 Processus et modèles physiques dans Geant4	16
3.1.2.1 Modèles électromagnétiques	17
3.1.2.2 Modèles hadroniques	17

3.2	Modélisation de l'atmosphère terrestre	18
3.2.1	Caractéristiques de l'atmosphère terrestre	18
4	Résultats et discussions	22
4.1	Interaction des protons cosmiques primaires avec l'atmosphère	22
4.1.1	Énergie déposée	22
4.1.2	Les neutrons secondaires (neutrons atmosphériques)	24
4.1.3	Les protons secondaires	25
4.1.4	Les rayons X (γ)	26
4.2	Interaction des particules secondaires avec les composants électroniques	26
4.2.1	Interaction neutrons atmosphériques - semi-conducteurs	26
4.2.1.1	Géométrie et particules primaires	26
4.2.1.2	Modèle physique	27
4.2.1.3	Résultats et discussions	28
4.3	Interaction des neutrons atmosphériques avec le corps humain	30
4.3.1	Modèles géométrique et physique	30
	Conclusion Générale	34
	Bibliographie	36

Table des figures

1.1	Les trois principaux types d'interactions des photons avec la matière.	4
1.2	Illustration de l'effet photoélectrique	5
1.3	Illustration de l'effet Compton	5
1.4	Production de paires	6
1.5	Les interactions neutroniques	7
2.1	flux des principaux particules cosmiques	9
2.2	Spectre d'énergie du rayonnement cosmique (flux différentiel en fonction de l'énergie).	10
2.3	Développement d'une gerbe atmosphérique	12
3.1	Les 17 Catégorie de classes de Geant4	14
3.2	Structure générale d'une simulation dans Geant4	16
3.3	Domaine d'application des modèles composant quelques physics lists de Geant4, pour les interactions d'un hadron avec la matière en fonction de son énergie incidente	18
3.4	Les variations de la densité, température et pression en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer	19
3.5	Représentation de la Terre par Geant4	21
3.6	Illustration de quelques couches atmosphériques par Geant4	21
4.1	Profil du dépôt d'énergie en fonction de l'altitude des protons primaires dans l'atmosphère	24
4.2	Spectre énergétique des neutrons secondaires issus de l'interaction des protons primaires dans l'atmosphère	24
4.3	Spectre des neutrons atmosphérique (mesuré expérimentalement)[21]	25
4.4	Spectre énergétique des protons secondaires	25
4.5	Spectre énergétique des rayons X (γ)	26
4.6	Visualisation par Geant4 de l'interaction d'un faisceau composé de 1000 neutrons (1 MeV) avec : (a) Silicium, (b) Germanium	27
4.7	Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur $20 \mu m$) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 0.4 MeV.	29

4.8	Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur 20 μm) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 1 MeV . . .	29
4.9	Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur 10 μm) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 0.4 MeV. . .	29
4.10	Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur 10 μm) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 1 MeV . . .	29
4.11	Spectre énergétique des particules de recul générées dans des cibles semi-conducteurs (10 μm) par des neutrons primaires d'énergie 0.4 MeV et 1 MeV	30
4.12	Spectre énergétique des particules de recul générées dans des cibles semi-conducteurs (20 μm) par des neutrons primaires d'énergie 0.4 MeV et 1 MeV	30
4.13	Distribution de la dose dans le fantôme d'eau	31
4.14	Courbe de dose en profondeur (normalisées par le nombre de particules sources) le long de l'axe central dans l'eau pour énergie primaire de neutron 10 MeV	32
4.15	Courbes de dose en profondeur (normalisées par le nombre de particules sources) le long de l'axe central dans l'eau pour des énergies primaires de neutrons 1 MeV et 0.4 MeV	32
4.16	Courbes de dose équivalente pour des énergies primaires de neutrons 1 MeV et 0.4 MeV	33

Liste des tableaux

1.1	Classification des neutrons selon leurs énergies	6
3.1	Propriétés des couches atmosphériques	20
3.2	Composition chimique de l'atmosphère terrestre	21
4.1	L'altitude du pic de Bragg par rapport au niveau de la mer	23

Introduction Générale

Les rayons cosmiques sont des noyaux atomiques et des particules élémentaires qui voyagent dans l'espace à des vitesses voisines de celle de la lumière. Certains d'entre eux s'approchent suffisamment de la terre pour être détectés par des instruments placés dans des satellites en orbite terrestre, d'autre pénétrant dans l'atmosphère terrestre, entrent en collision avec les noyaux de l'atmosphère, et produisent des générations successives de particules secondaires, principalement des neutrons, protons, électrons, pion et muons, ces derniers peut atteindre le niveau de la mer.

Depuis la découverte des rayons cosmique au début du vingtième siècle, plusieurs axes de recherche ont été développés afin d'étudier ces rayons. Parmi ces axes nous citons l'étude l'effet des rayons cosmiques que soit primaires ou secondaires sur les composants électroniques embarqués sur les satellites et les avions.

Le travail entamé dans ce mémoire consiste à utilisé le code Monte-Carlo **Geant4** pour simuler les interactions des particules cosmiques avec l'atmosphère terrestre, les composants électroniques et le corps humain.

Ce manuscrit se décline en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les différents processus d'interactions des particules avec la matière .
- Le deuxième chapitre donne des généralités sur les rayonnements cosmique (leurs

nature, leurs types, leurs origines, leurs caractéristiques énergétiques, leurs interactions avec l'atmosphère terrestre).

- Le troisième chapitre expose l'outil de simulation Geant4.
- Le quatrième chapitre, contient les résultats de notre étude qui a visé à voir les effets de :
 - Interaction des protons cosmiques primaires avec l'atmosphère pour une gamme énergétique de 1 à 3 GeV .
 - Interaction des neutrons atmosphériques avec trois types de semi-conducteurs : silicium, germanium et arsenic de gallium .
 - Interaction des neutrons atmosphériques avec le corps humain.
- Enfin, notre travail est clôturé par une conclusion générale, qui résume les résultats et les perspectives de notre étude .

Interaction rayonnement-matière

On appelle rayonnement ou radiation le processus d'émission ou de transmission d'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Ce chapitre présente brièvement les différentes modes d'interaction rayonnement-matière.

1.1 Interactions particules chargées matière

1.1.1 Interaction électron-matière

Les électrons sont des particules élémentaires légères chargées négativement, au cours de leurs mouvement dans un milieu matériel, les électrons perdent principalement leurs énergies avec les électrons atomique du milieu traversé par deux mécanismes : *l'ionisation* et *l'excitation*. L'électron peut aussi interagit avec le noyau à travers de son champ coulombien, en entrant dans ce dernier l'électron subit une décélération et perd une partie de son énergie sous forme de rayonnement appelé rayonnement de freinage (bremsstrahlung).

1.1.2 Interaction proton-matière

Le proton est un hadron soumis à l'interaction forte, donc il peut donc provoquer des réaction nucléaire avec les noyaux atomiques cible. En plus il possède une charge électrique positive donc il soumis à l'interaction électromagnétique. Les principaux modes d'interactions des protons avec la matière sont :

- **Interactions élastiques avec les électrons** : auront lieu pour des très basses énergies
- **Interactions inélastiques avec les électrons** : les interactions inélastiques avec les électrons sont essentiellement les principales causes de la perte d'énergie du proton et provoquent l'excitation ou l'ionisation des atomes.
- **Interactions élastiques avec les noyaux** : provoquent une déviation du proton incident, et contribuent faiblement à la perte d'énergie totale dans la matière cible.
- **Interactions inélastiques avec les noyaux** : ces interactions provoquent une déviation importante du proton incident suivi par émission d'un rayonnement de freinage. Pour des grands énergies les interactions nucléaires sont de plus en plus importantes, ces dernières conduisent à la disparition du proton incident et à l'éjection de neutrons et autres particules protons, particule α, \dots les processus physiques mis en jeu sont connus sous le nom de cascade hadronique.

1.2 Interactions particules neutres matière

1.2.1 Interaction des photons avec la matière

Les photons sont des particules non chargée de masse nul, sont très pénétrants dans la matière. L'interaction de ces derniers avec la matière est décrite par trois mécanismes principaux : l'effet photoélectrique, la diffusion Compton, la production de paires. D'autres modes d'interactions du photon, moins importants, peuvent se produire, en l'occurrence, la diffusion Thomson avec un électron libre et la diffusion Rayleigh avec un électron lié. La figure 1.1 [2] montre les régions dans lesquelles chaque type d'interaction domine en fonction de l'énergie du photon incident et du numéro atomique de la cible.

1.2.1.1 Effet photoélectrique

Le rayonnement incident transfère toute son énergie à un électron atomique de la substance traversée (voir figure 1.2 [3]). L'énergie cinétique de l'électron éjecté est par la relation suivante :

$$E_e = h\nu - E_l \quad (1.1)$$

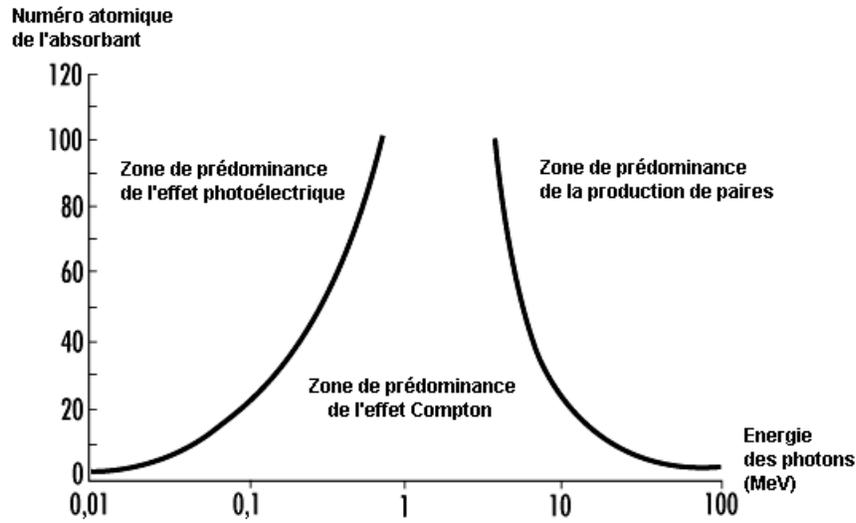


FIGURE 1.1 – Les trois principaux types d’interactions des photons avec la matière.

Où E_l est l’énergie de liaison d’un électron atomique et ν l’énergie du photon incident.

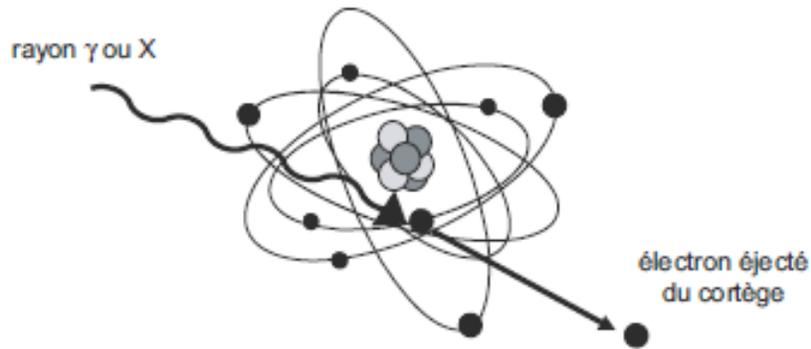


FIGURE 1.2 – Illustration de l’effet photoélectrique

1.2.1.2 Effet Compton

L’effet Compton (la diffusion Compton), a lieu lors de la collision d’un photon avec un électron faiblement lié. Le photon incident n’est pas complètement absorbé, il est plutôt dévié avec une énergie plus faible sous un angle θ et l’électron cible est diffusé sous un angle ϕ (voir figure 1.3 [3])



FIGURE 1.3 – Illustration de l'effet Compton

1.2.1.3 Production de paires

Dans ce mode d'interaction le photon incident disparaît après l'interaction et donne naissance à un positon et un électron. L'énergie minimum pour obtenir la matérialisation de cette paire est égale à 1.022 MeV , au-dessous de cette valeur, la réalisation de cet effet est énergétiquement impossible. La figure 1.4 montre le mécanisme de production de paire par un photon incident (voir figure 1.4 [3])

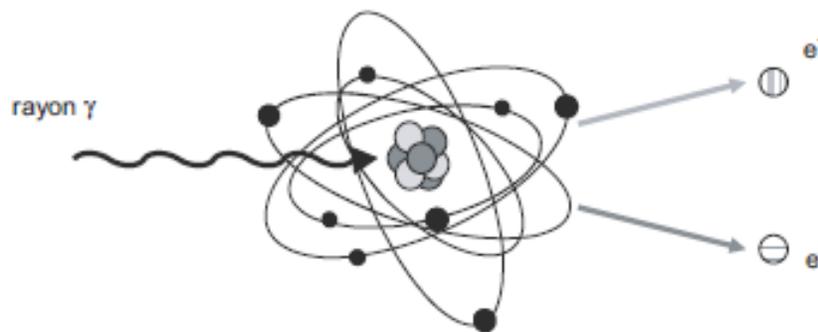


FIGURE 1.4 – Production de paires

1.2.2 Interaction neutron-matière

Le neutron est une particule subatomique électriquement neutre de masse au repos $939.5 \text{ MeV}/c^2$. Les neutrons ne sont pas des particules élémentaires, chaque neutron est composé de trois autres particules : un quark *up* et deux quarks *down*. Ils sont instables

lorsqu'ils sont pas liés avec une demi-vie de 13 minutes. Le tableau suivant donne la classification des neutrons en fonction de leurs énergies [1].

Types des neutrons	l'énergies
Thermique	0.025 eV
lents	$0.025 \text{ eV} < E_n < 0.5 \text{ eV}$
Epithermique	$0.5 \text{ eV} < E_n < 1 \text{ keV}$
Intermédiaire	$1 \text{ keV} < E_n < 0.5 \text{ MeV}$
Rapide	$0.5 \text{ MeV} < E_n < 50 \text{ MeV}$
relativiste	50 MeV

TABLE 1.1 – Classification des neutrons selon leurs énergies

L'interaction du neutron avec la matière est caractérisée, par son faible pouvoir ionisant par rapport aux photons et particules chargées c'est-à-dire que l'interaction avec les électrons atomique est négligeable. La seule forme d'interaction importante est donc celle du neutron avec les noyaux, à travers les forces nucléaire, par deux processus : **diffusion** (élastique, inélastique) et absorption[4] :

- **Diffusion élastique** : lors d'une collision élastique, le neutron incident diffuse sur un noyau cible et lui cède une partie de son énergie. Après le choc les deux particules rebondissent dans des directions et à des vitesses différentes de ce qu'ils avaient initialement (le noyau cible conserve sa nature qu'il avait avant le choc) et l'énergie cinétique totale du neutron et du noyau cible est conservée.
- **Diffusion inélastique** : lors d'une collision inélastique, le neutron incident est capturé par le noyau cible et l'énergie cinétique du système (neutron incident + noyau cible) n'est pas conservée. Par la suite une partie de cette énergie est transformée en énergie d'excitation au noyau qui pourra se désexciter en émettant un ou plusieurs rayonnements γ . Le neutrons émis à une énergie inférieure à celui qui a été capturé.
- **Absorption des neutrons** : Le neutron pénètre dans le noyau cible, après une brève durée de vie, le noyau composé ainsi constitué émet un rayonnement qui peut être un rayonnement γ , une particule α , un proton, ...

La probabilité d'absorption des neutrons est inversement proportionnelle à leur vitesse. Elle est maximal pour les neutrons les plus lents, dits thermiques, correspon-

nant a l'énergie d'agitation thermique du milieu (énergie de l'ordre de 0.025 eV pour une température de 25 C) [3]. La figure 8 [5] résume les différents modes d'interaction des neutrons avec la matière.

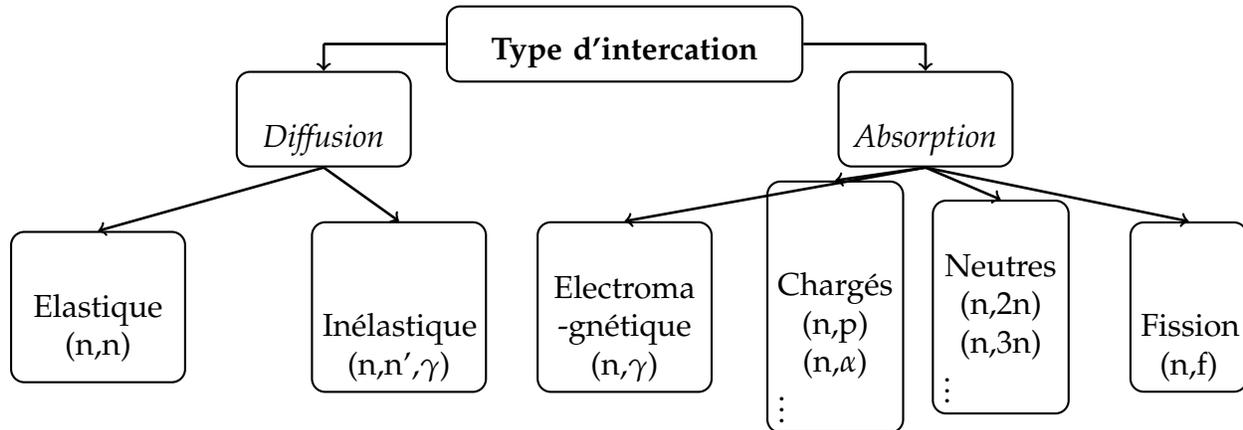


FIGURE 1.5 – Les interactions neutroniques

Généralité sur les rayons cosmiques

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu quelques caractéristiques des rayons cosmiques : leurs compositions, leurs spectre énergétique, . . . En second lieu nous présentons le développements du gerbe atmosphérique initiés par ces rayons.

2.1 Composition des rayons cosmiques

Nous désignons par Le terme rayons cosmiques des particules capables de parcourir des distances cosmologiques avant d'atteindre la Terre. Ces particules proviennent de tout l'Univers : Soleil, notre galaxie, les galaxies voisines, des galaxies lointaines . . . etc. Ils sont composés de particules chargées de haute énergie d'origine extra-terrestre. Ils sont principalement constitués de protons (85% à 90%), particules α (environ 10%), 1 à 3% de différents éléments chimiques ayant un numéro atomique compris entre 1 et 92 (pour les Z croissants, l'abondance relative des éléments diminue rapidement, notamment pour les ions les plus lourds que le Fer. Nous trouvons aussi des électrons et positrons. La figure [2.1](#) illustre le flux des principaux particules cosmiques en fonction de l'énergie, mesuré par différentes expériences [6].

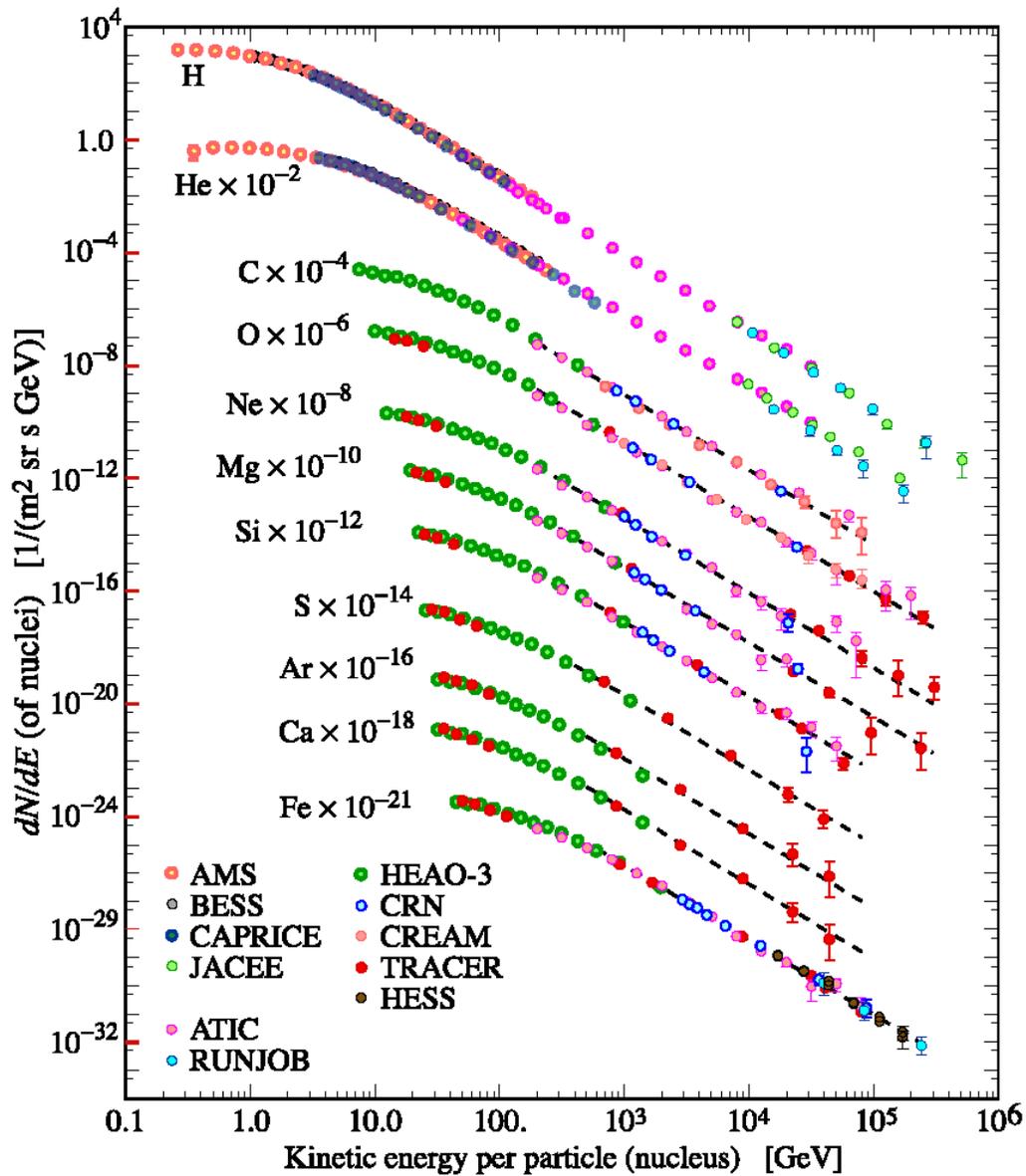


FIGURE 2.1 – flux des principales particules cosmiques

2.2 Spectre énergétique des rayons cosmiques

Parmi toutes les caractéristiques décrivant les rayons cosmiques, la plus impressionnante est certainement leur spectre en énergie (voir figure 2.2[7]) : il s'étend sur plus de 30 ordres de grandeur en flux et pas moins de 10 ordre de grandeur en énergie. Son évolution

est décrite par une loi de puissance presque parfaite en $dN/dE = E^{-\gamma}$ avec un indice spectral γ voisin de 2.7. Cette étonnante régularité du flux sur une gamme d'énergie assez vaste est un phénomène unique en physique. Nous allons explorer ce spectre selon les intervalles d'énergie :

- Jusqu'à 10^9 eV les rayons cosmiques sont principalement d'origine solaire.
- À basse énergie ($E \sim 10^{10}$ eV à $E \sim 10^{15}$ eV), le spectre est décrit par une loi en puissance d'indice spectral $\gamma = 2.7$. L'origine de ces particules est galactique.
- À $E \sim 3 \times 10^{15}$ eV se produit une rupture de la pente du flux. C'est le **genou**. Il demeure actuellement inexpliqué. Au delà de cette énergie, la pente augmente et l'indice spectral passe de 2.7 à 3
- À $E \sim 10^{17}$ nous remarquons une seconde cassure le **second genou**. L'indice spectrale passe de 3 à 3.3.
- Une autre cassure intervient vers 3×10^{18} eV. C'est la **cheville**, l'indice spectrale revient à ~ 2.7 . Cela pourrait indiquer la région de transition entre les rayons cosmique galactique et extragalactique.
- Au delà de la cheville, nous remarquons une nette diminution du flux.

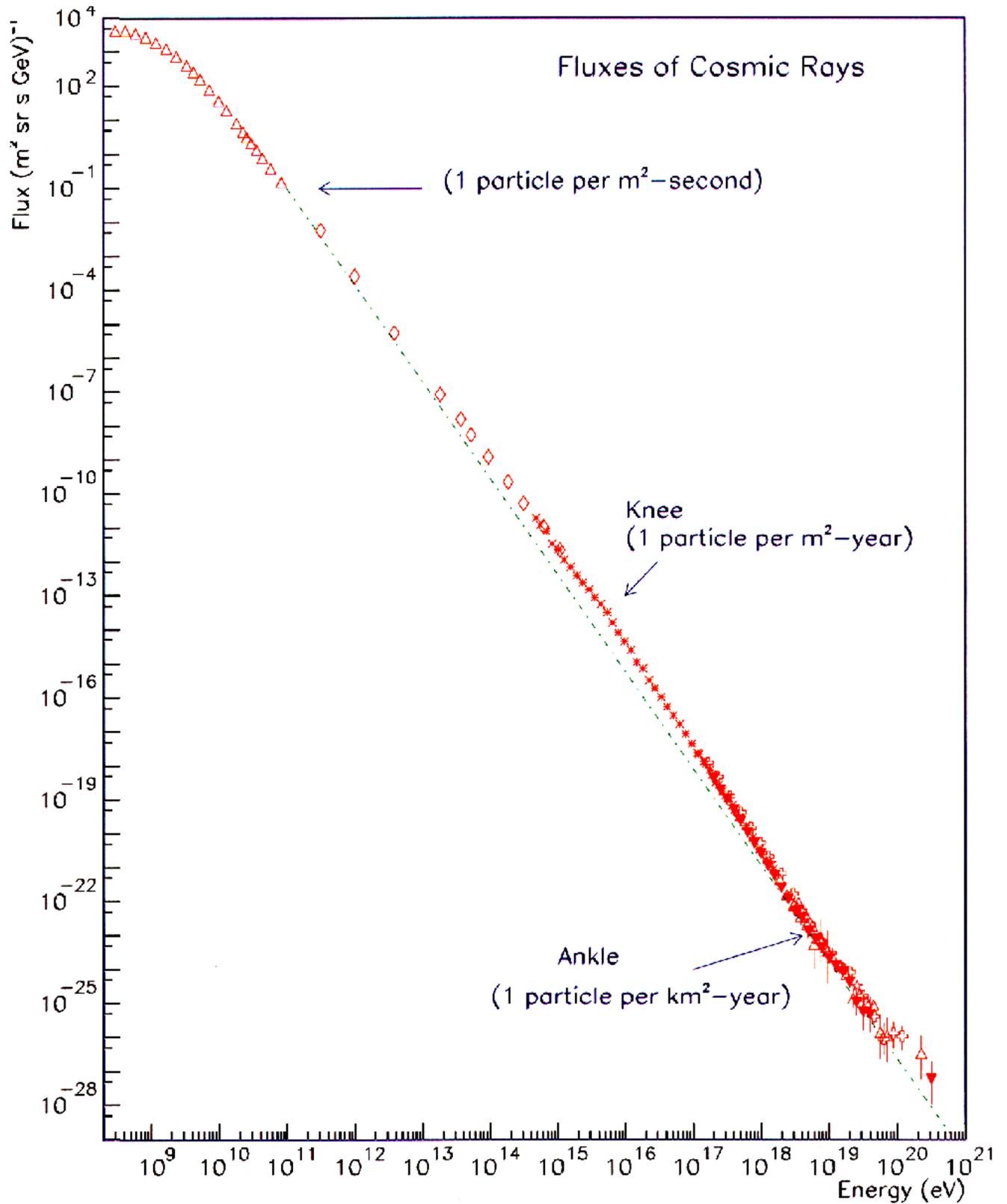


FIGURE 2.2 – Spectre d'énergie du rayonnement cosmique (flux différentiel en fonction de l' énergie).

2.3 Origine des rayons cosmiques

Les rayons cosmique proviennent principalement de régions hors du système solaire, mais sont surtout d'origine galactique, et même extra-galactique voir que le spectre énergétique s'étende jusqu' à des énergies de 10^{20} eV. Les rayons cosmiques sont classée selon leurs origine

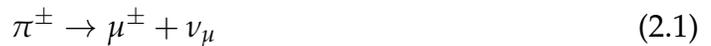
- **Rayons cosmiques galactiques (GCR)** : Le rayonnement cosmique galactique est isotrope, c'est-à-dire qu'il est le même dans toutes les directions. Elle est constituée de particules très énergétiques éjectées par les gigantesques explosions de supernovas, étoiles massives parvenues en fin de vie. Ces particules sont des atomes privés de leurs électrons en raison des températures régnant dans ces étoiles géantes. Elles sont de différents types, essentiellement des noyaux d'hydrogène (protons) et d'hélium (particules alpha), mais aussi des noyaux plus lourds comme le fer et le nickel. Leur vitesse est proche de celle de la lumière. GCR sont les rayons cosmiques les plus typiques, et leur flux dans le système solaire est modulé par l'activité solaire.
- **Rayons cosmiques solaires (SCR)** : Le soleil est à l'origine de la composante aléatoire du rayonnement cosmique, Cependant ces particules ayant une énergie plus faible que celles d'origine galactique, seule une petite part d'entre elles atteint la Terre.

2.4 Les gerbes atmosphériques

Lorsqu'un rayonnement cosmique énergétique pénètre l'atmosphère terrestre, il entre en interaction avec les molécules de l'atmosphère créant alors des particules secondaires, parmi lesquels : fragments de noyaux (fragments de spallation), des neutrons, des protons, des électrons, des pions, des kaons, des rayons . L'ensemble de ces particule est connue sous le nom de *gerbe atmosphérique*. Une gerbe atmosphérique est une *cascade* de particules créés tous d'abord par l'interaction d'un rayon cosmique primaire avec l'atmosphère, cette interaction crée des particules cosmiques secondaires , qui interagissent elles-mêmes avec l'atmosphère, créant ainsi d'autre particules et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'énergie des particule ne soit plus suffisante pour créés de nouvelles particules. Nous distinguons trois

composantes dans une gerbe atmosphérique :

- **La composante hadronique** : Elle est constituée des différents hadrons (proton, neutron, des pions (π^+ , π^- , π^0), des kaons, \dots), ils poursuivent leur parcours tant que leur énergie le permet, donnant naissance aux autres composantes de la gerbe.
- **La composante muonique** : Elle est composée de muons (de charge positive μ^+ et négative μ^-) et de neutrinos et antineutrino muoniques. Elle est alimentée par la décroissance des kaons d'une part, et la désintégration des pions chargés π^+ , π^- donnent des muons et neutrinos muoniques :



La durée de vie moyen d'un muon est de 2 milliardième se seconde. Ce temps de vie de microseconde parait très court, mais il est suffisant pour permettre au muon pour faire un long parcours dans l'atmosphère, en effet la plupart des muons cosmiques possèdent une grande énergie et circulent à la vitesse de la lumière dans le vide.

- **La composante électromagnétique** : Elle est constituée d'électron, positron et rayonnement γ . Ces particules sont produits tous d'abord par la décroissance d'un π^0 en 2 γ , ces derniers sont diffusés par effet Compton ou bien produisent des paires d'(e^+ , e^-) qui vont elles-même produire des γ par bremsstrahlung et ainsi de suite.

La figure suivante 2.3[8] illustre le développement d'une gerbe atmosphérique ainsi que ces composantes

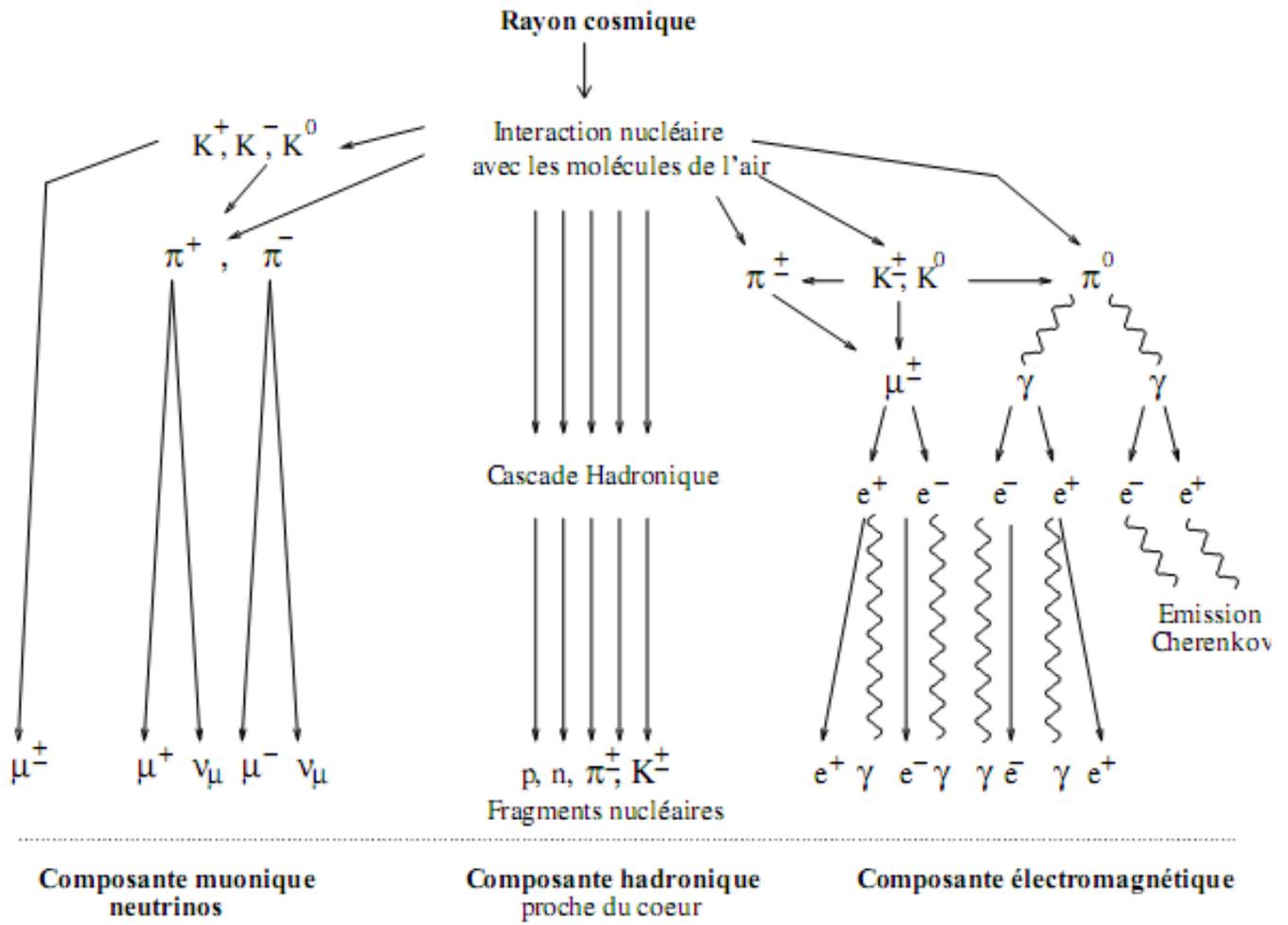


FIGURE 2.3 – Développement d'une gerbe atmosphérique

Outil de Simulation et Modèle géométrique de l'atmosphère terrestre

Dans ce chapitre nous présentons l'outil de simulation Geant4 utilisé dans notre étude, ainsi que le modèle géométrique de l'atmosphère terrestre.

3.1 Geant4

Geant4 (GEometry ANd Tracking) [9], est un code de calcul Monte Carlo (La méthode Monte Carlo fait référence à toutes méthodes visant à résoudre des problèmes par l'échantillonnage aléatoire d'une variable) largement utilisé *pour simuler les interactions des particules avec la matière* écrit en langage C++ basé sur la technologie orienté-objet. Geant4 est actuellement celui qui permet de couvrir la plus grande gamme de phénomènes physiques allant de la physique médicale à la physique des particules relativistes. Le code est constitué de plusieurs classes C++ que l'utilisateur appelle dans sa propre application. Les classes sont organisées en 17 catégories (voir figure 3.1). Suivant leurs tâches, Nous pouvons regrouper ces catégories sous des blocs principaux : la construction du détecteur (contient *Material* et *Geometry*), la succession de la simulation (*Run*, *Event*, *Tracking*), la physique (*Particle*, *Processes* et *Track*), la visualisation (*Visualisation* et *GraphicsRep*), l'enregistrement de données (*Digits*, *Hits* et *Readout*).

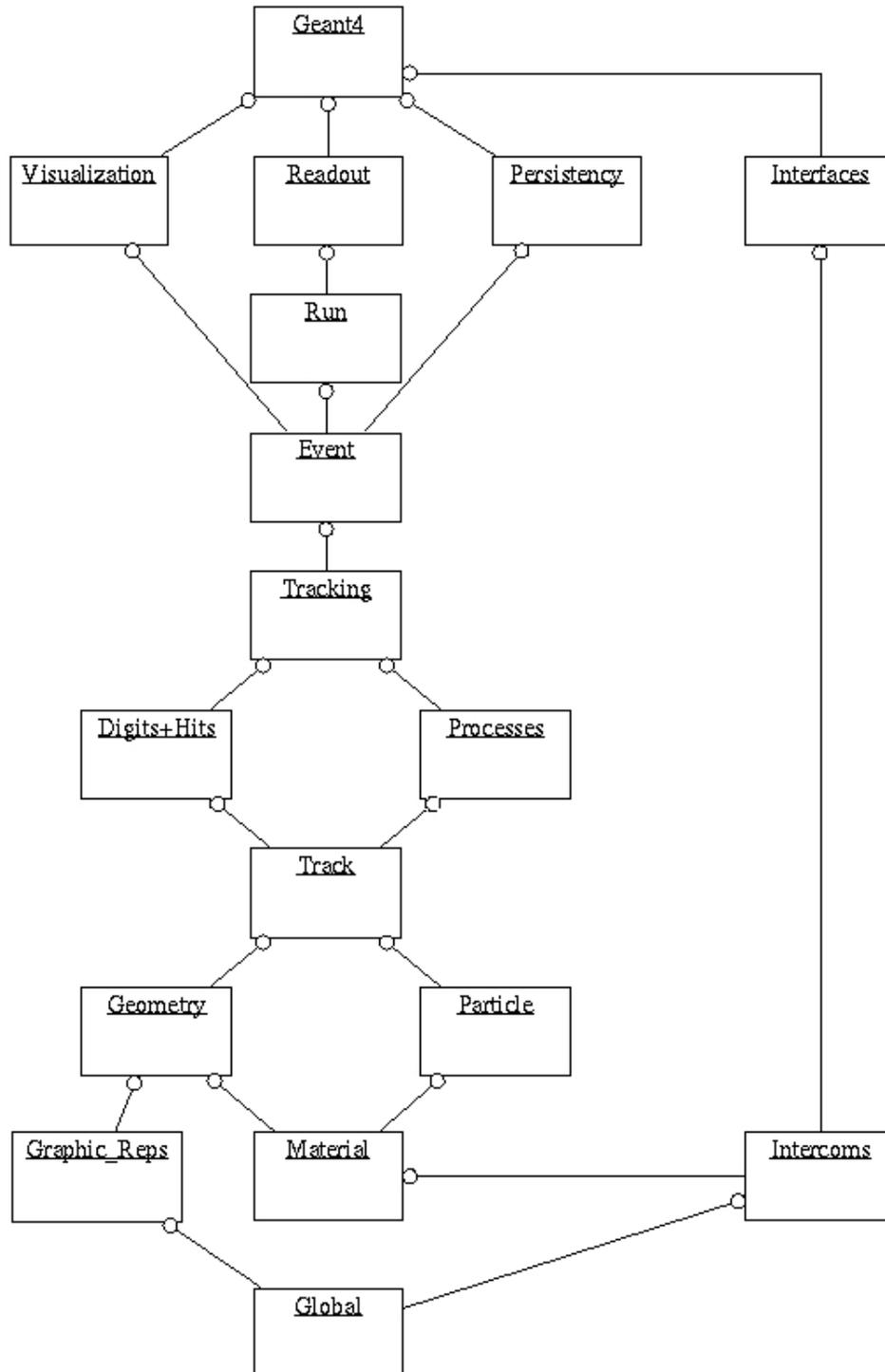


FIGURE 3.1 – Les 17 Catégorie de classes de Geant4

3.1.1 Utilisation de Geant4

Dans une simulation typique dans Geant4, l'utilisateur a besoin au minimum de trois fichiers contenant trois types d'informations fournis par lui-même :

- **Le premier fichier** contient les informations sur la géométrie de la modélisation et les matériaux utilisés, à titre d'exemple pour définir l'air (composé de 30% O_2 et 70% N_2) on écrit :

```
G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", 7, 14.01*g/mole);
G4Element* O = new G4Element("Oxygen", "O", 8, 16.00*g/mole);
G4Material* Air = new G4Material("Air", 1.29*mg/cm3, 2);
Air->AddElement(N, 70*perCent);
Air->AddElement(O, 30*perCent);
```

Notons ici que Geant4 permet à l'utilisateur de définir plusieurs formes élémentaires (parallélépipédique, sphère, cône, ... etc), et même des formes plus compliquées, à titre d'exemple pour définir un parallélépipédique de dimension $2cm \times 3cm \times 10cm$ on écrit :

```
G4Box* my_box = new G4Box("box1", 1*cm, 1.5*cm, 5*cm);
```

- **Le deuxième fichier** contient les informations sur les particules incidentes (types de ces particules, leurs énergies primaires, leurs charges, la direction du faisceau, le nombre des particules émises). Par exemple, pour définir une source de neutrons qui contient 100 particules, avec une énergie primaire de 14 MeV et qui voyage dans la direction de l'axe des z , on écrit :

```
G4int n_particle = 1;
ParticleGun = new G4ParticleGun(n_particle);
G4ParticleDefinition* particle= G4ParticleTable::
GetParticleTable()->FindParticle("neutron");
ParticleGun->SetParticleDefinition(particle) ;
ParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(0.,0.,1.));
```

```
ParticleGun->SetParticleEnergy(14*MeV);  
ParticleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(0.*cm,0.*cm,-11.*cm));
```

- **Le troisième fichier** contient les informations sur toutes les particules utilisées dans la simulation, incluant les particules secondaires qui peuvent être générées par les interactions des particules primaires. Il contient aussi, tous les processus physiques attribués à chaque particule dans la simulation.

L'utilisateur peut ajouter d'autres fichiers optionnelles, s'il veut récupérer des informations durant la simulation. La figure 3.2 [5] montre la structure générale d'une simulations par Geant4 où les fichiers encadré en rouge sont obligatoires et celles en vert sont optionnelles.

Pour l'analyse des données issus d'une simulation sous Geant4, il existe plusieurs logiciel qui peuvent faire cette tache, généralement nous utilisons le logiciel ROOT[10] pour l'analyse des données. Ce dernier un logiciel libre traitement des données écrit en C++. Il est développé au CERN dans les années 90 par les physiciens des particules élémentaires et astroparticules, mais son utilisation a été élargi pour d'autre domaine en physique.

ROOT est composé de différentes classes, qui couvrent des champs aussi variés que la création des histogrammes et des graphiques en 1,2 et 3 dimensions, la représentation des fonction, la manipulation d'image, les calculs statistiques, les flux entrées/sorties, le stockage, ... ect

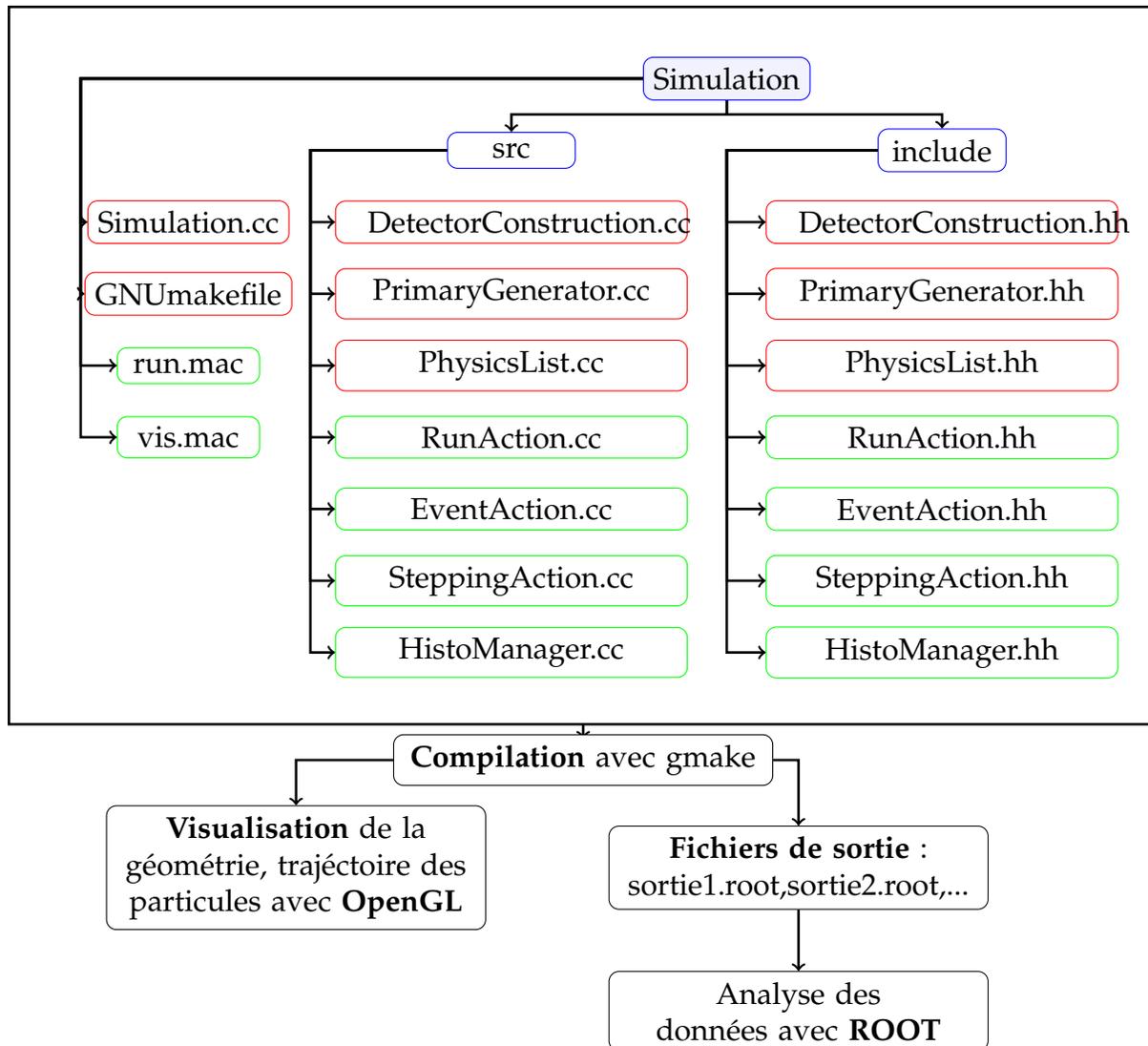


FIGURE 3.2 – Structure générale d’une simulation dans Geant4

3.1.2 Processus et modèles physiques dans Geant4

Les processus physiques décrivent comment les particules interagissent avec un matériau. Une grande variété de ceux-ci peut être simulée avec Geant4. Ils sont regroupés en sept catégories : *electromagnetic*, *hadronic*, *decay*, *optical*, *photon-hadron*, *parameterization* et *transportation*. Un modèle dans Geant4 est un groupe de classes C++ dont les méthodes implémentent les détails d’un processus physique. Un ou plusieurs modèles peuvent être associés à un

processus.

3.1.2.1 Modèles électromagnétiques

- *Modèles Standard* : Les modèles Standard de Geant4 décrivent les interactions électromagnétiques des particules chargées, des photons γ et optiques. Ces modèles sont valables dans une gamme d'énergie de 1 keV à 10 PeV [11].
- *Modèles Low Energy* : Ces modèles sont conçus pour décrire des processus physiques électromagnétiques pour les photons, les électrons, les hadrons et les ions ont été mises en œuvre dans Geant4 afin de prolonger la gamme de validité des interactions des particules à des énergies plus basses que celles disponibles dans les modèles Standard de Geant4[12]

3.1.2.2 Modèles hadroniques

Ces modèles décrivent les processus hadroniques pures valables de 0 MeV jusqu'au 100 PeV. Les interactions hadroniques sont distinguées par les énergies des hadrons incidents, où il faut différencier entre deux domaines :

- Domaine des interactions à basse énergie (pour des énergies jusqu'à quelques GeV) qui sont traités par les modèles : cascades binaires (binary cascade), cascade intra-nucléaire de Bertini (Bertini Cascade) [13, 14].
- Domaine des des interaction à haute énergie (quelques GeV à centaines TeV) qui sont traités par les modèles : QGS (Quark Gluon String), Fritiof, LHEP).

La figure 3.3 [15] illustre un bref inventaire des modèles hadroniques

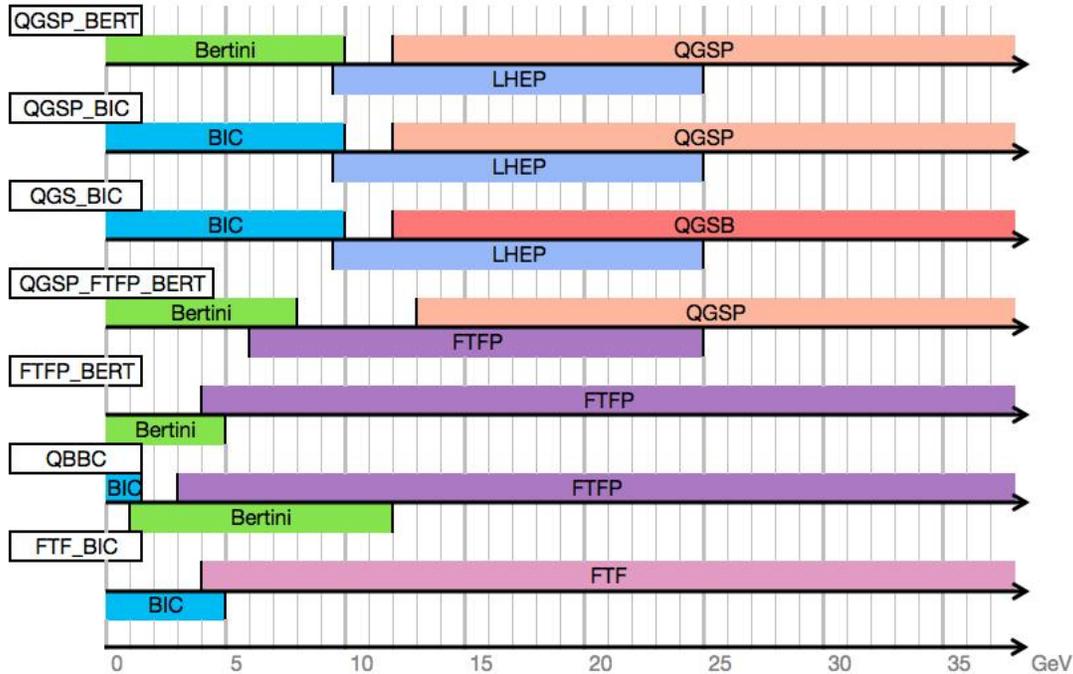


FIGURE 3.3 – Domaine d'application des modèles composant quelques physics lists de Geant4, pour les interactions d'un hadron avec la matière en fonction de son énergie incidente

3.2 Modélisation de l'atmosphère terrestre

3.2.1 Caractéristiques de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre est une enveloppe gazeuse qui entoure notre Terre. Dans ce travail, la Terre est représentée par une sphère de rayon 6371 km entourée par 37 couches atmosphériques [16]. Chaque couche est caractérisée par une température T , une pression P et une masse volumique ρ , les valeurs de ces grandeurs ont été calculées selon *US standard atmospheric model* [17].

Les valeurs de la température ($^{\circ}\text{C}$), pression ($k - \text{Pascal}$) et la densité volumique ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) dans ce modèle sont données par les formules suivantes :

- $h < 11000 \text{ m}$

$$T = 15.04 - 0.00649.h \quad (3.1)$$

$$P = 101.29 \times \left(\frac{T + 273.1}{288.08} \right)^{5.256} \quad (3.2)$$

$$\rho = \frac{P}{0.2869 \times (T + 273.1)} \quad (3.3)$$

- 11000 m < h < 25000 m

$$T = -56.46 \quad (3.4)$$

$$P = 22.65 \times e^{1.73 - 0.000157.h} \quad (3.5)$$

$$\rho = \frac{P}{0.2869 \times (T + 273.1)} \quad (3.6)$$

- >25000 m

$$T = -131.21 + 0.00299.h \quad (3.7)$$

$$P = 24.88 \times \left(\frac{T + 273.1}{216.6} \right)^{-11.388} \quad (3.8)$$

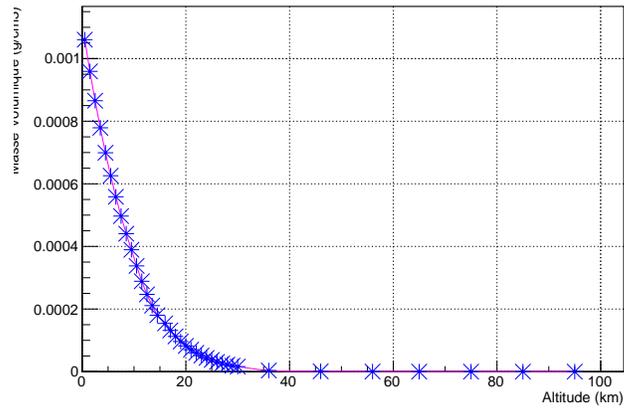
$$\rho = \frac{P}{0.2869 \times (T + 273.1)} \quad (3.9)$$

En utilisant les équations décrites au-dessus, nous donnons le tableau suivant qui contient les différentes valeurs de : altitude, température, pression et densité. La figure 3.4 illustre les variations de la densité, température et pression en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer. La terre est caractérisée par son champ magnétique, ce dernier n'est pas uniforme sur tout le globe terrestre. Sa valeur varie dans l'intervalle $[30\mu T, 60 \mu T]$ [18].

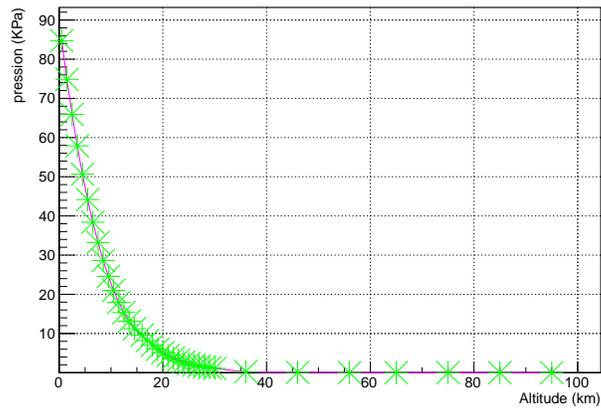
3.2 Modélisation de l'atmosphère terrestre

couche	$h(\text{km})$	$T (^{\circ}\text{C})$	$T(\text{K})$	$P(\text{kPa})$	$P(\text{atm})$	$\rho \text{ Kg}/\text{m}^3$	$\rho \text{ g}/\text{cm}^3$
1	0-1	5,305	278,455000	84,722390126	0.836145	1.060504	0,001060504
2	1-2	-1,185	271.965000	74,845533334	0.738668	0.959229	0,000959229
3	2-3	-7,675	265.475000	65,922550007	0.650605	0.865525	0,000865525
4	3-4	-14,165	258.985000	57,881094284	0.571242	0.778990	0,000778990
5	4-5	-20,655	252.495000	50,653176905	0.499908	0.699235	0,000699235
6	5-6	-27,145	246.005000	44,174051258	0.435964	0.625882	0,000625882
7	6-7	-33,635	239.515000	38,382922344	0.378810	0.558567	0,000558567
8	7-8	-40,125	233.025000	33,222541541	0.327881	0.496936	0.000496936
9	8-9	-46,615	226.535000	28,638902624	0.282644	0.440647	0,000440647
10	9-10	-53,105	220.045000	24,581343095	0.242599	0.389371	0,000389371
11	10-11	-56,46	216.690000	21,002848154	0.207282	0.337839	0,000337839
12	11-12	-56,46	216.690000	17,951243201	0.177165	0.288752	0,000288752
13	12-13	-56,46	216.690000	15,343036438	0.151424	0.246798	0,000246798
14	13-14	-56,46	216.690000	13,113683841	0.129422	0.210939	0,000210939
15	14-15	-56,46	216.690000	11,208368586	0.110618	0.180290	0,000180290
16	15-16	-56,46	216.690000	9,579873224	0.094546	0.154095	0,000154095
17	16-17	-56,46	216.690000	8,187870407	0.080808	0.131706	0.000131706
18	17-18	-56,46	216.690000	6,99821361	0.069067	0.112569	0,000112569
19	18-19	-56,46	216.690000	5,981417259	0,059032	0.096213	0.000096213
20	19-20	-56,46	216.690000	5,112352754	0.050455	0.082234	0.000082234
21	20-21	-56,46	216.690000	4,369539197	0.043124	0.070286	0,000070286
22	21-22	-56,46	216.690000	3,734636762	0.036858	0.060074	0.000060074
23	22-23	-56,46	216.690000	3,1920414	0.031503	0.051345	0.000051345
24	23-24	-56,46	216.690000	2,728276886	0,026926	0.043885	0.000043885
25	24-25	-56,46	216.690000	2,331893495	0.023014	0.037509	0.000037509
26	25-26	51,975	221.175000	1,960942679	0.019353	0.030904	0.000030904
27	26-27	48,985	224.165000	1,682906885	0.016609	0.026168	0.000026168
28	27-28	45,995	227.155000	1,447224941	0.014283	0.022206	0.000022206
29	28-29	43,005	230.145000	1,247006746	0.012307	0.018885	0.000018885
30	29-30	40,015	233.135000	1,076476775	0.010624	0.016094	0.000016094
31	30-40	10,115	263.035000	0,272361594	0.002688	0.003610	0.000003610
32	40-50	19,785	292.935000	0,079945423	0.000789	0.000951	0.000000951
33	50-60	49,685	322.835000	0,026445824	0.000261	0.000258	0.000000258
34	60-70	79,585	352.735000	0,009625875	0.000095	0.000095	0.000000095
35	70-80	109,485	382.635000	0,00385035	0.000038	0.000035	0.000000035
36	80-90	139,385	412.535000	0,0016212	0.000016	0.000016	0.000000016
37	90-100	169,285	442.435000	0,000709275	0.000007	0.000006	0.000000006

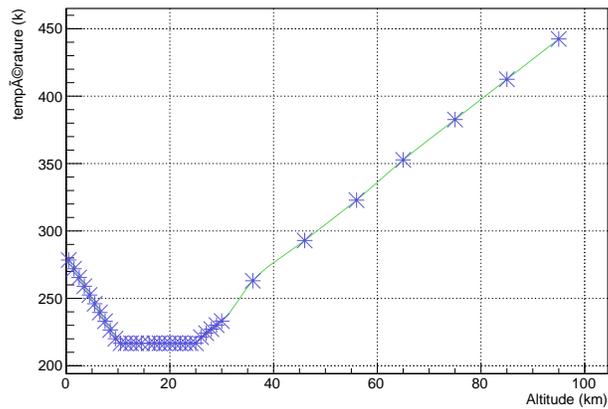
TABLE 3.1 – Propriétés des couches atmosphériques



(a) Densité



(b) Pression



(c) Température

FIGURE 3.4 – Les variations de la densité, température et pression en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer

3.2 Modélisation de l'atmosphère terrestre

La composition chimique de l'atmosphère comprend pour l'essentiel l'azote, l'oxygène et des gaz rares (Argon, Néon, Hélium...) et dans les basses couches, on trouve la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone[19]. Le tableau ci-dessous représente la composition chimique de notre atmosphère en

Gaz constituants	Volumes en pourcentage	Masses molaires (g/mol)
Azote N_2	78.084	28.016
Oxygène O_2	20.946	32.000
Argon Ar	0.9340	39.944
Dioxyde de carbone (CO_2)	0.041332	44.010
Néon (Ne)	0.001818	20.183
Hélium (He)	0.000524	4.003
Krypton (Kr)	0.000114	83.07
Méthane (CH_4)	0.000187	16.04

TABLE 3.2 – Composition chimique de l'atmosphère terrestre

À l'aide du codes Geant4 et les propriétés de l'atmosphère décrites au-dessus, nous avons représenté notre Terre entourée par quelques couches atmosphérique. .

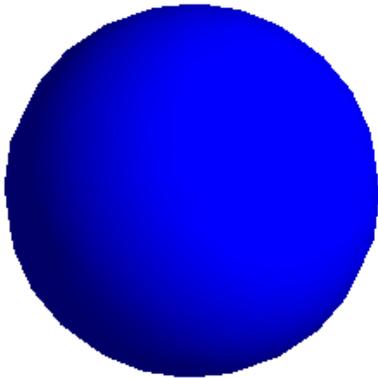


FIGURE 3.5 – Représentation de la Terre par Geant4

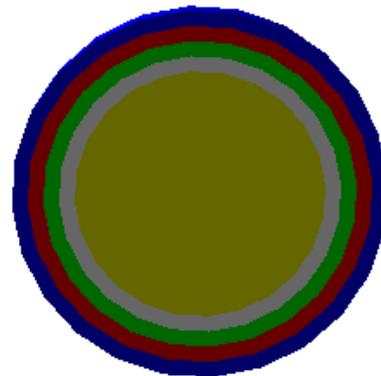


FIGURE 3.6 – Illustration de quelques couches atmosphériques par Geant4

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps une étude numérique via le code Monte-Carlo **Geant4** de la propagation des rayons cosmiques (particulièrement les protons) dans l'atmosphère terrestre. Dans un second temps, nous nous intéressons à l'effet des neutrons atmosphériques sur les semi-conducteurs (Silicium, Germanium, arséniure de gallium) dans la zone avionique (située à une altitude moyenne qui s'étale de 10 à 15 km par rapport à la surface de la mer). La troisième partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude de l'effet de ces neutrons sur le corps humain.

4.1 Interaction des protons cosmiques primaires avec l'atmosphère

4.1.1 Énergie déposée

En se basant sur la géométrie et les caractéristiques de l'atmosphère de la terre décrits dans le troisième chapitre, nous nous intéressons dans cette partie au calcul de l'énergie déposée dans l'atmosphère terrestre par les protons cosmiques primaires incidents, pour cela nous avons utilisé le code Geant4 version 4.10.00 pour bombarder l'atmosphère terrestre par 10^6 protons dont l'énergie varie de 1 GeV jusqu'à 3 GeV avec un pas de 1 GeV.

4.1 Interaction des protons cosmiques primaires avec l'atmosphère

Les protons sont des hadrons, pour cela nous avons inclus dans *PhysicList* la classe `QGSP_BERT_HP`[20], cette classe :

- Utilise le modèle de *Bertini* pour décrire les interactions des hadrons dont l'énergie est au-dessous de 10 GeV.
- Contient les processus électromagnétiques standards.
- Utilisée pour décrire les interactions des neutrons dont l'énergie est au-dessous de 20 MeV

La figure 4.1 illustre l'énergie déposée le long de la trajectoire des protons primaires incidents. Ces derniers sont des particules chargées directement ionisantes déposent leur énergie soit par des interactions avec les électrons des atomes atmosphériques, provoquant l'ionisation et l'excitation de ces atomes, soit ils cèdent de l'énergie aux noyaux atomiques à travers des diffusions élastiques et inélastiques, les protons peuvent aussi perdre de l'énergie sous forme d'un rayonnement de freinage en entrant dans le champ électrique du noyau cible.

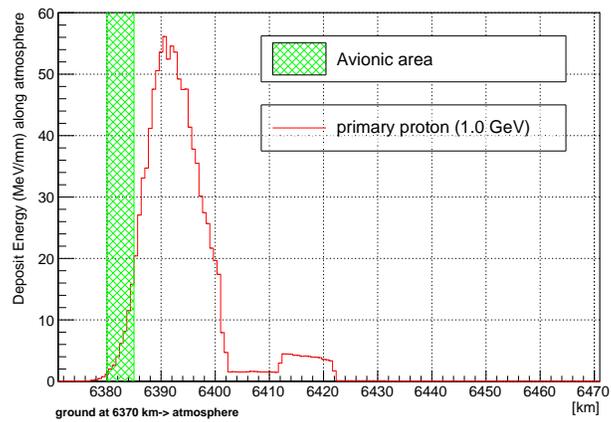
Nos résultats montrent que les protons déposent presque la totalité de leurs énergies initiales dans des régions bien spécifiques (en particulier vers la fin de leurs parcours) dans l'atmosphère, ces régions là sont connues sous le nom de pic de Bragg.

Le tableau 4.1 présente l'altitude par rapport au niveau de la mer dont laquelle les protons incidents ont perdu la totalité de leur énergie, ainsi l'énergie déposée dans cette altitude. Nous constatons aussi que les protons de 3 GeV déposent leur énergie dans la zone avionique.

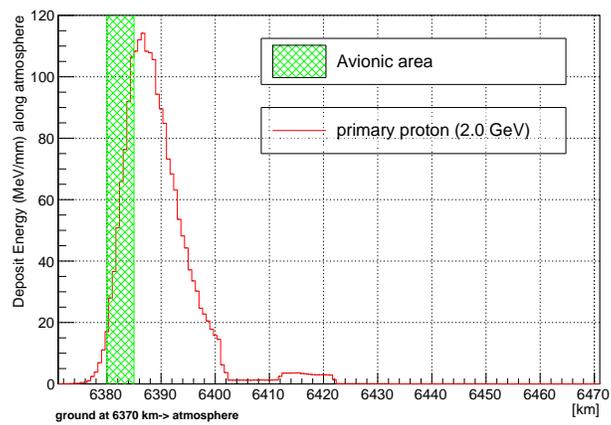
Énergie des protons primaires (GeV)	Altitude (km)	Edep (MeV/mm)
1	21	59
2	17	114
3	14	175

TABLE 4.1 – L'altitude du pic de Bragg par rapport au niveau de la mer

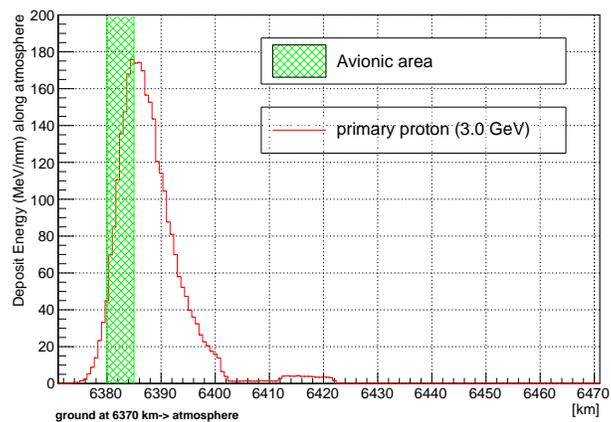
4.1 Interaction des protons cosmiques primaires avec l'atmosphère



(a) 1 GeV



(b) 2 GeV



(c) 3 GeV

FIGURE 4.1 – Profil du dépôt d'énergie en fonction de l'altitude des protons primaires dans l'atmosphère

4.1.2 Les neutrons secondaires (neutrons atmosphériques)

Nous avons vu précédemment que dès la pénétration d'une particule énergétique dans l'atmosphère terrestre elle entre en collision avec les molécules et les atomes de ce dernier, et produit une gerbe de particules dite secondaires permet aux neutrons.

Nous nous intéressons ici par les neutrons secondaires issus par les protons primaires d'énergie 3 GeV, car ces protons déposent leurs énergie dans la zone avionique, ce dépôt se traduit par la création de particules secondaires dans cette région. La figure 4.2 représente le spectre énergétique des neutrons atmosphériques.

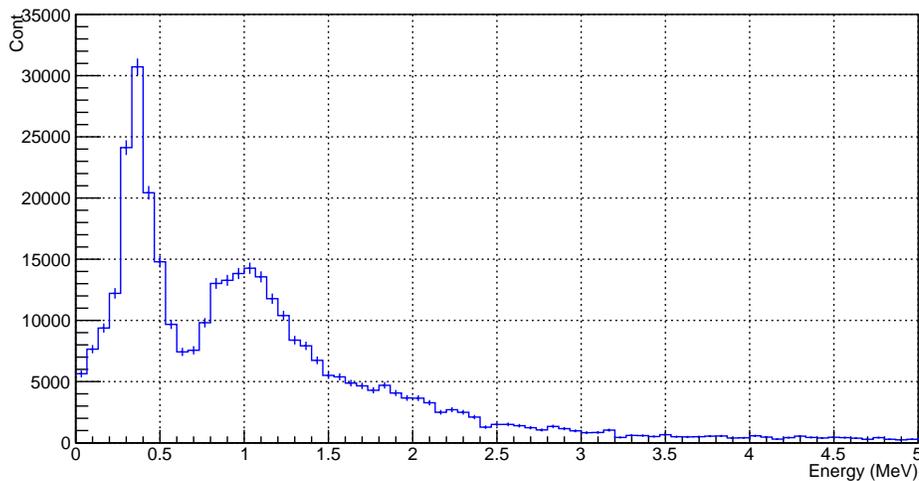


FIGURE 4.2 – Spectre énergétique des neutrons secondaires issus de l'interaction des protons primaires dans l'atmosphère

Nos résultats montrent l'existence de deux pics, un autour de 0.4 MeV et un autre autour de 1 MeV. Nos résultats sont en accord avec les travaux d'autres chercheurs qui ont trouvé deux pics le premier autour de 1 MeV et le second autour de 100 MeV (le flux des neutrons de 1 MeV est plus important que celui du pic de 100 MeV), signalons ici que dans ces travaux expérimentaux (voir figure 4.3) les auteurs ont mesuré le flux des

neutrons secondaires résultant de l'interaction des rayons cosmiques primaires par des détecteurs de neutrons capable de détecter des neutrons dont leurs énergies situent dans l'intervalle $[10^{-10}\text{MeV}, 100\text{ GeV}]$ [21].

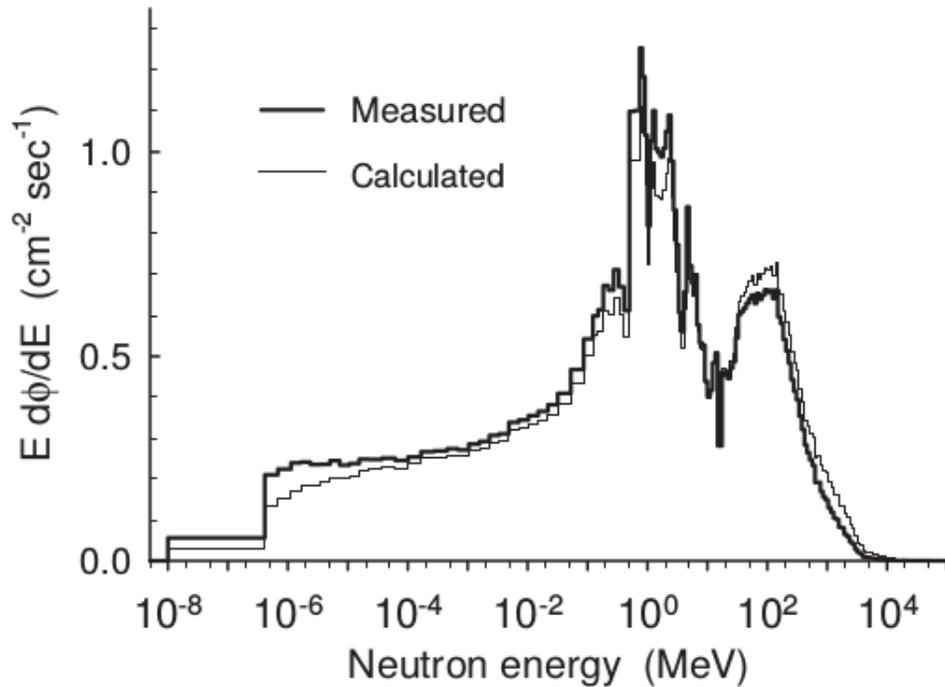


FIGURE 4.3 – Spectre des neutrons atmosphérique (mesuré expérimentalement)[21]

4.1.3 Les protons secondaires

Sur la figure 4.4 nous présentons le spectre énergétique des protons secondaires issus de l'interaction des protons primaires d'énergie 3 GeV avec l'atmosphère. L'énergie moyenne de ces protons est autour de 222 MeV. Nous signalons ici que la plupart des recherches scientifiques focalisent sur les neutrons secondaires à cause du danger qu'ils représentent sur les composants électroniques, par contre il y a peu de recherches qui s'intéressent aux protons secondaires. Parmi ces travaux nous citons le travail de Papin et ses collaborateurs [22] qui ont montré que la plupart de ces protons ont une énergie inférieure à 1 GeV et sont produits par les processus suivants :

- Évaporation des noyaux cibles

- Processus de recul
- Les interactions inélastiques
- Processus de spallation nucléaire.

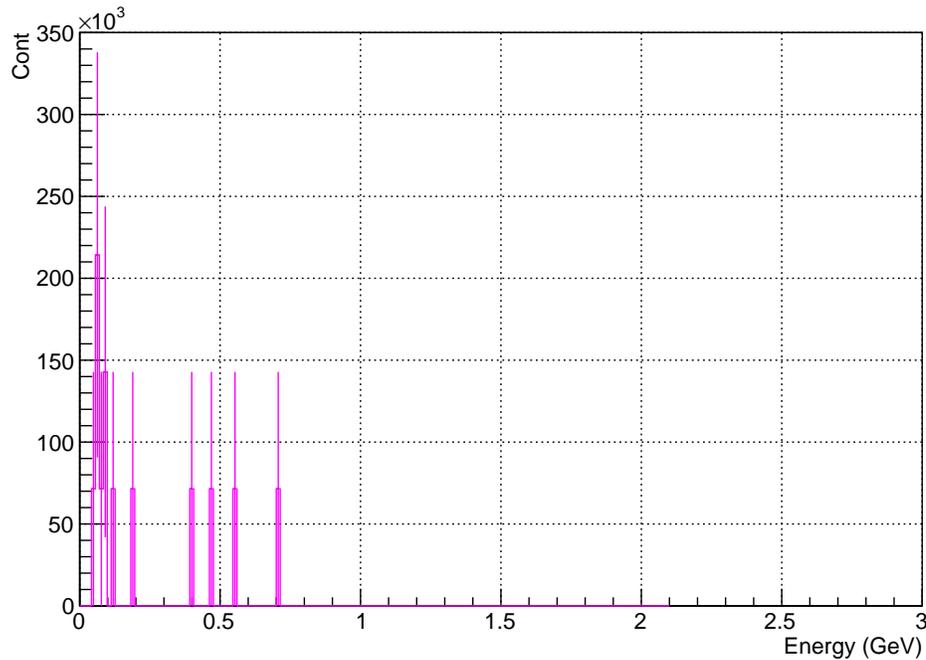


FIGURE 4.4 – Spectre énergétique des protons secondaires

4.1.4 Les rayons X (γ)

Le spectre des rayons X (γ) produits par les protons primaires d'énergie 3 GeV est représenté sur la figure 4.5, cette dernière montre l'existence deux pics, le premier autour de 50 keV, cette énergie peut perturber le fonctionnement des circuits électroniques avioniques [23], le second pic autour de 511 keV, c'est à dire que ces photons sont produits par l'annihilation électron-positron. Nos résultats sont en accord avec celles trouvées par Sazonov et al [24].

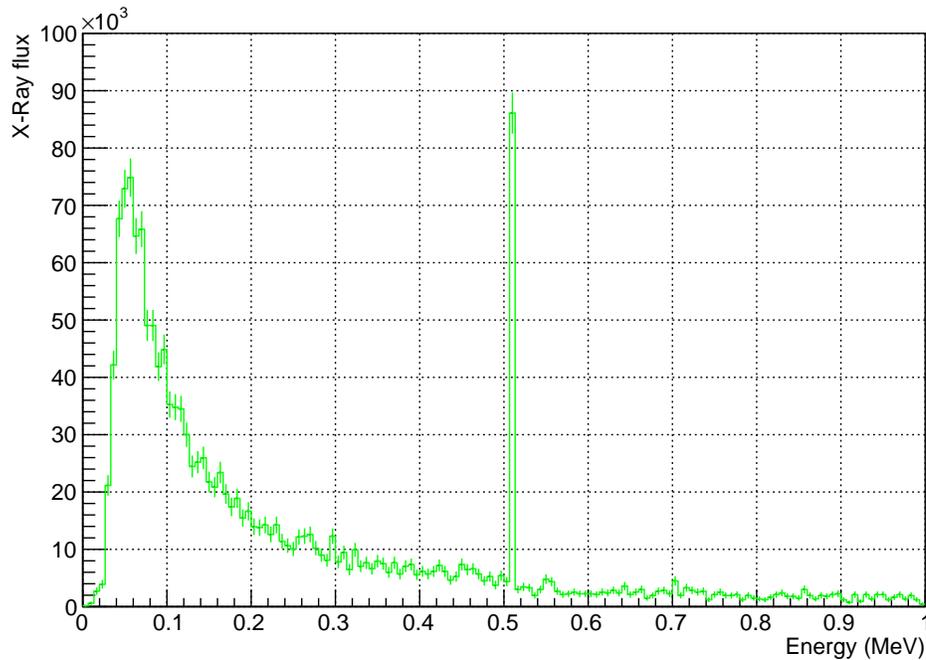


FIGURE 4.5 – Spectre énergétique des rayons X (γ)

4.2 Interaction des particules secondaires avec les composants électroniques

Dans cette partie nous allons discuter l'effet de l'interaction des rayons cosmiques secondaires particulièrement les neutrons avec les semi-conducteurs (Silicium, Germanium, Arsenic de gallium).

4.2.1 Interaction neutrons atmosphériques - semi-conducteurs

4.2.1.1 Géométrie et particules primaires

Afin d'étudier l'effet des neutrons sur les semi-conducteurs, nous bombardons chaque cible semi-conducteur (Silicium, Germanium, Arsenic de gallium) perpendiculairement à sa surface (1 cm^2), par un faisceau de neutrons composé de 10^8 particules. L'épaisseur de chaque cible est inférieure ou égale à $20 \text{ }\mu\text{m}$. En tenant compte de la figure 4.3, les énergies primaires de faisceau considérées dans notre étude sont 0.4 MeV et 1 MeV. Sur la fi-

figure 4.6 nous illustre une visualisation par Geant4 de l'interaction neutrons-Silicium et neutrons-Germanium, dans cette figure chaque couleur représente un type de particule à titre d'exemple le rouge représente les neutrons, le vert les rayons X ou bien γ .

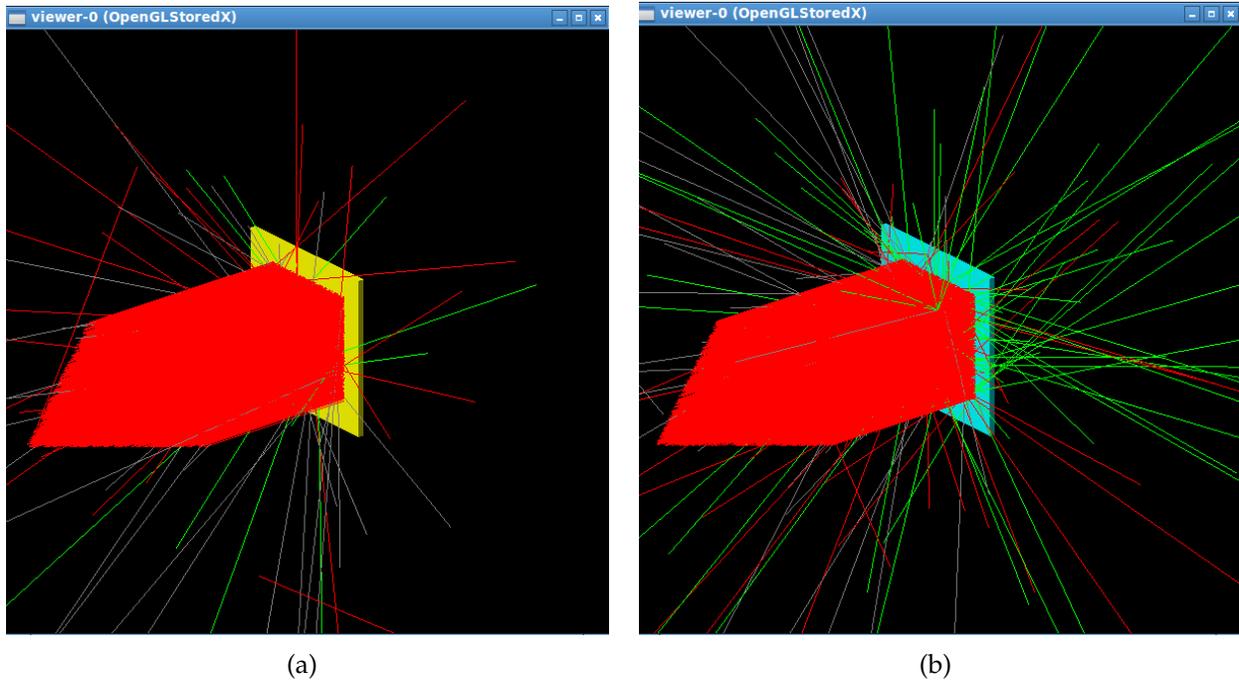


FIGURE 4.6 – Visualisation par Geant4 de l'interaction d'un faisceau composé de 1000 neutrons (1 MeV) avec : (a) Silicium, (b) Germanium

4.2.1.2 Modèle physique

Le suivi des neutrons (dont l'énergie est inférieure de 20 MeV) par Geant4 est géré par la bibliothèque **G4NDL** (*Geant4 Neutron Data Library*). Cette base de données est une combinaison de **ENDF/B-VI**[25] et **JENDL** (*Japanese Evaluated Nuclear Data Library*)[26][25]. Elle contient les sections efficaces, distributions angulaires, la nature de la particule secondaire produite Cette base gère les réactions suivantes :

- Diffusion élastique
- Diffusions inélastiques
- Capture radiative
- Fission

Dans notre étude nous avons inclus dans *PhysicsList* la classe **QGSP_BIC_HP** (*Quark Gluon String Physics list using Binary Cascade models and High Precision data*) qui utilise la base de données **G4NDL** et le modèle de cascade binaire pour traiter les interaction des neutrons (<20 MeV) avec la matière.

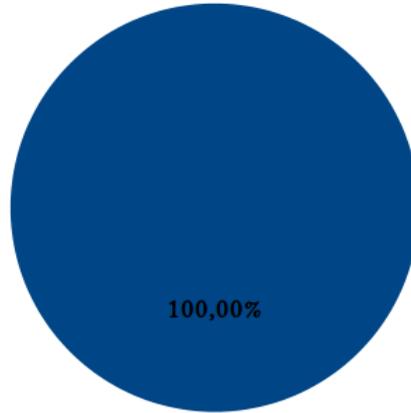
4.2.1.3 Résultats et discussions

Sur les figures 4.7,4.8,4.9 et 4.10 nous présentons la fraction de chaque événement produit lors de l'interaction neutron-semi-conducteur et cela pour deux énergies 0.4 MeV et 1 MeV et pour deux valeurs d'épaisseur 10 μm et 20 μm . Les résultats obtenus montrent :

- La diffusion élastique est le processus dominant pour le silicium et cela quelque soit l'énergie primaire du neutron ou la dimension du semi-conducteur.
- La fraction de la diffusion inélastique croit d'une manière considérable avec l'énergie incidente pour le germanium et l'arsenic de gallium et aussi plus le numéro atomique Z est élevé plus que la probabilité d'interaction nucléaire des neutrons avec les éléments est encore est élevée . Cela signifie que la susceptibilité des semi-conducteurs est d'autant plus grand que leur numéro atomique est élevé.
- L'épaisseur de la cible n'influe pas sur les fraction des processus physiques.

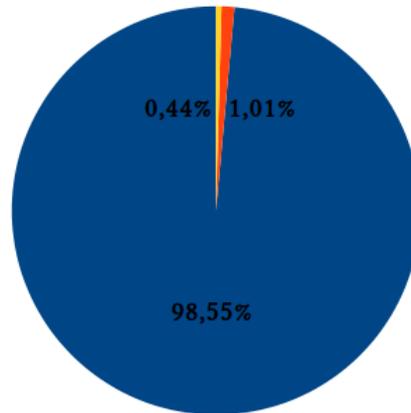
Nos résultats du point de vu qualitative sont on bon accord avec celles trouvées dans [27].

Les figures 4.11 et 4.12 illustrent le spectre énergétique des atomes reculés (les atomes reculés sont atomes cibles qui sont quittés leurs positions initiales, ces derniers peuvent ioniser ou exciter le cortège électronique d'autres atomes de semiconducteur et induire des collisions élastique et inélastique avec les autres atomes du semiconducteur). Nous remarquons que l'énergie de la plupart de ces atomes reculés est autour de 20 keV quelque soit la dimension du semi-conducteur cible, nos résultats est en bon accord avec celles trouvées par Yang Liu et al[28] particulièrement pour la cible de silicium.



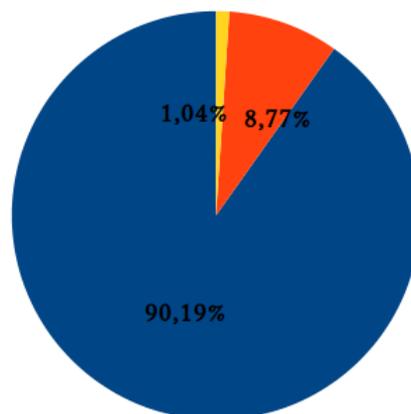
■ Élastiques ■ ■

(a) Silicium



■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

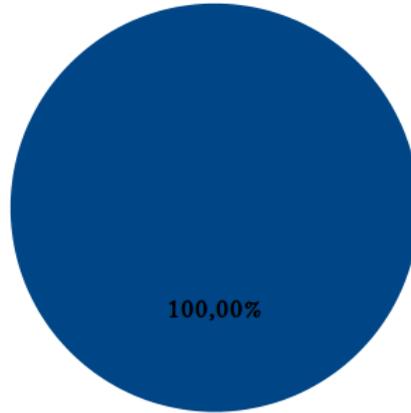
(b) Germanium



■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

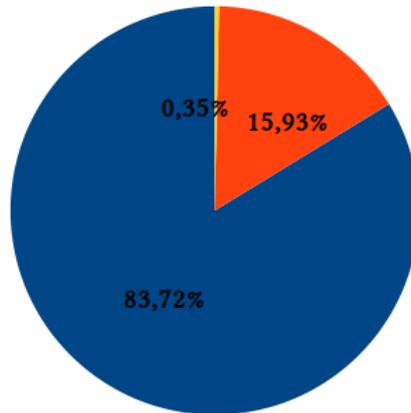
(c) Arsenic de gallium

FIGURE 4.7 – Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur $20 \mu m$) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 0.4 MeV.



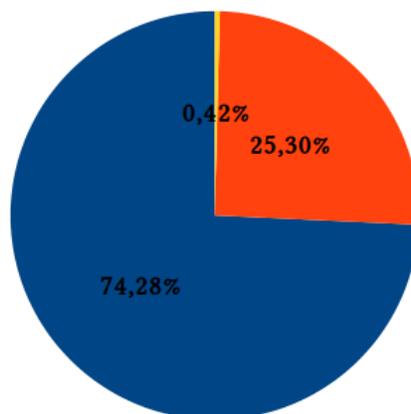
■ Élastiques ■ ■

(a) Silicium



■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

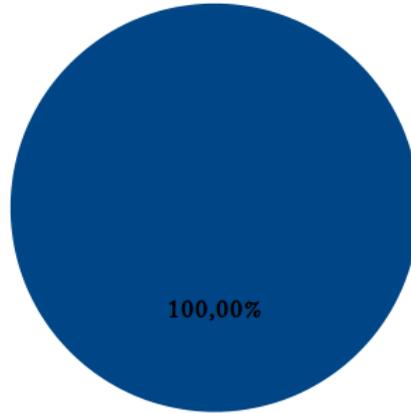
(b) Germanium



■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

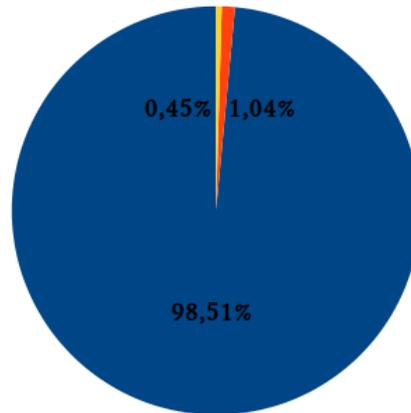
(c) Arsenic de gallium

FIGURE 4.8 – Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur $20 \mu m$) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 1 MeV



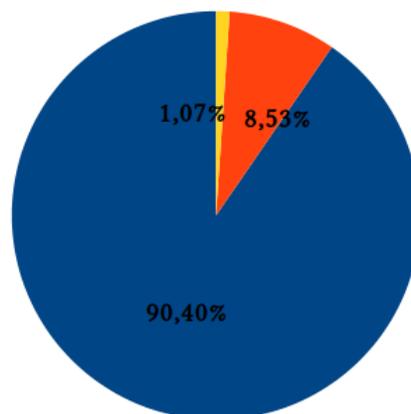
■ Élastiques ■ ■

(a) Silicium



■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

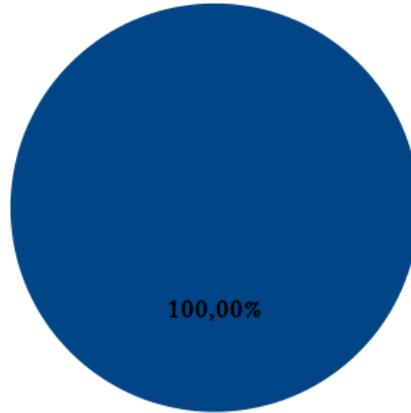
(b) Germanium



■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

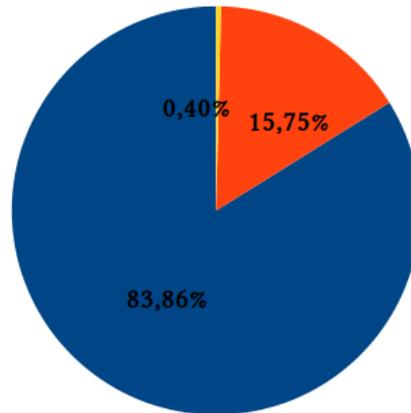
(c) Arsenic de gallium

FIGURE 4.9 – Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur $10 \mu m$) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 0.4 MeV.



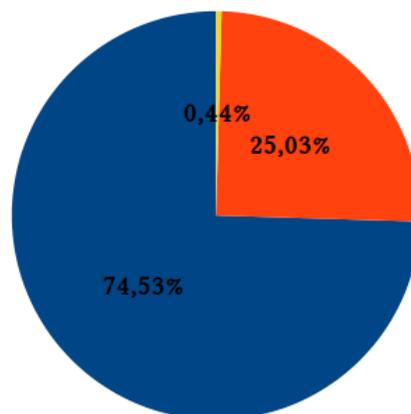
■ Élastiques ■ ■

(a) Silicium



■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

(b) Germanium

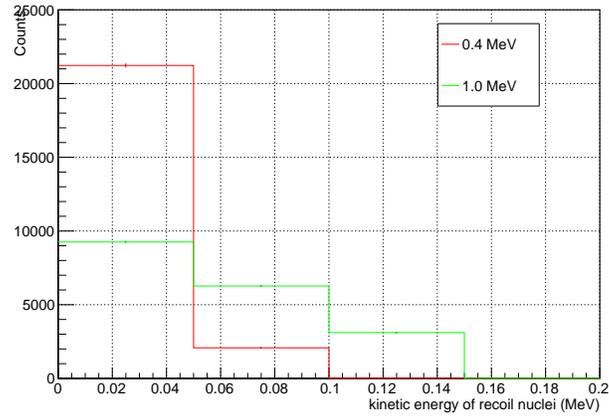


■ Élastiques ■ Inélastiques ■ Capture radioactive

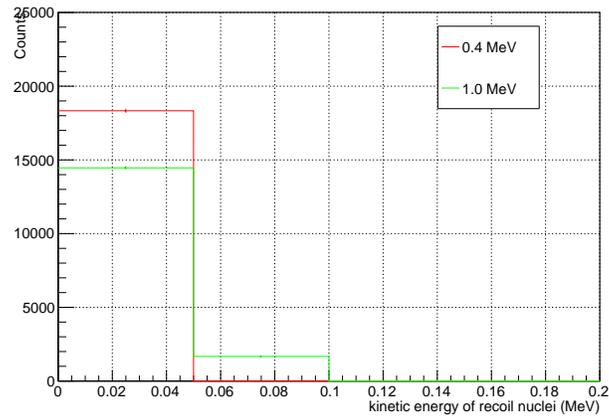
(c) Arsenic de gallium

FIGURE 4.10 – Fraction d'événements pour les trois cibles semi-conducteurs (d'épaisseur $10 \mu m$) irradiées par des neutrons atmosphériques d'énergie de 1 MeV

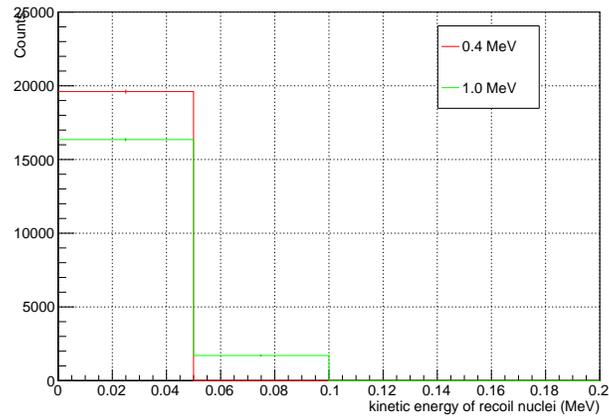
4.2 Interaction des particules secondaires avec les composants électroniques



(a) Silicium



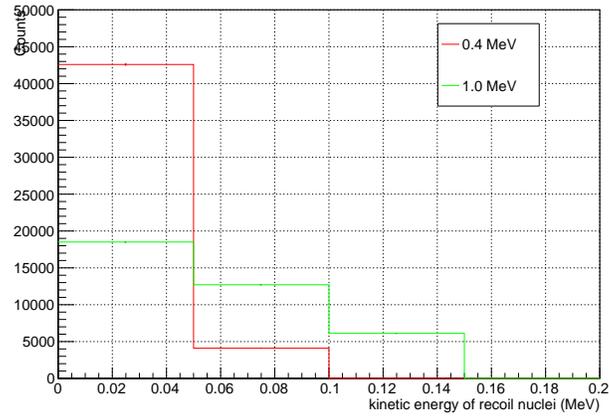
(b) Germanium



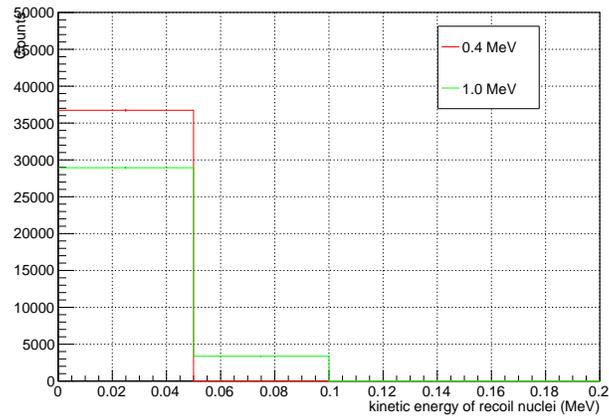
(c) Arsenic de gallium

FIGURE 4.11 – Spectre énergétique des particules de recul générées dans des cibles semi-conducteurs ($10\mu m$) par des neutrons primaires d'énergie 0.4 MeV et 1 MeV

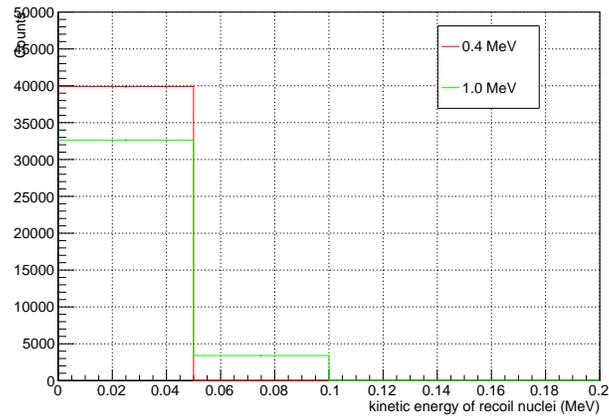
4.2 Interaction des particules secondaires avec les composants électroniques



(a) Silicium



(b) Germanium



(c) Arsenic de gallium

FIGURE 4.12 – Spectre énergétique des particules de recul générées dans des cibles semi-conducteurs ($20\mu m$) par des neutrons primaires d'énergie 0.4 MeV et 1 MeV

4.3 Interaction des neutrons atmosphériques avec le corps humain

Dans cette partie nous nous intéressons au calcul de dose déposée par un faisceau de neutron sur le corps humain.

4.3.1 Modèles géométrique et physique

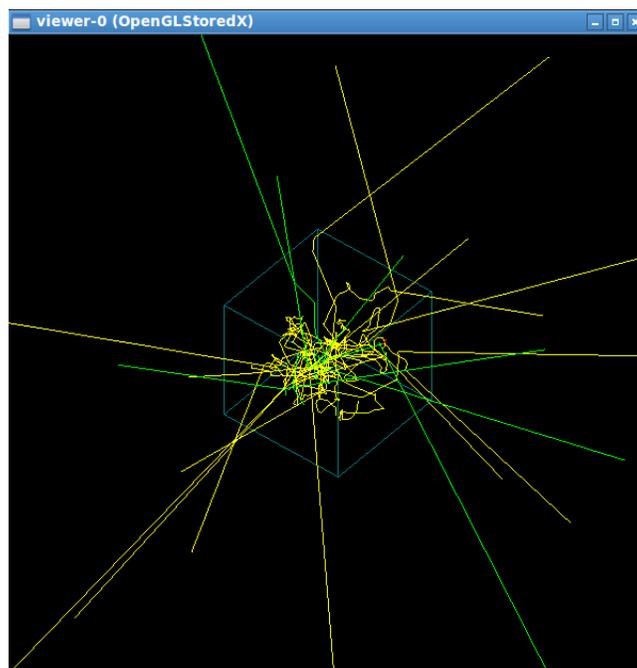
La géométrie du corps humain est très complexe mais dans ce travail nous allons adapté une géométrie très simple basé sur l'idée suivante : l'eau représente 60% à 65% de la masse corporelle d'un adulte. Concrètement, pour une personne qui pèse 70 kg, cela représente 40 kg de son poids, et sachant que la densité de l'eau vaut 1 kg/l d'où nous pouvons représenter le corps humain par une boîte cubique remplis d'eau de taille (20 cm \times 20 cm \times 10 cm).

Les simulations que nous allons réaliser utilisent dans *physicsList* la classe *QGSP_BIC_HP*. Nous avons choisi cette classe car elle traite les interaction neutrons-matière dont les énergies primaires sont inférieurs de 20 MeV.

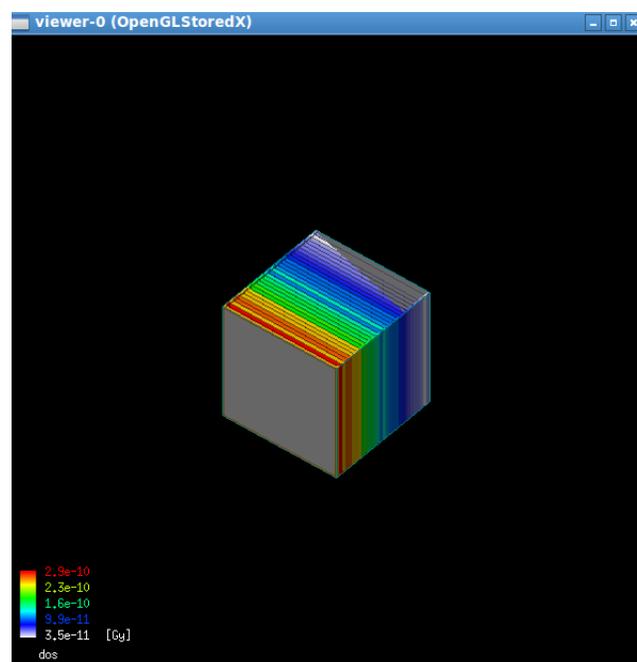
Mais avant d'envisager notre calcul, il est très important de valider notre programme, pour cela nous avons suivi la même démarche cité dans [29]. Dans ce travail les auteurs ont calculé la dose déposée par des neutrons de différents énergies primaires reçu par un fantôme d'eau de dimension (30 cm \times 30 cm \times 30 cm).

La figure 4.13(a) représente un fantôme d'eau de dimension (30 cm \times 30 cm \times 30 cm) irradié par un faisceau de neutrons d'énergie 10 MeV ; la figure 4.13(b) illustre la distribution de dose dans le volume ou nous remarquons que la dose se concentre dans le début de volume.

La figure 4.14 illustre la dose obtenus, cette dernière possède la même allure que celle trouvée dans [29]



(a)



(b)

FIGURE 4.13 – Distribution de la dose dans le fantôme d'eau

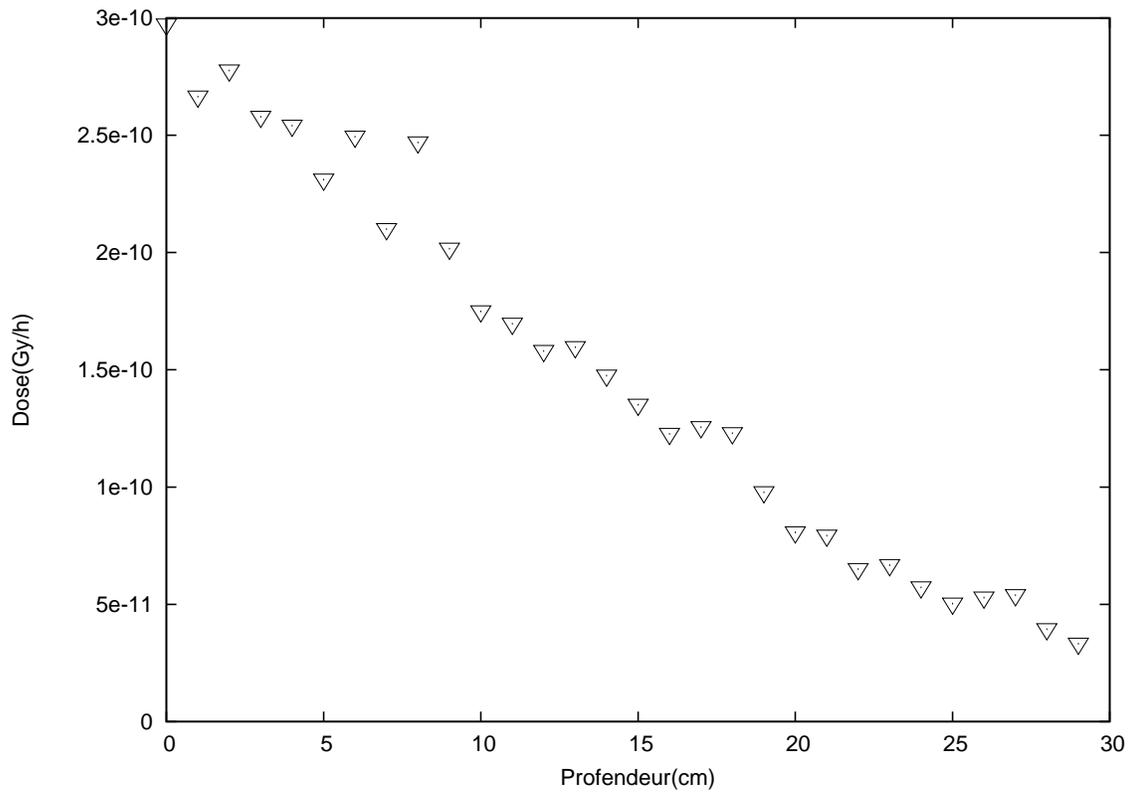
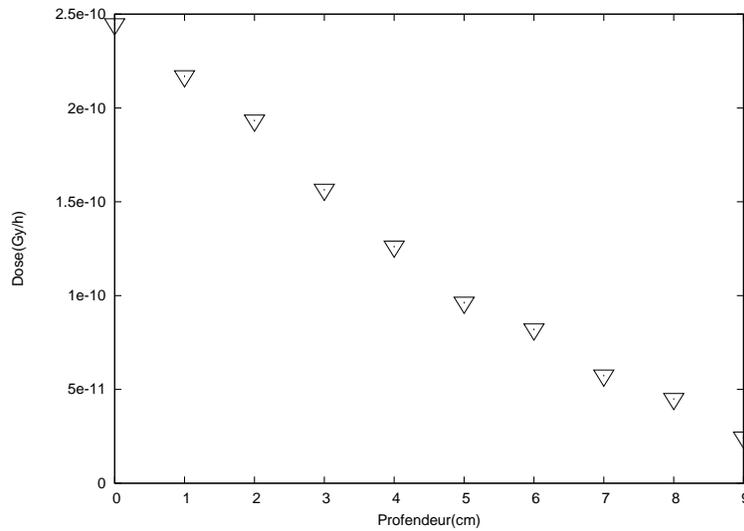
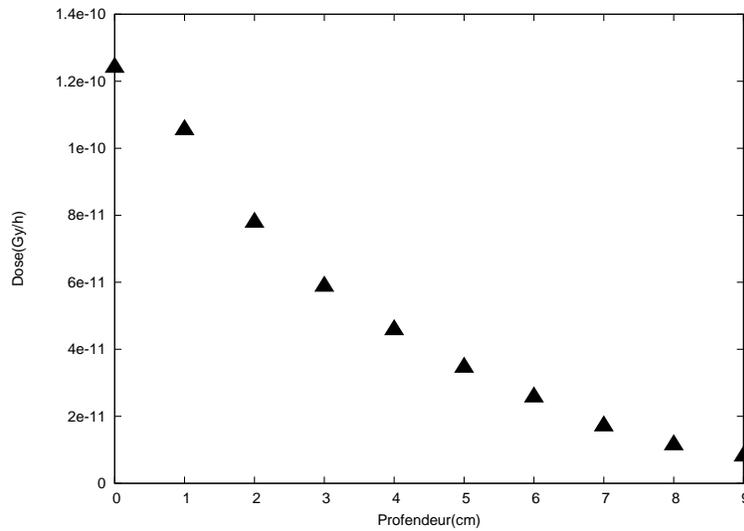


FIGURE 4.14 – Courbe de dose en profondeur (normalisées par le nombre de particules sources) le long de l’axe central dans l’eau pour énergie primaire de neutron 10 MeV

Après avoir validé notre programme, nous traçons sur la figure 4.15 les courbes de dose en profondeur le long de l’axe central (L’axe des z) dans notre fantôme de dimension (20 cm \times 20 cm \times 10 cm) bombardé respectivement par des neutrons d’énergie 0.4 MeV et 1 MeV. Cette courbe montre que la dose issue des neutrons de 1 MeV est supérieure que celle de 0.4 MeV.



(a) 1 MeV



(b) 0.4 MeV

FIGURE 4.15 – Courbes de dose en profondeur (normalisées par le nombre de particules sources) le long de l'axe central dans l'eau pour des énergies primaires de neutrons 1 MeV et 0.4 MeV

4.3 Interaction des neutrons atmosphériques avec le corps humain

Pour quantifier les effets des rayonnements dans les tissus vivant on utilise la dose équivalent donnée par la relation suivante :

$$Dose_{equi} = Dose_{abs} \times W_R \quad (4.1)$$

Où W_R est le facteur de pondération radiologique que la commission internationale de protection radiologique a défini pour chaque type de rayonnement ou particule. Pour les neutrons dont l'énergie est comprise entre 100 keV et 2 MeV, W_R vaut 20. Sur la figure 4.16 nous avons tracé la variation de la dose équivalente en fonction de la profondeur. À partir de ces deux figures nous pouvons calculer la dose équivalente annuelle pour chaque énergie : pour 1 MeV on trouve $1.4 \times 10^{-9} \times 365 \times 24 \times 3600 = 0.044$ mSv, pour 0.4 MeV on trouve $7 \times 10^{-10} \times 365 \times 24 \times 3600 = 0.022$ mSv. Selon ces résultats nous constatons que les neutrons d'énergie 0.4 MeV et 1 MeV ne causent pas des dégâts sur le corps humain car la dose issue de ces neutrons est loin de la seuil qui varie entre 1 mSv à 6 mSv [30]

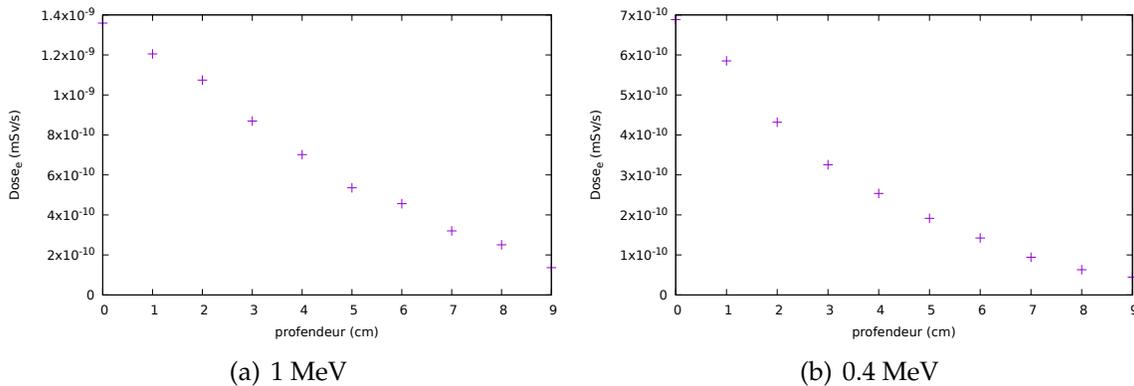


FIGURE 4.16 – Courbes de dose équivalente pour des énergies primaires de neutrons 1 MeV et 0.4 MeV

Conclusion Générale

Ce travail a été consacré à l'étude des effets des rayonnements cosmiques secondaires particulièrement les neutrons sur les semi-conducteurs (Silicium, Germanium, Arsenic de gallium) et le personnel navigant dans l'environnement avionique. Pour cela nous avons utilisé le code de simulation Monte-Carlo **Geant4**. Rappelons que les rayons cosmiques secondaires sont issus de l'interaction des rayons cosmiques primaires majoritairement des protons avec l'atmosphère terrestre.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que les protons de 1 et 2 GeV déposent leur énergie avant d'éteindre la zone avionique (cette zone s'étale entre une altitude qui varie moyennement de 10 à 15 km par rapport au niveau de la mer) contrairement aux protons d'énergie primaires de 3 GeV qui cèdent leur énergie dans la zone avionique et donne naissance de plusieurs particules secondaires tel que les neutrons dont leur énergie est comprise entre 0.1 MeV et 5 MeV, avec l'existence de deux pics un autour de 0.4 MeV et un second autour de 1 MeV.

En ce qui concerne l'interaction des neutrons atmosphériques avec les semi-conducteurs, nos résultats illustrent que l'arsenic de gallium est plus sensible à l'interaction des neutrons atmosphériques en comparant avec le silicium et le germanium. Mais d'une manière générale ces neutrons sont incapables de détruire les cibles semi-conducteurs vu le nombre des particules reculées qui reste négligeable devant le nombre des particules constituant ces matériaux.

Pour l'interaction des neutrons atmosphériques avec le corps humain, nos résultats

montrent que les neutrons dont l'énergie primaires et 0.4 MeV et 1 MeV ne pose aucun danger sur le corps humain.

Bibliographie

- [1] D. Blanc. *Noyaux , particules.réacteurs nucléaires*, PAGE 206, Edition MASSON, . page 6
- [2] Benlakhdar Fatiha, *Étude de l'effet des nanomatériaux sur l'absorption des rayonnements dans un tissu biologique* .Thèse de doctorat, USTO-MB (2018). page 4
- [3] Christine Jimonet, Henri Métivier. *Collectif- Principes de radioprotection*. pages 5, 5, 6, 7.
- [4] T. W. Crane and M. P. Baker, Neutron Detector, Chap. 13, *Passive Non-destructive Assay of Nuclear Materials*. Los Alamos Natinal Laboratory : Reilly, (1991). page 6
- [5] M.S.M Ould Mohamed, *Étude des interactions des particules énergétique avec la matière par la méthode Monte Carlo*. Thèse de doctorat, USTO-MB (2018). pages 7, 15
- [6] J Beringer et al. *Review of particle physics particle data group*. Physical Review D (Particles, Fields, Gravitation and Cosmology), 86, no 1, (2012). page 8
- [7] Mariane Mangin-Brinet, *Mesures des rayons cosmiques entre le GeV et le PeV par les expériences AMS et CREAM*. Diplôme d'habilitation à diriger les recherches, Université de Joseph Fourier - Grenoble I (2007). page 9
- [8] Rafik Sedrati .*Interprétation du spectre primaire des électrons cosmiques de très haute énergie*. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba . page 11
- [9] S. Agostinelli et al. *Geant4 - a simulation toolkit*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 506(3) :250-303, (2003). page 13
- [10] <http://root.cern.ch/>. page 15

-
- [11] Electromagnetic Standard Physics Working Group. http://geant4.web.cern.ch/geant4/collaboration/working_groups/electromagnetic/. page 17
- [12] Abdul Fattah Mohamad Hadi, *Simulation de l'imagerie à 3γ avec un télescope Compton au xénon liquide*. Thèse de doctorat, Université Nantes Angers Le Mans (2013). page 17
- [13] Bertini Hugo W. *Intranuclear-cascade calculation of the secondary nucleon spectra from nucleon-nucleus interactions in the energy range 340 to 2900 MeV and comparisons with experiment*. Physical Review, 1969, **188**, no 4, p. 1711. page 17
- [14] Geant4 Collaboration. Physics Reference Manual. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>. page 17
- [15] ZAMBELLI Laura. *Contraintes sur la prédiction des flux de neutrinos de T2K par les données de l'expérience de hadroproduction NA61/SHINE*. (2013). Thèse de Doctorat, Université PARIS 7. page 17
- [16] Hakmana Witharana and Sampath S. *Development of Cosmic Ray Simulation Program – Earth Cosmic Ray Shower (ECRS)*. Physics and Astronomy Dissertations : Paper 41 (2007). page 18
- [17] <http://grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosmet.html>. page 18
- [18] Bektasoglu Mehmet, Halil Arslan. *Estimation of the effects of the Earth's electric and magnetic fields on cosmic muons at sea level by Geant4*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, (2012), **74**, p. 212-216. page 19
- [19] <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/circula/theme/atmos22.html>. page 21
- [20] John Apostolakis et al., *Progress in hadronic physics modelling in Geant4*. Journal of Physics : Conference Series **160**,(2009) 012073. page 23
- [21] M. S. Gordon et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. vol. **51**, no. 6, pp. 3427–3434, (2004). page 25
- [22] P. Papin et al., *An estimate of the secondary-proton spectrum at small atmospheric depths* **19C**, N.3, Maggio-Giugno (1996). page 25

-
- [23] Silveira M A G, Cirne K H, Santos R B B, et al. *Performance of electronic devices submitted to X-rays and high energy proton beams*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms, (2012), **273**, p. 135-138. page [26](#)
- [24] Sazonov S et al. *Hard X-ray emission of the Earth's atmosphere : Monte Carlo simulations*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, **377**,no 4, p. 1726-1736. page [26](#)
- [25] BNL. ENDF-6 Formats Manual. Technical report (2009). page [27](#)
- [26] K. Shibita et al. *Jendl-4.0 : A new library dor nuclear science and engineering*. In Journal of Nuclear Science and Technology, **48**, pp. 1-30 (2011). page [27](#)
- [27] Daniela Munteanu, Jean-Luc Autran, *Susceptibility of Group-IV and III-V Semiconductor-Based Electronics to Atmospheric Neutrons Explored by Geant4 Numerical Simulations*, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.71528>. page [28](#)
- [28] Yang Liu, Tengfei Zhu, Jianxi Yao, and Xiaoping Ouyang, *Simulation of Radiation Damage for Silicon Drift Detector*, Sensors (Basel). (2019), 19(8) : 1767. page [28](#)
- [29] Changran Geng et al. *Geant4 Calculations of Neutron Dose In Radiation Protection Using a Homogeneous Phanthom And a Chinese Hybrid Male Phantom*, Radiation Protection Dosimetry (2015), pp. 1-8. page [31](#)
- [30] <https://snpl.com/radioprotection/> page [33](#)

