

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Université de Blida 1
Faculté des Sciences
Département de Physique



MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Physique des Rayonnements

Présenté Par

LATRI Fella

**Simulation des Interactions des Ions Lourds dans des Matériaux de
Blindage avec Geant4**

Soutenue le 29/06/2025

Devant le jury :

Dr. BENAHMED Abdelillah	Président	MCB	Université de Blida 1
Dr. LOUAS Mustapha	Examineur	MCB	Université de Blida 1
Dr. OULD-MOHAMED Mounir	Promoteur	MCA	Université de Blida 1

Remerciements

Je tiens tout d’abord à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur M. Ould-Mohamed Mounir Sidi Mohamed, Maître de Conférences classe A à l’Université de Blida 1, pour avoir accepté de diriger ce travail avec un encadrement précieux et un soutien constant.

Je remercie chaleureusement les membres du jury qui ont bien voulu évaluer cette étude. Je suis particulièrement honoré par l’acceptation de M. Benahmed Abdelillah, Maître de Conférences classe B à l’Université de Blida 1, de présider le jury, et je lui adresse mes sincères remerciements. Je remercie également M. Louas Mustapha, Maître de Conférences classe B à l’Université de Blida 1, pour avoir accepté d’évaluer ce travail avec attention.

Je tiens à adresser une reconnaissance spéciale au Professeur Dib Anis, de l’Université d’Oran, pour ses remarques pertinentes et ses précieux conseils qui ont enrichi cette recherche.

Un merci sincère à ma famille pour son encouragement indéfectible tout au long de cette période.

Enfin, je voudrais exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation et à l’aboutissement de ce travail.

Abstract-Résumé

ملخص

تتناول هذه الدراسة فعالية مواد الحماية الألمنيوم، البولي إيثيلين، هيدريد الليثيوم، هيدريد المغنيسيوم ضد الأيونات الثقيلة من الأشعة الكونية المجرية، باستخدام محاكاة Geant4. تظهر النتائج أن البولي إيثيلين وهيدريد الليثيوم، بفضل إنتاجهما المنخفض للنيوترونات الثانوية وكثافتهما المنخفضة، يوفران حماية مثالية للمهمات الفضائية المأهولة والأقمار الصناعية الصغيرة. الألمنيوم، رغم فعاليته في إيقاف الأيونات الأولية، يولد المزيد من النيوترونات الثانوية، مما يزيد من المخاطر الإشعاعية. يُقترح استراتيجيات مثل إراج البورون، الهياكل متعددة الطبقات، والمواد النانوية المركبة لتحسين الحماية من الإشعاع. أخيرًا، تبرز هذه الدراسة أهمية محاكاة مونت كارلو في تصميم دروع الحماية

الكلمات المفتاحية

Geant4، أيونات ثقيلة، مواد حماية، مونت كارلو

Abstract

This study investigates the effectiveness of shielding materials (aluminium, polyethylene, lithium hydride, magnesium hydride) against heavy ions (^{16}O , ^{28}Si , ^{56}Fe) from galactic cosmic rays, using Geant4 simulations. The results demonstrate that polyethylene and lithium hydride, due to their low secondary neutron production and reduced density, provide optimal protection for manned space missions and miniaturized satellites. Aluminum, while effective at stopping primary ions, generates more secondary neutrons, increasing radiological risks. Strategies such as boron incorporation, multilayer structures, and nanocomposites are proposed to enhance radiation protection. Finally, this study highlights the importance of Monte Carlo simulations for designing shielding suited to hostile space environments.

Keywords

Heavy ions, Shielding materials, Monte Carlo, Geant4.

Résumé

Cette étude examine l'efficacité des matériaux de blindage (aluminium, polyéthylène, hydrure de lithium, hydrure de magnésium) face aux ions lourds (^{16}O , ^{28}Si , ^{56}Fe) des rayonnements cosmiques galactiques, en utilisant des simulations Geant4. Les résultats montrent que le polyéthylène et l'hydrure de lithium, grâce à leur faible production de neutrons secondaires et leur densité réduite, offrent une protection optimale pour les missions spatiales habitées et les satellites miniaturisés. L'aluminium, bien qu'efficace pour arrêter les ions primaires, génère davantage de neutrons secondaires, augmentant les risques radiologiques. Des stratégies comme l'incorporation de bore, les structures multicouches et les nanocomposites sont proposées pour améliorer la radioprotection. Enfin, cette étude souligne l'importance des simulations Monte Carlo pour concevoir des blindages adaptés aux environnements spatiaux hostiles

Mots-clés

Ions lourds, Matériaux de blindage, Monte-Carlo, Geant4.

Table des matières

Remerciements	i
Abstract-Résumé	ii
Introduction Générale	1
1 Fondements théoriques et généralités	3
1.1 Les ions lourds et leurs interactions avec la matière	3
1.1.1 Définition et sources des ions lourds	3
1.1.1.1 Sources des ions lourds	3
1.1.2 Propriétés physiques des ions lourds	7
1.1.2.1 Énergie	7
1.1.2.2 Masse	8
1.1.2.3 Transfert d'énergie linéaire (TEL)	8
1.1.3 Mécanismes d'interaction avec la matière	9
1.1.3.1 Ionisation et excitation	9
1.1.3.2 Diffusion élastique et inélastique	9
1.1.3.3 Spallation et fragmentation nucléaire	10
1.2 Effets des ions lourds sur les tissus biologiques et les composants électroniques . . .	12
1.2.1 Effets sur les tissus biologiques	12
1.2.1.1 Dommages à l'ADN	12
1.2.1.2 Dommages indirects	13
1.2.1.3 Effets sur les cellules souches et les tissus	13
1.2.2 Effets sur les composants électroniques	14
1.2.2.1 Effets singuliers (SEE)	15
1.3 Rôle du blindage contre les ions lourds	16
1.3.1 Critères de sélection des matériaux de blindage	16
1.3.1.1 Densité et épaisseur des matériaux	16
1.3.1.2 Capacité d'atténuation des radiations	17
1.3.1.3 Gestion des particules secondaires	18
2 Méthode Monte Carlo et Outil de Simulation Geant4	20
2.1 Principe général MC appliquée au transport de particules	21
2.2 Présentation générale de Geant4	23
2.2.1 Architecture globale du Geant4	23
2.2.2 Configuration et Mise en Œuvre de Simulations avec Geant4	25

2.2.2.1	Définition de la géométrie	25
2.2.2.1.1	Définition des matériaux	25
2.2.2.1.2	Création des volumes	27
2.2.2.2	Génération des particules primaires	28
2.2.2.3	Définition des processus physiques et des modèles	29
3	Résultats et discussion	32
3.1	Validation du code Geant4	33
3.2	Interactions des ions lourds avec les matériaux de blindage	36
3.2.1	Interaction des ions d'oxygène-matériaux de blindage	37
3.2.1.1	Profile d'énergie déposée	37
3.2.1.2	Distribution des neutrons secondaires	38
3.2.1.3	Dose absorbée	40
3.2.2	Interaction des ions de silicium-matériaux de blindage	42
3.2.3	Interaction des ions de fer-matériaux de blindage	45
3.3	Propositions pour améliorer l'efficacité du blindage	47
	Conclusion Générale	49
A	Output file de l'interaction : 10^6 ^{16}O (380 MeV/n) avec LiH	51
	Bibliographie	58

Table des figures

1.1	Flux différentiel des différentes particules cosmiques en fonction de l'énergie[9]	5
1.2	Illustration graphique de la réaction de la spallation.[12]	11
1.3	Illustration graphique de la différenciation des cellules souches[14]	14
2.1	Logigramme du schéma de calcul de la méthode Monte-Carlo appliquée au transport des particules[25]	22
2.2	Architecture globale de Geant4	26
2.3	Illustration de quelques géométries basiques en Geant4.[19]	27
2.4	Architecture minimale d'un code de simulation avec Geant4	31
3.1	Illustration graphique de l'interaction d'un faisceau de 500 ions carbone avec un cube rempli d'eau, réalisée avec le code Geant4. Chaque couleur représente une particule : bleu (électrons), vert (neutrons), rouge (protons), jaune (photons gamma).	35
3.2	Profil du dépôt d'énergie en fonction de la longueur de pénétration des protons et ions de carbone primaires dans l'eau. Les dépôt sont normalisées par rapport à leurs valeurs maximales.	36
3.3	Profil du dépôt d'énergie relative en fonction de la profondeur de pénétration des ions d'oxygène primaires d'une énergie de 380 MeV/n dans l'aluminium, le polyéthylène (PE), l'hydru de lithium (LiH) et l'hydru de magnésium (MgH ₂).	38
3.4	Spectre des neutrons secondaires produit lors l'interaction des ions d'oxygène primaires d'une énergie de 380 MeV/n avec (a) l'aluminium, (b)l'hydru de magnésium MgH ₂ , (c) le polyéthylène (PE) et (d) l'hydru de lithium (LiH)	39
3.5	Dose absorbée par l'aluminium (Al), le polyéthylène (PE), l'hydru de lithium (LiH) et l'hydru de magnésium (MgH ₂) lors de l'interaction avec des ions d'oxygène (¹⁶ O) primaires d'une énergie de 380 MeV par nucléon.	41
3.6	Profil du dépôt d'énergie relative en fonction de la profondeur de pénétration des ions de silicium primaires d'une énergie de 290 MeV/n dans l'aluminium, le polyéthylène (PE), l'hydru de lithium (LiH) et l'hydru de magnésium (MgH ₂).	42
3.7	Spectre des neutrons secondaires produit lors l'interaction des ions de silicium primaires d'une énergie de 290 MeV/n avec (a) l'aluminium, (b)l'hydru de magnésium MgH ₂ , (c) le polyéthylène (PE) et (d) l'hydru de lithium (LiH)	43
3.8	Dose absorbée par l'aluminium (Al), le polyéthylène (PE), l'hydru de lithium (LiH) et l'hydru de magnésium (MgH ₂) lors de l'interaction avec des ions de silicium (²⁸ Si) primaires d'une énergie de 290 MeV par nucléon.	44
3.9	Profil du dépôt d'énergie relative en fonction de la profondeur de pénétration des ions de fer primaires d'une énergie de 1 GeV/n dans l'aluminium, le polyéthylène (PE), l'hydru de lithium (LiH) et l'hydru de magnésium (MgH ₂).	45

3.10	Spectre des neutrons secondaires produit lors l'interaction des ions de fer primaires d'une énergie de 1 GeV/n avec (a) l'aluminium, (b) l'hydruure de magnésium MgH_2 , (c) le polyéthylène (PE) et (d) l'hydruure de lithium (LiH)	46
3.11	Dose absorbée par l'aluminium (Al), le polyéthylène (PE), l'hydruure de lithium (LiH) et l'hydruure de magnésium (MgH_2) lors de l'interaction avec des ions de fer (^{56}Fe) primaires d'une énergie de 1 GeV par nucléon.	47

Liste des tableaux

2.1	Plages d'énergie utilisées dans les constructeurs de physique inélastique hadronique pour les listes de physique de référence sélectionnées dans Geant4.10.[26]	30
2.2	Plages d'énergie utilisées dans les constructeurs de physique inélastique des ions pour les listes de physique de référence sélectionnées dans Geant4.10.[26]	31

Introduction Générale

Les missions spatiales habitées exposent les astronautes à un environnement radiatif hostile, dominé par les rayons cosmiques galactiques (GCR). Ces particules, principalement des protons mais incluant également des noyaux lourds comme les ions de fer, pénètrent profondément dans les matériaux, représentant un risque majeur pour la santé humaine lors de séjours prolongés dans l'espace, avec des effets tels que les modifications physiologiques dues à la micropesanteur, qui affectent les fonctions cérébrales, le système cardiovasculaire, les structures porteuses (os, muscles)[1]. La radioprotection constitue une priorité essentielle dans la planification des missions spatiales, reposant largement sur l'utilisation de matériaux de blindage capables d'atténuer l'intensité de ces rayonnements[2].

Les dispositifs de blindage, intégrés dans des combinaisons spatiales pour limiter l'exposition au GCR lors d'activités extravéhiculaires ou sous forme d'abris d'urgence pour se protéger contre les éruptions solaires (Solar Proton Events, SPE), doivent être optimisés pour équilibrer efficacité et contraintes de masse.

De plus, les structures des véhicules spatiaux elles-mêmes, y compris les modules habités et les systèmes électroniques embarqués, doivent être conçues avec un blindage efficace afin de garantir à la fois la sécurité des occupants et la durabilité des équipements face aux flux continus de particules énergétiques. En l'absence de protection adéquate, l'accumulation de dommages radiatifs peut compromettre le bon fonctionnement des instruments de bord, réduire la durée de vie des composants, voire entraîner des pannes critiques[3]

La conception de tels blindages nécessite une compréhension approfondie des interactions entre particules lourdes et matière, ainsi qu’une évaluation précise de l’efficacité des matériaux face aux différents types de rayonnements. Parallèlement, l’essor des satellites miniaturisés, utilisant des composants électroniques commerciaux non durcis, a accentué le besoin de solutions de blindage robustes pour garantir leur fiabilité dans des orbites à forte intensité radiative.

Les outils de simulation Monte Carlo, tels que Geant4, jouent un rôle clé en modélisant ces interactions avec précision, permettant d’évaluer des matériaux comme l’aluminium, le polyéthylène ou les hydrures pour des applications spatiales et nucléaires.

Dans ce contexte, cette étude vise à analyser l’efficacité de quelques matériaux de blindage face aux ions lourds (^{16}O , ^{28}Si , ^{56}Fe) à l’aide de Geant4, Afin d’évaluer leur efficacité. Ce manuscrit est scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les sources des ions lourds ainsi que leurs modes d’interaction avec la matière de manière générale. Nous y exposons également les effets néfastes qu’ils peuvent engendrer sur les tissus humains et les composants électroniques, en particulier à travers la production de neutrons secondaires, afin de souligner l’ampleur des risques associés à ces particules.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description du code de simulation Monte Carlo Geant4, largement utilisé par la communauté scientifique pour l’étude des interactions particule-matière. Nous y détaillons les principes, les modèles physiques implémentés.
- Le troisième chapitre présente les résultats obtenus dans le cadre de cette étude. Il s’agit d’une analyse approfondie de l’interaction de certains ions lourds issus des rayonnements cosmiques galactiques avec différents matériaux de blindage.
- Enfin, une conclusion générale vient clore ce manuscrit, en résumant les principaux résultats obtenus et en ouvrant des perspectives pour de futurs travaux sur des matériaux et configurations de blindage innovants.

Fondements théoriques et généralités

1.1 Les ions lourds et leurs interactions avec la matière

1.1.1 Définition et sources des ions lourds

Les ions lourds, définis comme des noyaux atomiques chargés (numéro atomique $Z > 2$) (par exemple, les noyaux de carbone, d'oxygène ou de fer), jouent un rôle crucial dans de nombreux domaines scientifiques, notamment la physique des rayonnements, l'astrophysique[4], la biologie, la médecine[5, 6], la physique nucléaire[7] et l'ingénierie spatiale. Leur énergie élevée, leur forte charge et leur masse importante leur confèrent des propriétés uniques, à l'origine d'interactions complexes avec la matière. Ces interactions ont des implications majeures pour la protection radiologique, la conception de blindages, ainsi que la compréhension des effets biologiques et matériels dans des environnements extrêmes, tels que l'espace ou les installations nucléaires. Cette section explore la définition, les sources, les propriétés physiques et les mécanismes d'interaction des ions lourds avec la matière.

1.1.1.1 Sources des ions lourds

Les ions lourds sont des noyaux atomiques dépourvus d'une partie ou de la totalité de leurs électrons, possédant un numéro atomique $Z > 2$, ce qui les distingue des particules légères comme

les protons ($Z = 1$) ou les ions hélium ($Z = 2$). Leur masse élevée et leur charge positive (proportionnelle à Z) leur confèrent un pouvoir d'ionisation important, mesuré par le transfert d'énergie linéaire (TEL, exprimé en $\text{keV}/\mu\text{mètre}$). Les ions lourds sont classés selon leur numéro atomique, leur énergie, et leur origine, avec des implications directes sur leurs applications et leurs effets.

Les ions lourds proviennent de plusieurs sources, naturelles et artificielles :

1. **Rayons cosmiques galactiques (GCR)** : Composés principalement de protons (85%), d'ions hélium (12%), et d'ions lourds (1%–2%, ex. : carbone, oxygène, fer), les GCR sont accélérés par des chocs dans des supernovae ou des environnements stellaires extrêmes. Leur énergie varie de quelques MeV/n à plusieurs GeV/n , avec un flux modulé par le champ magnétique solaire. La Figure 1.1 présente la distribution du flux différentiel en fonction de l'énergie des particules. Bien que l'amplitude de ce flux soit relativement faible (de l'ordre de 10^2 à 10^{-4} $\text{particules}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}$), les particules concernées possèdent des énergies considérables (typiquement $> \text{MeV/n}$). Cette caractéristique leur confère un pouvoir de pénétration exceptionnel, leur permettant de traverser intégralement les blindages conventionnels des satellites (jusqu'à plusieurs cm d'aluminium)[8].
2. **Événements de particules solaires (SPE)** : Lors d'éruptions solaires ou d'éjections de masse coronale (CME), le Soleil émet des ions lourds (ex. : fer, silicium) avec des énergies allant jusqu'à quelques centaines de MeV/n . Leur intensité peut être élevée lors des pics du cycle solaire (environ 11 ans).
3. **Supernovae** : Ces explosions stellaires sont la principale source des ions lourds dans les GCR, produisant des noyaux comme le fer ($Z = 26$), particulièrement nocifs en raison de leur TEL élevé.
4. **Accélérateurs de particules** : Les accélérateurs de particules sont des outils essentiels pour produire des faisceaux d'ions lourds (carbone, oxygène, fer, etc.) à des fins de recherche fondamentale et appliquée. Ces installations permettent de contrôler avec précision l'énergie, l'intensité et la composition des faisceaux, ouvrant la voie à des applications multidiscipli-

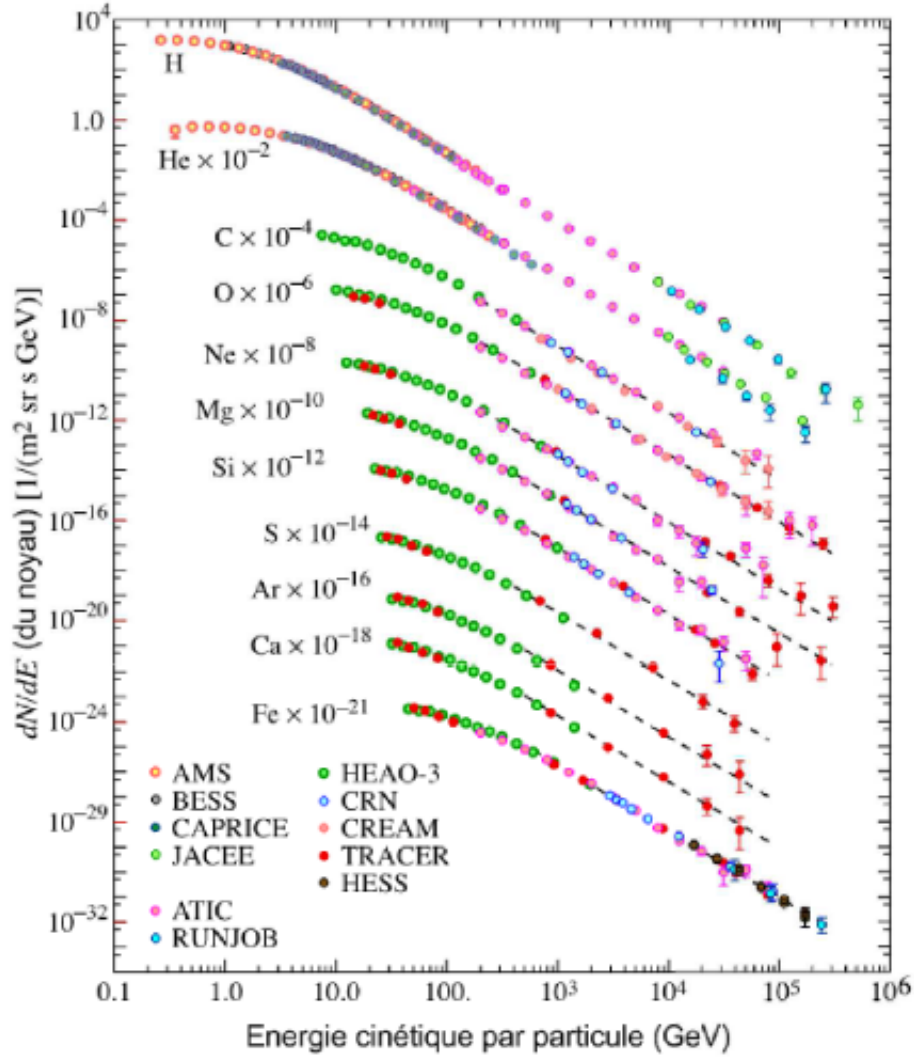


FIGURE 1.1 – Flux différentiel des différentes particules cosmiques en fonction de l'énergie[9]

naires. Plusieurs accélérateurs d'ions lourds à travers le monde jouent un rôle fondamental dans la recherche scientifique et les applications technologiques. Le GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research à Darmstadt, en Allemagne, est l'un des centres les plus importants. Il utilise l'accélérateur linéaire UNILAC et les synchrotrons SIS18 et SIS100. Il est notamment impliqué dans la recherche en physique nucléaire, la radiobiologie, la synthèse d'éléments superlourds et les études de blindage spatial. Ce centre est également à l'origine du projet FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), un complexe international en

cours de développement. Aux États-Unis, le FRIB (Facility for Rare Isotope Beams), situé à Michigan State University, repose sur des cyclotrons K500 et K1200. Il est spécialisé dans la production d'isotopes rares et l'étude de la structure des noyaux exotiques, avec des applications en astrophysique nucléaire. Il succède au NSCL (National Superconducting Cyclotron Laboratory). Le CERN, à Genève en Suisse, est surtout connu pour ses expériences à très haute énergie. Pour les ions lourds, le système d'accélération part de LINAC3, passe par LEIR, le PS, puis le SPS jusqu'au LHC (Large Hadron Collider). L'expérience ALICE y est dédiée à l'étude des collisions entre noyaux de plomb (Pb–Pb), dans le but de comprendre le plasma de quarks et de gluons. Au Japon, le RIKEN RIBF (Radioactive Isotope Beam Factory), situé à Saitama, est un complexe de cyclotrons en cascade (AVF, RRC, SRC). Il permet l'étude des isotopes exotiques, la nucléosynthèse stellaire et la structure des noyaux, et constitue l'un des laboratoires les plus avancés en physique nucléaire fondamentale. Enfin, aux États-Unis toujours, le NSRL (NASA Space Radiation Laboratory), basé au Brookhaven National Laboratory à New York, utilise un booster synchrotron pour générer des ions lourds simulant le rayonnement spatial galactique. Il est principalement utilisé pour évaluer les effets biologiques des rayonnements sur l'être humain et tester les matériaux de blindage pour les missions spatiales de la NASA.

En complément des sources primaires, des processus secondaires peuvent générer des ions lourds ou des particules apparentées. Lorsque les ions lourds primaires interagissent avec l'atmosphère terrestre, les blindages spatiaux, ou d'autres matériaux, ils produisent des particules secondaires via des réactions nucléaires comme la spallation ou la fragmentation. Par exemple, un ion fer des GCR frappant un noyau d'aluminium dans un blindage peut se fragmenter en ions plus légers (ex. : magnésium, silicium) ou produire des neutrons et protons. Bien que ces fragments puissent inclure des ions lourds de moindre énergie, ils ne constituent pas une source primaire, mais un sous-produit des interactions des ions lourds primaires. Ces particules secondaires contribuent néanmoins aux effets radiologiques, notamment en augmentant la dose absorbée dans les tissus biologiques ou les

composants électroniques.

1.1.2 Propriétés physiques des ions lourds

Les propriétés physiques des ions lourds : énergie, charge, et masse déterminent leur comportement lors des interactions avec la matière, influençant leur pouvoir d'ionisation, leur pénétration, et leur capacité à provoquer des réactions nucléaires. Ces propriétés sont essentielles pour comprendre leur impact dans des contextes comme la radioprotection spatiale, l'hadronthérapie, ou la physique nucléaire.

1.1.2.1 Énergie

L'énergie des ions lourds, exprimée en MeV/n (mégaélectronvolts par nucléon) ou GeV/n (gigaélectronvolts par nucléon), dépend de leur source et de leur mécanisme d'accélération. Elle détermine la profondeur de pénétration dans la matière et l'intensité du transfert d'énergie linéaire (TEL). Par exemple :

- Dans les rayons cosmiques galactiques (GCR), les ions fer peuvent atteindre des énergies de 1 GeV/n à 20 GeV/n, leur permettant de traverser plusieurs centimètres de blindage en aluminium.
- En hadronthérapie, les ions carbone sont accélérés à 100MeV/n–400MeV/n, optimisés pour déposer leur énergie maximale dans les tumeurs (pic de Bragg).
- Dans les accélérateurs comme le CERN, les ions plomb atteignent des énergies extrêmes, jusqu'à 2.76 TeV/n, pour étudier les collisions nucléaires.

L'énergie par nucléon (E/A) est une mesure clé, car elle normalise l'énergie totale par le nombre de masse (A), permettant de comparer les ions lourds de tailles différentes. Une énergie élevée augmente la portée de l'ion, mais réduit son TEL jusqu'à ce qu'il ralentisse, où le TEL atteint un maximum près du pic de Bragg. Cette propriété est exploitée en hadronthérapie pour cibler précisément les tissus tumoraux tout en minimisant les dommages aux tissus sains. La dépendance

de la charge à la vitesse est décrite par la relation semi-empirique :

$$Z_{\text{eff}} \approx Z \left(1 - \exp \left(-125\beta/Z^{2/3} \right) \right) \quad (1.1)$$

où $\beta = v/c$. Cette relation montre que les ions lourds deviennent plus ionisants à mesure qu'ils ralentissent, augmentant leur impact sur les tissus biologiques ou les composants électroniques.

1.1.2.2 Masse

La masse d'un ion lourd, proportionnelle à son nombre de masse A (somme des protons et neutrons), est significativement plus élevée que celle des particules légères comme les protons ($A = 1$) ou les électrons. Par exemple :

- Un ion carbone ($A \approx 12$) est 12 fois plus massif qu'un proton.
- Un ion fer ($A \approx 56$) est environ 56 fois plus massif, augmentant son moment cinétique ($p = mv$) et son TEL.

La masse élevée des ions lourds réduit leur déviation dans les champs magnétiques (rayon de courbure proportionnel à m/q), rendant leur trajectoire plus rectiligne dans les blindages ou les tissus. Elle contribue également à leur capacité à provoquer des réactions nucléaires (ex. : spallation), car leur énergie cinétique ($E = \frac{1}{2}mv^2$) est proportionnelle à A . Cette propriété est cruciale pour les applications en physique nucléaire, où des ions lourds massifs (ex. : uranium, $A \approx 238$) sont utilisés pour induire des collisions à haute énergie.

1.1.2.3 Transfert d'énergie linéaire (TEL)

Lors de leur parcours dans la matière, les ions lourds subissent une série d'interactions avec les atomes du milieu, au cours desquelles ils transfèrent progressivement leur énergie jusqu'à leur arrêt complet. Ce transfert d'énergie est quantifié par le transfert d'énergie linéaire (TEL), généralement exprimé en $\text{keV}/\mu\text{m}$. Le TEL représente la densité d'ionisation moyenne produite le long de la

trajectoire de la particule incidente. Dans un milieu donné, le TEL est défini comme le rapport entre l'énergie moyenne transférée localement dE et la distance infinitésimale parcourue dx [10] :

$$TEL = \frac{dE}{dx} \quad (1.2)$$

Le ralentissement des ions lourds s'accompagne d'une augmentation du taux de transfert d'énergie, jusqu'à atteindre un maximum vers la fin de la trajectoire : ce phénomène est connu sous le nom de pic de Bragg. Par exemple, un ion carbone à 300 MeV/n dans l'eau a un TEL de 10 keV/ μ m à 50 keV/ μ m au pic de Bragg, ce qui est exploité en hadronthérapie pour cibler les tumeurs.

1.1.3 Mécanismes d'interaction avec la matière

Les ions lourds interagissent avec la matière via plusieurs mécanismes, chacun ayant des implications spécifiques pour les tissus biologiques, les composants électroniques, et les matériaux de blindage.

1.1.3.1 Ionisation et excitation

L'ionisation est le mécanisme dominant pour les ions lourds à haute énergie, représentant la principale voie de perte d'énergie dans la plupart des matériaux. Lorsqu'un ion lourd traverse un matériau, il transfère son énergie aux électrons des atomes cibles, provoquant :

- **Ionisation** : Arrachement des électrons, créant des paires électron-ion.
- **Excitation** : Transition des électrons vers des niveaux d'énergie supérieurs, sans ionisation.

Ce processus génère une piste d'ionisation dense le long de la trajectoire de l'ion, caractérisée par un TEL élevé.

1.1.3.2 Diffusion élastique et inélastique

Les ions lourds interagissent également avec les noyaux des atomes cibles via des processus de diffusion, qui affectent leur trajectoire et leur énergie.

- **Diffusion élastique** : L'ion lourd collisionne avec un noyau cible sans transfert significatif d'énergie, modifiant uniquement sa direction. Ce processus est gouverné par l'interaction coulombienne entre les noyaux et est fréquent dans les matériaux denses (ex. : aluminium, plomb). diffusion élastique contribue à la dispersion des ions lourds dans les blindages, réduisant leur pénétration linéaire mais augmentant la couverture spatiale de la dose.
- **Diffusion inélastique** : L'ion lourd transfère une partie de son énergie au noyau cible, provoquant son excitation ou sa désintégration en particules secondaires (ex. : protons, neutrons). Ce processus est moins fréquent que la diffusion élastique, mais sa section efficace augmente avec l'énergie de l'ion et la masse du noyau cible. Les réactions inélastiques peuvent initier des cascades nucléaires, amplifiant les effets radiologiques.

1.1.3.3 Spallation et fragmentation nucléaire

Lorsque l'énergie d'un ion lourd dépasse 100 MeV/n, il peut provoquer des réactions nucléaires complexes, telles que la spallation ou la fragmentation, en interagissant avec les noyaux cibles. Ces processus brisent le noyau cible ou l'ion incident en fragments plus légers, libérant des particules secondaires comme des protons, neutrons, ou noyaux légers.

- **Spallation** : Le noyau cible est fragmenté en plusieurs particules légères et intermédiaires, souvent accompagné d'une émission de neutrons à haute énergie (voir figure 1.2). Par exemple, un ion fer 1 GeV/n frappant un noyau d'aluminium ($Z = 13$, $A = 27$) peut produire des isotopes comme le sodium ($Z = 11$), le magnésium ($Z = 12$), et des neutrons de 1 MeV–100 MeV. La section efficace de spallation dépend de l'énergie de l'ion et de la masse du cible, atteignant un maximum vers 1 GeV/n.
- **Fragmentation nucléaire** : L'ion lourd lui-même se fragmente en noyaux plus légers, souvent en combinaison avec la spallation du cible. Par exemple, Un blindage en aluminium de 20 g/cm² fragmente la majorité des ions fer et environ la moitié des ions magnésium et silicium, réduisant le flux d'ions lourds et la dose équivalente[11].

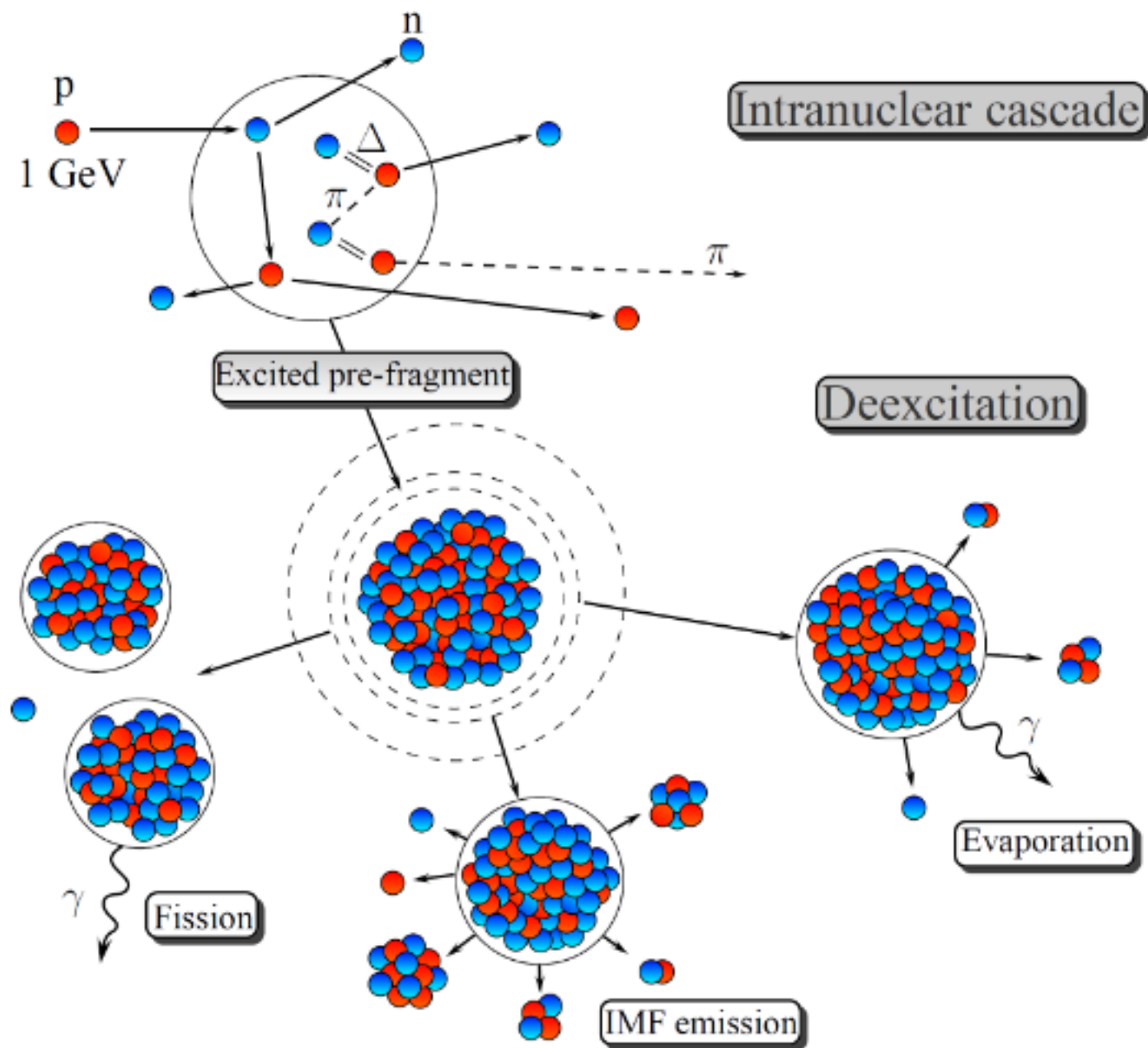


FIGURE 1.2 – Illustration graphique de la réaction de la spallation.[12]

1.2 Effets des ions lourds sur les tissus biologiques et les composants électroniques

Les ions lourds provoquent des effets significatifs sur les tissus biologiques et les composants électroniques en raison de leurs interactions complexes avec la matière. Ces interactions, incluant l'ionisation, la diffusion, et la spallation/fragmentation nucléaire, entraînent des dommages localisés et systémiques, avec des implications critiques pour la radioprotection spatiale, l'hadronthérapie, et la fiabilité des systèmes électroniques embarqués. Cette section examine les mécanismes spécifiques des effets des ions lourds sur les tissus biologiques (dommages à l'ADN, risques de cancer, troubles neurologiques) et sur les composants électroniques (effets singuliers comme SEU et SEL), en mettant en évidence les défis et les stratégies de mitigation.

1.2.1 Effets sur les tissus biologiques

Les ions lourds, provoquent des dommages biologiques complexes, principalement via l'ionisation dense et la production de particules secondaires. Ces effets sont particulièrement préoccupants dans des environnements à forte exposition, comme l'espace (rayons cosmiques galactiques, GCR) ou les installations nucléaires, où les ions lourds posent des risques à court et long terme.

1.2.1.1 Dommages à l'ADN

L'ionisation directe induite par les ions lourds génère des pistes d'ionisation extrêmement denses, au sein desquelles des milliers d'événements ionisants se produisent à l'échelle nanométrique. Cette densité élevée d'ionisation entraîne la formation de lésions complexes et fortement localisées dans l'ADN, notamment des cassures double brin (CDB), qui figurent parmi les altérations les plus sévères du génome. Contrairement aux rayonnements faiblement ionisants, tels que les rayons X ou les électrons, les ions lourds induisent des dommages structurellement complexes et difficiles à réparer par les mécanismes cellulaires. Ces lésions peuvent conduire à des mutations

génétiques, à des réarrangements chromosomiques et, à long terme, favoriser le développement de pathologies telles que les cancers.

- **Cassures double brin (CDB)** : Résultant de multiples ionisations dans un volume restreint, les CDB constituent l'un des types de dommages les plus délétères pour l'intégrité génomique. Ces lésions sont particulièrement difficiles à réparer par les voies cellulaires classiques, telles que la jonction d'extrémités non homologues (NHEJ) ou la recombinaison homologue (HR).
- **Cassures simple brin (CSB)** : Bien que moins critiques, les CSB surviennent fréquemment. Si elles apparaissent en vis-à-vis sur les deux brins de l'ADN, elles peuvent évoluer en CDB.
- **Modifications des bases nucléiques** : L'oxydation des bases (par exemple, la formation de 8-oxoguanine), induite par les espèces réactives de l'oxygène (ROS) issues de la radiolyse de l'eau, peut provoquer des erreurs lors de la réplication de l'ADN.
- **Réarrangements chromosomiques** : L'accumulation de lésions non réparées favorise l'apparition d'instabilités chromosomiques, telles que des translocations, des inversions ou des délétions, augmentant le risque de mutations oncogènes.

1.2.1.2 Dommages indirects

Les ions lourds interagissent également avec les molécules d'eau présentes dans les cellules, induisant des processus de radiolyse qui génèrent des espèces réactives de l'oxygène (ROS), telles que les radicaux hydroxyles ($\cdot\text{OH}$). Ces espèces réactives peuvent endommager l'ADN, les protéines et les membranes cellulaires, contribuant ainsi à l'amplification des effets biologiques induits par les rayonnements ionisants.

1.2.1.3 Effets sur les cellules souches et les tissus

Les cellules souches (Figure 1.3) ainsi que les tissus à renouvellement rapide, tels que la moelle osseuse ou l'épithélium intestinal, présentent une sensibilité accrue aux dommages induits par les

ions lourdes. Cette radiosensibilité élevée peut entraîner des altérations fonctionnelles des tissus ou des organes, et favoriser à long terme l'apparition de pathologies graves, notamment des cancers. A titre d'illustration, une étude menée sur des souris exposées à des ions fer ^{56}Fe (1 GeV/n) simulant les conditions du rayonnement spatial a mis en évidence une réduction significative du nombre de cellules progénitrices neurales dans les régions neurogéniques, accompagnée d'une forte augmentation de la mort cellulaire[13].

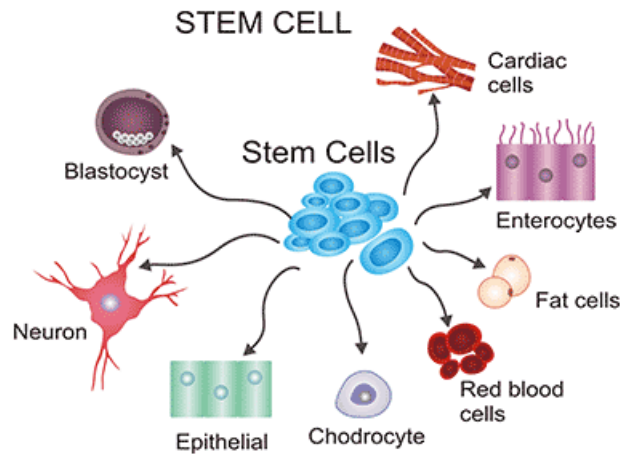


FIGURE 1.3 – Illustration graphique de la différenciation des cellules souches[14]

1.2.2 Effets sur les composants électroniques

Les ions lourds, en raison de leur capacité à déposer des quantités importantes d'énergie via l'ionisation, provoquent des effets singuliers (Single Event Effects, SEE) dans les composants électroniques, notamment les semi-conducteurs (ex. : silicium, arséniure de gallium). Ces effets, critiques pour les systèmes embarqués dans les satellites, les vaisseaux spatiaux, ou les accélérateurs, compromettent la fiabilité et la sécurité des équipements.

1.2.2.1 Effets singuliers (SEE)

- **Single Event Upset (SEU)** : modification temporaire d'un bit mémoire ou d'un élément logique induite par l'impact d'une particule chargée lourde. La particule crée une traînée d'ionisation dans le semionducteur et dépose une charge suffisante pour inverser l'état d'un bascule ou d'une cellule mémoire[15]. Par exemple, des ions Fe ou Kr de haute énergie produisent, outre leur ionisation directe, des particules secondaires qui augmentent la charge déposée et le taux de SEU. Les SEU sont réversibles (le bit affecté redevient correct après réinitialisation), mais peuvent induire des erreurs multiples (MBU) ou des défaillances logicielles.
- **Single Event Latchup (SEL)** : amorçage d'un circuit parasite p-n-p-n interne dans une puce CMOS, créant un chemin de courant à faible impédance entre rails d'alimentation[15]. Cet effet résulte typiquement de charges excessives générées par l'ion traversant la région bien dopée du composant. Il provoque un court-circuit interne auto-entretenu tant que l'alimentation n'est pas coupée. Le SEL peut causer une destruction permanente si le courant dépasse la résistance du dispositif.
- **Single Event Burnout (SEB)** : défaillance catastrophique d'un transistor de puissance (MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor)) dû à l'impact d'un ion lourd[15]. L'impact induit une avalanche d'électrons/hole (effet de multiplication par impact) dans la jonction drain-substrat, entraînant une surtension locale et l'éclatement thermique du canal. Le transistor court-circuite alors l'alimentation, pouvant griller le composant . Le SEB est typique des MOSFET haute tension en polarisation bloquée et ne fait pas l'objet d'une récupération logicielle.

Chaque effet SEE (Single Event Effect) a un seuil LET (Linear Energy Transfer) minimal pour se produire. Les ions lourds (par exemple un ion de fer à 1 GeV/n avec un LET modéré peuvent induire des SEU (Single Event Upset) dans des SRAM (Static Random-Access Memory) haute densité même si leur énergie est très élevée[16]. A plus haute énergie, l'effet devient dominé par les

réactions nucléaires secondaires.

1.3 Rôle du blindage contre les ions lourds

Le blindage joue un rôle essentiel dans la protection contre les ions lourds. Le blindage vise à réduire la dose absorbée et à minimiser les risques radiologiques dans des environnements comme l'espace, les installations nucléaires, ou les centres d'hadronthérapie. Cette section examine les critères de sélection des matériaux de blindage, en mettant l'accent sur la densité et l'épaisseur, la capacité d'atténuation des radiations, et la gestion des particules secondaires.

1.3.1 Critères de sélection des matériaux de blindage

La sélection des matériaux de blindage repose sur une combinaison de propriétés physiques, chimiques, et mécaniques, optimisées pour atténuer les ions lourds tout en répondant aux contraintes d'ingénierie (poids, coût, durabilité). Les trois critères principaux densité et épaisseur des matériaux, capacité d'atténuation des radiations, et gestion des particules secondaires sont détaillés ci-dessous, avec leurs implications pour les applications pratiques.

1.3.1.1 Densité et épaisseur des matériaux

La densité et l'épaisseur d'un matériau déterminent sa capacité à arrêter ou ralentir les ions lourds, en influençant la profondeur de pénétration et le TEL. Ces paramètres sont gouvernés par les interactions des ions lourds avec la matière, principalement l'ionisation et la diffusion.

- **Densité** : Les matériaux denses (ex. : plomb, tungstène) ont une forte densité d'atomes cibles (N , atomes/cm³), augmentant la probabilité d'interactions par unité de longueur. La perte d'énergie des ions lourds, décrite par la formule de Bethe-Bloch, est proportionnelle à NZ_t , où Z_t est le numéro atomique du matériau. Par exemple, le plomb ($Z_t = 82$, densité 11.34 g/cm³) est plus efficace pour ralentir un ion fer (1 GeV/n) que l'aluminium ($Z_t = 13$, densité

2.7 g/cm³). Cependant, les matériaux denses sont souvent lourds, ce qui est problématique pour les applications spatiales où le poids est une contrainte majeure.

- **Épaisseur** : L'épaisseur du blindage, mesurée en g/cm² (masse surfacique), détermine la portée des ions lourds. La portée (R) d'un ion lourd dans un matériau est inversement proportionnelle à la densité et dépend de son énergie initiale et de son TEL. Par exemple, un ion carbone à 300 MeV/n a une portée d'environ 15 cm dans l'eau (densité 1 g/cm³), mais seulement 5 cm dans l'aluminium. Pour les ions fer des GCR (1 GeV/n), des blindages d'aluminium de 20 g/cm² (environ 7.4 cm) réduisent significativement le flux, mais ne l'arrêtent pas complètement en raison de leur énergie élevée.
- **Compromis poids-efficacité** : Dans l'espace, les blindages épais et denses (ex. : plomb) sont impraticables en raison des contraintes de masse au lancement. Les matériaux à faible densité mais riches en hydrogène, comme le polyéthylène (densité 0.95 g/cm³), sont privilégiés, car ils offrent une atténuation efficace pour un poids réduit. Par exemple, 10 g/cm² de polyéthylène est plus efficace contre les ions lourds que 10 g/cm² d'aluminium, en raison de sa composition atomique

1.3.1.2 Capacité d'atténuation des radiations

La capacité d'atténuation des radiations mesure l'efficacité d'un matériau à réduire le flux ou la dose des ions lourds, principalement via l'ionisation et la diffusion. Cette capacité dépend du numéro atomique (Z_t), de la densité, et de la composition chimique du matériau.

- **Rôle du numéro atomique (Z_t)** : Les matériaux à Z_t élevé (ex. : plomb ($Z_t = 82$), tungstène ($Z_t = 74$)) ont une section efficace d'ionisation plus grande, car la perte d'énergie ($-dE/dx$) est proportionnelle à Z_t dans la formule de Bethe-Bloch :
- **Efficacité des matériaux légers** : Les matériaux riches en hydrogène (ex. : polyéthylène, eau, composites à base de polymères) sont particulièrement efficaces contre les ions lourds, car l'hydrogène ($Z_t = 1$, $A = 1$) maximise l'atténuation par unité de masse. L'hydrogène

ralentit les ions lourds via des collisions inélastiques avec ses protons, réduisant le TEL sans générer de particules secondaires massives. Par exemple, le polyéthylène $(\text{CH}_2)_n$ atténue un ion oxygène (600 MeV/n) avec une dose équivalente 20–30 % inférieure à celle de l'aluminium pour une même masse surfacique (10 g/cm^2).

- **Blindages multicouches** : Pour optimiser l'atténuation, les blindages combinent souvent des matériaux à Z_t élevé (ex. : aluminium pour la structure) et à Z_t faible (ex. : polyéthylène pour l'hydrogène). Par exemple, le module d'habitation de la Station Spatiale Internationale (ISS) utilise un blindage multicouche avec 5 g/cm^2 d'aluminium et 3 g/cm^2 de polyéthylène, réduisant la dose des GCR de 40-50 % par rapport à un blindage aluminium seul.

1.3.1.3 Gestion des particules secondaires

Les interactions des ions lourds avec les matériaux de blindage génèrent des particules secondaires via la spallation et la fragmentation nucléaire, posant un défi majeur pour l'efficacité des blindages spatiaux et médicaux. Ces particules secondaires, principalement des neutrons, protons et ions légers, ont une portée accrue par rapport aux ions primaires, augmentant la dose absorbée et les risques radiologiques, notamment les cancers et les effets sur les composants électroniques (Single Event Effects, SEE).

- **Limitations des matériaux denses** : Les matériaux à numéro atomique élevé (Z_t), comme le plomb ou le tungstène, présentent une section efficace de spallation élevée, produisant un flux important de neutrons et de fragments. Par exemple, pour un ion fer de 1 MeV/n le plomb génère 2 à 3 fois plus de neutrons secondaires que le polyéthylène, ce qui limite son utilisation dans les environnements spatiaux.
- **Avantages des matériaux riches en hydrogène** : Les matériaux à faible Z_t , tels que le polyéthylène, l'eau ou les composites à base de bore (ex. : polyéthylène boraté), réduisent efficacement la production de particules secondaires. L'hydrogène, grâce à sa capacité à capturer les neutrons via la réaction $^1\text{H} + n \rightarrow ^2\text{H} + \gamma$, diminue leur contribution à la dose. Par

exemple, g/cm^2 de polyéthylène réduit le flux de neutrons secondaires de 50% par rapport à l'aluminium pour un ion oxygène de 600 MeV/n.

— **Stratégies avancées de gestion :**

- **Blindages hybrides :** Combiner des couches à faible Z_t (ex. : polyéthylène pour absorber les neutrons) avec des couches à Z_t moyen (ex. : aluminium pour la résistance structurelle). Les réservoirs d'eau des vaisseaux spatiaux, par exemple, agissent comme blindage passif, réduisant le flux de neutrons de 30–40%.
- **Capteurs de neutrons :** Intégration de matériaux comme le bore-10 (^{10}B), qui capture les neutrons via la réaction $^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow ^{11}\text{B}^* \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$, minimisant les risques radiologiques.

La gestion des particules secondaires est critique dans les environnements spatiaux, où les neutrons secondaires peuvent pénétrer les blindages, augmentant les risques pour les astronautes (cancers, dommages cellulaires) et les systèmes électroniques (SEE). En hadronthérapie, ces particules compliquent la radioprotection, nécessitant des blindages optimisés pour protéger le personnel et les équipements sensibles.

Méthode Monte Carlo et Outil de Simulation Geant4

Les méthodes de Monte Carlo (MC) [17] ont émergé durant la Seconde Guerre mondiale, notamment dans le cadre du projet Manhattan, visant à développer l'arme nucléaire. Leur principe repose sur la modélisation d'un problème sous forme d'une intégrale que l'on estime par des outils de calcul probabiliste. Cette estimation est réalisée numériquement en approchant l'intégrale par la moyenne des valeurs d'une fonction évaluée en un grand nombre de points pseudo-aléatoires générés par ordinateur. Bien que les origines exactes du terme Monte Carlo soient débattues, il est généralement attribué à von Neumann, Ulam, Fermi ou Metropolis, en référence aux jeux de hasard pratiqués dans la principauté de Monaco. Ce chapitre présente les fondements de la méthode de Monte Carlo, ainsi qu'une description du code de simulation Geant4 (GEometry AND Tracking) [18], largement utilisé pour modéliser le transport de particules à travers la matière. La méthode de Monte Carlo constitue une approche probabiliste puissante permettant de résoudre des problèmes complexes en physique, en mathématiques [20], en économie [21] et en ingénierie. En générant des séquences de nombres pseudo-aléatoires, elle permet d'estimer numériquement des solutions lorsque les approches analytiques classiques sont impraticables ou insuffisamment précises. Le toolkit Geant4, développé initialement au CERN, est aujourd'hui utilisé dans de nombreux domaines, notamment la physique des hautes énergies, la radioprotection et la dosimétrie spatiale ou aéronautique [22], ainsi que la physique médicale (imagerie, dosimétrie, radiothérapie

[23]).

2.1 Principe général MC appliquée au transport de particules

Le schéma de la figure 2.1 [25] illustre le déroulement d'un calcul Monte Carlo appliqué au transport de particules. Selon Rodolphe Antoni et Laurent Bourgois [25] ce type de simulation repose sur la génération aléatoire d'un grand nombre de particules à partir d'une source, suivie du calcul probabiliste de leur trajectoire et de l'ensemble des interactions qu'elles peuvent subir au cours de leur parcours (telles que le type de particule secondaire produite, son énergie, etc.). Dans un premier temps, une routine de tirage aléatoire attribue à chaque particule un ensemble de paramètres initiaux, comprenant les coordonnées spatiales (x, y, z) , la direction d'émission (u, v, w) , l'énergie initiale E et, le cas échéant, le temps t si la dépendance temporelle est prise en compte. Ces paramètres sont échantillonnés selon des distributions de probabilité définies pour la position, la direction, l'énergie et le temps. Ainsi, la source est caractérisée de manière statistique par ces distributions, en utilisant un générateur de nombres aléatoires. Cette phase d'échantillonnage aléatoire des paramètres physiques constitue le fondement même de la méthode Monte-Carlo.

La phase suivante du calcul consiste à déterminer la distance que la particule va parcourir avant d'interagir avec le milieu, exprimée en unités de libre parcours moyen (mean free path, MFP). La géométrie du système (incluant la source, les matériaux traversés, les détecteurs, et les limites du domaine simulé) est définie dans un fichier d'entrée. Les sections efficaces d'interaction et les modèles physiques nécessaires à la description des processus nucléaires et électromagnétiques dans les matériaux concernés sont également implémentés.

Un algorithme dédié calcule ensuite la trajectoire de la particule jusqu'au point probable d'interaction, en se basant sur le libre parcours moyen déterminé à partir des sections efficaces dans le milieu traversé. Si la particule franchit une interface entre deux matériaux, ses coordonnées sont

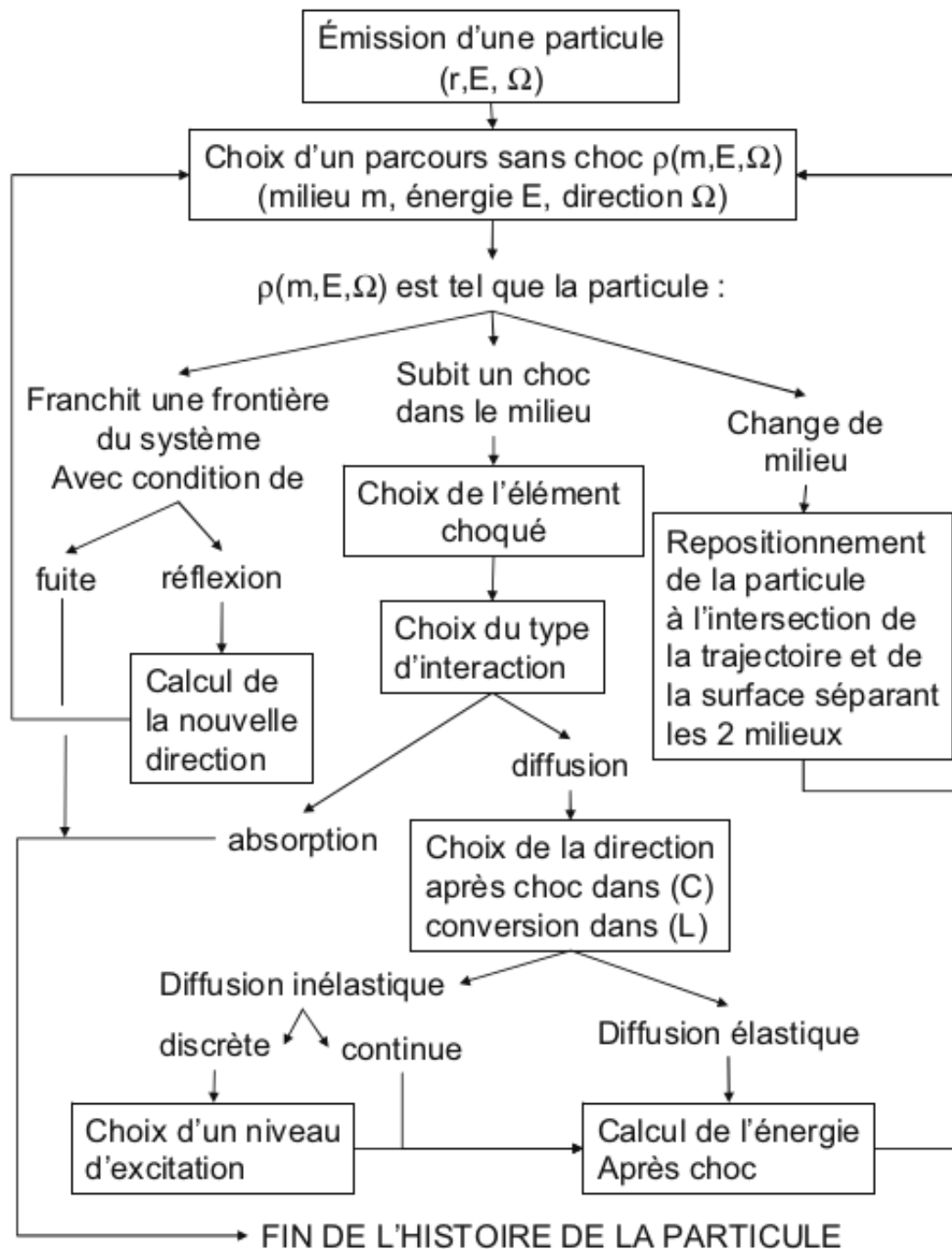


FIGURE 2.1 – Logigramme du schéma de calcul de la méthode Monte-Carlo appliquée au transport des particules[25]

recalculées au point de traversée. Si elle atteint la limite extérieure du système simulé, elle est considérée comme ayant quitté le domaine (escape), et son historique est terminé. Une nouvelle particule est alors émise par la source et suivie selon le même schéma, jusqu'à ce que l'ensemble des particules primaires et secondaires aient été simulées.

Au cours de son transport, la particule peut subir une ou plusieurs collisions. Un algorithme décide de la nature de l'interaction (diffusion ou absorption), puis échantillonne le noyau cible et le type de réaction (élastique ou inélastique). En cas de diffusion, une routine spécialisée détermine l'angle de diffusion et l'énergie transférée à l'aide de tirages aléatoires, et met à jour la direction de la particule dans le repère du laboratoire. Le processus retourne alors à la phase de calcul de la nouvelle longueur de trajectoire, et l'histoire de la particule se poursuit.

Les grandeurs physiques d'intérêt — telles que la fluence, la densité de collisions ou la dose absorbée — sont estimées à l'aide d'outils statistiques appelés estimateurs. Les résultats finaux sont obtenus par un moyennage des contributions de toutes les particules simulées. En raison du caractère aléatoire de la méthode, ces résultats sont toujours associés à une incertitude statistique, qu'il convient de quantifier rigoureusement.

2.2 Présentation générale de Geant4

2.2.1 Architecture globale du Geant4

La figure 2.2[18] illustre l'architecture principale du code Geant4. Ce dernier est structuré en plusieurs catégories de classes C++ (au nombre de 17), chacune étant dédiée à un aspect spécifique de la simulation. Voici un aperçu des principales catégories :

- **Global** : gère le système d'unités, les constantes numériques, ainsi que les générateurs de nombres pseudo-aléatoires.
- **Rep. Graph** : assure l'affichage graphique à l'écran.
- **Material** : contient les classes nécessaires à la définition des matériaux utilisés dans la

simulation.

- **Intercoms** : assure la communication entre les différentes catégories de Geant4.
- **Particles** : gère les propriétés physiques des particules (masse, charge, etc.).
- **Geometry** : permet de créer et manipuler les structures géométriques. Par exemple, la classe `G4Box` permet de définir un parallélépipède rectangle.
- **Track** : regroupe les classes traitant des trajectoires (*tracks*) des particules et des pas (*steps*) correspondant aux segments entre deux interactions.
- **Processes** : contient les modèles physiques décrivant les interactions des particules avec la matière (électromagnétiques, hadroniques, etc.).
- **Digits & Hits** : permet d'enregistrer des quantités physiques associées à des éléments de la géométrie, simulant ainsi la réponse d'un détecteur.
- **Tracking** : fournit un accès aux informations des trajectoires, telles que l'énergie déposée ou le nombre de particules secondaires produites.
- **Event** : regroupe les classes relatives à la génération des particules primaires dans un événement.
- **Run** : un *run* est une série d'événements simulés sous des conditions identiques. Ce module stocke et gère les informations globales relatives à un même run.
- **Visualisation** : permet de visualiser la géométrie du détecteur, les trajectoires des particules et leurs interactions. Plusieurs moteurs graphiques sont pris en charge, tels que `DAWN`, `WIRED`, `RayTracer`, `VRML`, `OPACS`, `OpenGL`, `OpenInventor`, `ASCII Tree` et `GAG Tree`.
- **Readout** : utilisé pour définir des zones de lecture dans la géométrie, permettant la collecte d'informations localisées.
- **Persistence** : propose une interface pour enregistrer et retrouver des données liées aux runs, événements, valeurs physiques ou informations géométriques, facilitant ainsi l'analyse post-simulation.

- **Interfaces** : gère l'interaction utilisateur à travers des commandes accessibles via l'interface console ou des macros.

2.2.2 Configuration et Mise en Œuvre de Simulations avec Geant4

Une simulation typique dans Geant4 nécessite la définition de plusieurs composants essentiels, implémentés via des classes C++ spécifiques. Ces composants incluent la géométrie de la simulation, les matériaux, les particules primaires, ainsi que les processus et modèles physiques. Cette section détaille les étapes clés de la configuration d'une simulation Geant4, en mettant l'accent sur leur mise en œuvre pratique et leur importance pour la précision des résultats.

2.2.2.1 Définition de la géométrie

La définition de la géométrie repose sur les modules *Matériaux* et *Géométrie* de Geant4. Cette étape consiste à spécifier les matériaux utilisés, à créer des volumes géométriques et à les positionner dans l'espace simulé, en utilisant la classe `G4VUserDetectorConstruction`.

2.2.2.1.1 Définition des matériaux

Les matériaux sont définis à l'aide de la classe `G4Material`, qui permet de spécifier leurs propriétés physiques, telles que la densité, la composition atomique et l'état (solide, liquide, gazeux). Un matériau peut être :

- **Prédéfini** : Utilisation de matériaux standards de la base de données NIST (ex. : `G4_WATER` pour l'eau, `G4_ALUMINIUM` pour l'aluminium).
- **Personnalisée** : Construction à partir d'éléments chimiques (`G4Element`) et de leurs isotopes, en spécifiant les fractions massiques. Par exemple, pour un matériau composite comme l'eau, l'utilisateur définit les éléments hydrogène et oxygène avec leurs proportions :

```
1 G4Element* H=new G4Element("Hydrogen","H",1.,1.01*g/mole);
2 G4Element* O= new G4Element("Oxygen","O",8.,16.00*g/mole);
3 G4Material* H2O=new G4Material(name="Water",density= 1.000*g/cm3,2);
```

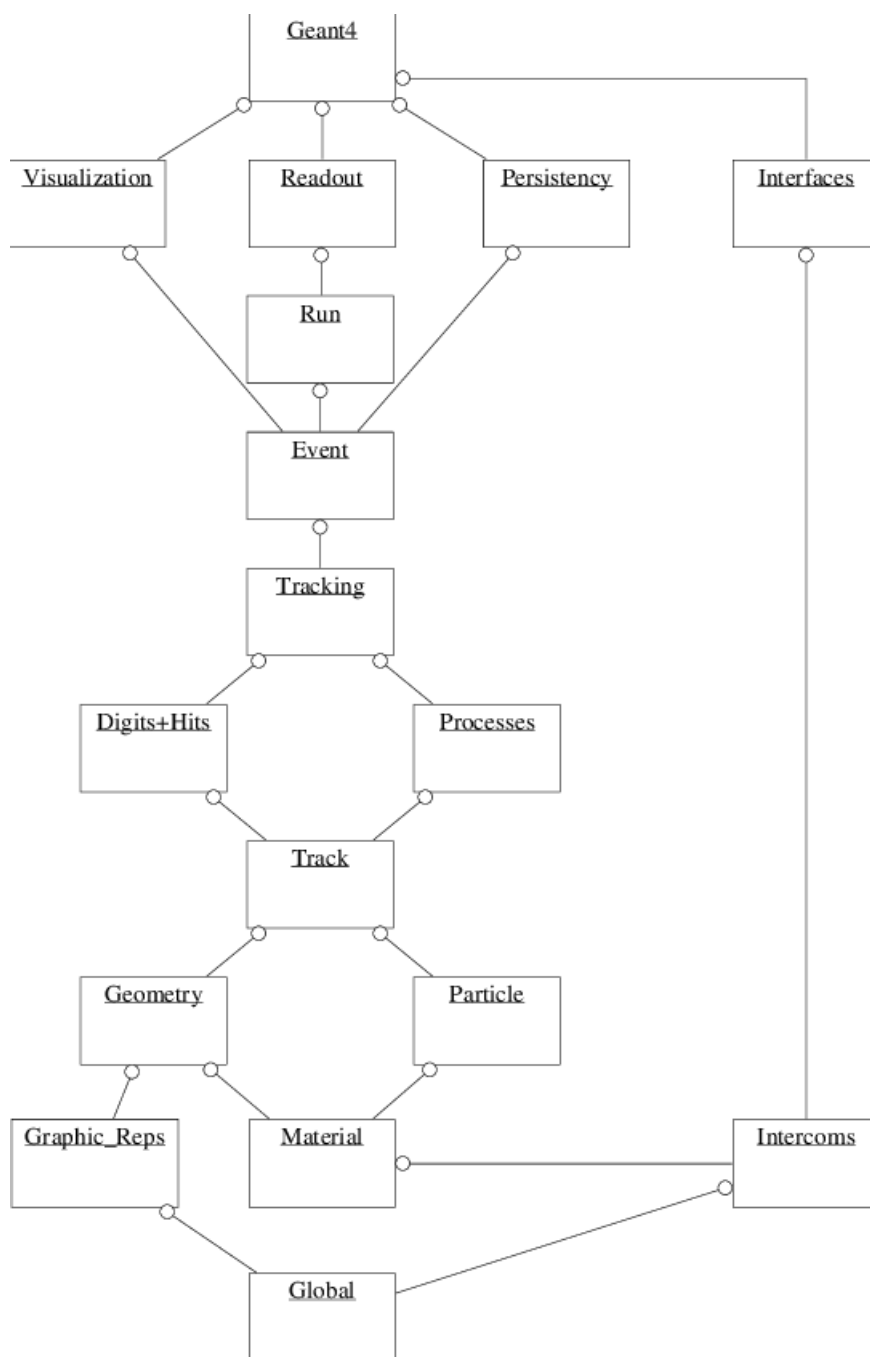


FIGURE 2.2 – Architecture globale de Geant4

```

4 H2O->AddElement(H, natoms=2);
5 H2O->AddElement(O, natoms=1);

```

La précision de la définition des matériaux est cruciale, car elle influence les interactions des particules, notamment les pertes d'énergie et la production de particules secondaires.

2.2.2.1.2 Création des volumes

La création des volumes repose sur une hiérarchie de trois types de volumes, définis dans Geant4 pour représenter la géométrie de la simulation.

- **Volume solide** : Le volume solide, défini via la classe `G4VSolid`, représente la forme géométrique de l'objet. Geant4 propose des primitives géométriques telles que `G4Box` (parallélépipède), `G4Tubs` (cylindre) ou `G4Sphere` (sphère)(figure 2.3). Par exemple, un détecteur cubique peut être modélisé avec `G4Box("Detector", 10*cm, 10*cm, 10*cm)`. Des formes complexes peuvent être créées en combinant des solides via des opérations booléennes (union, soustraction, intersection).

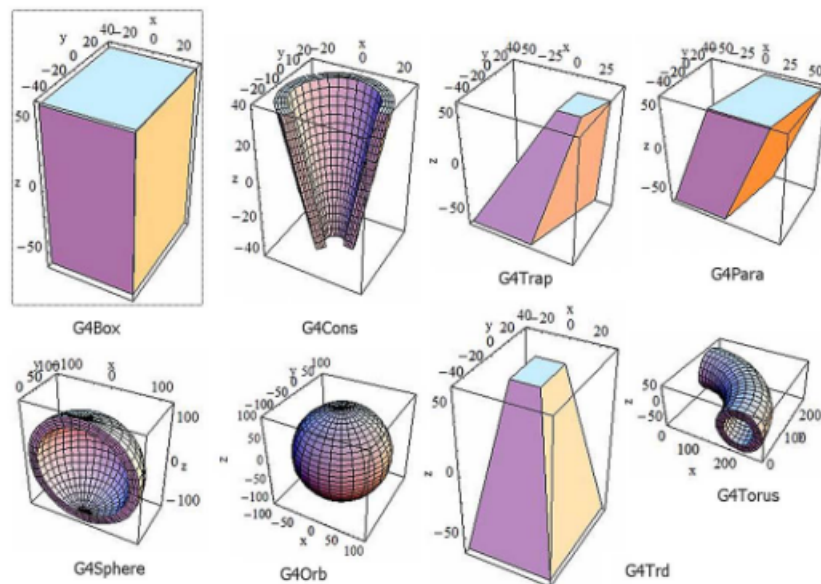


FIGURE 2.3 – Illustration de quelques géométries basiques en Geant4.[19]

- **Volume logique** : Le volume logique, créé avec `G4LogicalVolume`, associe un volume solide

à un matériau et définit ses propriétés physiques, comme la sensibilité aux interactions (ex. : détecteur actif). Il sert d'intermédiaire entre le solide géométrique et son placement dans l'espace.

- **Volume physique** : Le volume physique, instancié via `G4PVPlacement`, positionne le volume logique dans l'espace global de la simulation, en spécifiant ses coordonnées, sa rotation et son volume parent. Par exemple, un détecteur peut être placé dans un volume monde (`World`) avec `G4PVPlacement(nullptr, G4ThreeVector(0,0,0), logicalVolume, "Detector", worldVolume, false, 0)`. Cette étape finalise la géométrie en définissant la hiérarchie spatiale.

2.2.2.2 Génération des particules primaires

La génération des particules primaires est configurée via la classe `G4VUserPrimaryGeneratorAction`, qui définit les caractéristiques des particules initiant chaque événement. Geant4 permet de spécifier :

- **Type de particule** : Ex. : proton, gamma, neutron.
- **Énergie** : Par exemple, 14 MeV pour un faisceau de neutron.
- **Direction** : Vecteur unitaire ou distribution angulaire (ex. : faisceau collimaté).
- **Point d'origine** : Coordonnées dans l'espace, souvent au bord de la géométrie.

Les particules peuvent être générées manuellement via `G4ParticleGun`, qui permet un contrôle précis des paramètres. Par exemple, pour définir une source de neutron qui contient 700 particules, avec une énergie primaire de 1000 MeV et qui voyage dans la direction de l'axe des x , on écrit :

```

1  G4int n_particle = 1000;
2  fParticleGun  = new G4ParticleGun(n_particle);
3  G4ParticleDefinition* particle
4      = G4ParticleTable::GetParticleTable()->FindParticle("neutron");
5  fParticleGun->SetParticleDefinition(particle);
6  fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(1.,0.,0.));

```

```
7 fParticleGun->SetParticleEnergy(14*MeV);  
8 fParticleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(0.*cm,0.*cm,0.*cm));
```

Cette étape est essentielle pour initialiser la simulation et garantir que les conditions initiales reflètent le scénario physique étudié.

2.2.2.3 Définition des processus physiques et des modèles

La spécification des processus physiques et des modèles associés est assurée via la classe `G4VUserPhysicsList`. Les processus décrivent les types d'interactions possibles entre les particules et la matière, et sont généralement regroupés en plusieurs catégories :

- **Processus électromagnétiques** : tels que l'ionisation, la diffusion Compton, et l'effet photoélectrique.
- **Processus hadroniques** : incluant la spallation, la fragmentation nucléaire, et les interactions nucléon-nucléon ou noyau-noyau.
- **Autres processus** : comme les interactions optiques (ex. scintillation, Tcherenkov) ou les processus de désintégration radioactive.

Chaque processus est modélisé à l'aide d'un ou plusieurs modèles physiques, qui déterminent les sections efficaces et les lois de probabilité associées aux interactions. Par exemple :

- Pour les ions lourds, le modèle `G4ionIonisation` simule les pertes d'énergie par ionisation, tandis que `G4QMDReaction` permet de modéliser la fragmentation nucléaire via la dynamique quantique moléculaire (QMD).
- Des listes physiques prédéfinies, telles que `FTFP_BERT` ou `QGSP_BIC`, combinent plusieurs modèles adaptés à différentes gammes d'énergie et types de particules. Par exemple, `QGSP_BIC` est souvent recommandé pour la simulation d'ions lourds en hadronthérapie.

Le choix des modèles et des listes physiques influence directement la précision et le coût computationnel de la simulation. Les utilisateurs peuvent personnaliser les listes physiques pour optimiser

les performances, par exemple en limitant les processus aux interactions pertinentes pour leur application. Le tableau 2.1 illustre les modèles et les listes de physique associées, ainsi que les plages d'énergie correspondantes, mis en œuvre pour les nucléons et les mésons légers dans Geant4 (version 10). Le tableau 2.2 présente les modèles et les listes de physique associées, ainsi que les plages d'énergie correspondantes, mises en œuvre pour les ions dans Geant4 (version 10). Lorsqu'une plage d'énergie est couverte par deux modèles, ces derniers sont combinés linéairement pour assurer une transition fluide entre les régimes.

L'utilisateur peut ajouter des classes optionnelles telles que *G4UserRunAction*, *G4UserEventAction*, *G4UserSteppingAction*, *G4UserStackingAction* et *G4UserTrackingAction* s'il souhaite récupérer des informations pendant la simulation. La Figure 2.4[24] présente les classes obligatoires ainsi que quelques classes optionnelles.

Model (protons)	QGSP_BERT_HP	QGSP_BIC_HP	QGSP_INCLXX_HP	FTFP_BERT_HP	Shielding
QGSP	12 GeV – 100 TeV	12 GeV – 100 TeV	15 GeV – 100 TeV	-	-
FTFP	9.5 GeV – 25 GeV	9.5 GeV – 25 GeV	-	3 GeV – 100 TeV	9.5 GeV – 100 TeV
Bertini Cascade	0 eV – 9.9 GeV	-	-	0 eV – 12 GeV	0 eV – 9.9 GeV
Binary Cascade	-	0 eV – 9.9 GeV	-	-	-
Precompound	-	-	0 eV – 2 MeV	-	-
INCL++v6.0	-	-	1 MeV – 20 GeV	-	-
Model (neutron)	QGSP_BERT_HP	QGSP_BIC_HP	QGSP_INCLXX_HP	FTFP_BERT_HP	Shielding
QGSP	12 GeV – 100 TeV	12 GeV – 100 TeV	15 GeV – 100 TeV	-	-
FTFP	9.5 GeV – 25 GeV	9.5 GeV – 25 GeV	-	3 GeV – 100 TeV	9.5 GeV – 100 TeV
Bertini Cascade	19.9 MeV – 9.9 GeV	-	-	19.9 MeV – 12 GeV	19.9 MeV – 9.9 GeV
Binary Cascade	-	19.9 MeV – 9.9 GeV	-	-	-
INCL++v6.0	-	-	19.9 MeV – 20 GeV	-	-
Model (Pions)	QGSP_BERT_HP	QGSP_BIC_HP	QGSP_INCLXX_HP	FTFP_BERT_HP	Shielding
QGSP	12 GeV – 100 TeV	12 GeV – 100 TeV	15 GeV – 100 TeV	-	-
FTFP	9.5 GeV – 25 GeV	4 GeV – 25 GeV	-	3 GeV – 100 TeV	9.5 GeV – 100 TeV
Bertini Cascade	0 eV – 9.9 GeV	0 eV – 5 GeV	-	0 eV – 12 GeV	0 eV – 9.9 GeV
INCL++v6.0	-	-	0 eV – 20 GeV	-	-
Model (Kaons)	QGSP_BERT_HP	QGSP_BIC_HP	QGSP_INCLXX_HP	FTFP_BERT_HP	Shielding
QGSP	12 GeV – 100 TeV	12 GeV – 100 TeV	14 GeV – 100 TeV	-	-
FTFP	9.5 GeV – 25 GeV	4 GeV – 25 GeV	-	3 GeV – 100 TeV	9.5 GeV – 100 TeV
Bertini Cascade	0 eV – 9.9 GeV	0 eV – 5 GeV	0 – 15 GeV	0 eV – 12 GeV	0 eV – 9.9 GeV

TABLE 2.1 – Plages d'énergie utilisées dans les constructeurs de physique inélastique hadronique pour les listes de physique de référence sélectionnées dans Geant4.10.[26]

Model (ions)	Standard	QMD	INCLXX
Binary Light-Ion Cascade	0 – 4 GeV/n	0 - 110 MeV/n	-
FTFP	2 GeV/n – 100 TeV/n	9.99 GeV/n – 1 TeV/n	2.9 GeV/n – 1 TeV/n
QMD	-	100 MeV/n – 10 GeV/n	-
INCL++v6.0	-	-	0 eV – 3 GeV/n

TABLE 2.2 – Plages d'énergie utilisées dans les constructeurs de physique inélastique des ions pour les listes de physique de référence sélectionnées dans Geant4.10.[26]

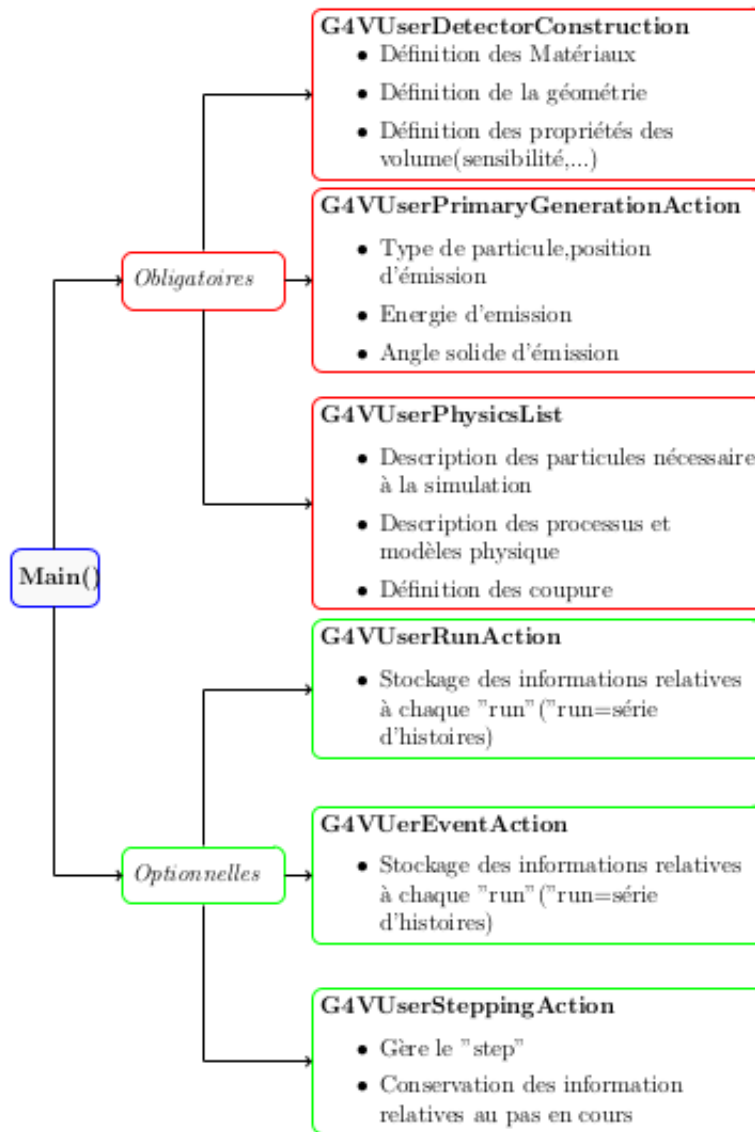


FIGURE 2.4 – Architecture minimale d'un code de simulation avec Geant4

Résultats et discussion

Les ions lourds de haute énergie présents dans les rayons cosmiques galactiques (GCR) représentent une source majeure de dose et de dose équivalente absorbées lors des missions en espace profond. Bien que le débit de dose associé aux GCR soit relativement faible — de l'ordre de quelques centaines de micrograys (μGy) par jour, il n'a pas constitué une contrainte critique pour les missions de courte durée. Toutefois, les futures missions impliquant des séjours prolongés dans l'espace ou des expéditions vers des destinations plus lointaines, comme Mars, feront de l'exposition cumulative aux rayonnements cosmiques un enjeu majeur, tant pour la santé des astronautes que pour la conception des systèmes de protection embarqués.

Même s'il est impossible de reproduire fidèlement en laboratoire la complexité du spectre des GCR, des études expérimentales et numériques menées à partir d'ions lourds de haute énergie représentatifs des GCR permettent d'obtenir des données précieuses pour l'optimisation du blindage contre les radiations spatiales. Ces ions, tels que ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{28}Si et ^{56}Fe , peuvent être générés dans des accélérateurs de particules ou modélisés à l'aide de simulations Monte Carlo.

Dans ce chapitre, nous utilisons le code Geant4 pour simuler l'interaction d'ions énergétiques avec divers matériaux envisagés pour la fabrication des structures de véhicules spatiaux, notamment l'aluminium (Al), le polyéthylène (PE, $(\text{CH}_2)_n$), l'hydru de lithium (LiH) et l'hydru de magnésium (MgH_2). Ces matériaux ont été sélectionnés en raison de leur intérêt dans plusieurs études, qui mettent en évidence leur capacité potentielle à atténuer efficacement les rayonnements

cosmiques galactiques (GCR) [27, 28, 29]. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer et de comparer les performances de ces matériaux en termes d'atténuation des GCR, d'identifier l'épaisseur optimale requise pour une protection efficace, et de déterminer les matériaux offrant les meilleures performances globales en fonction des différents types d'ions incidents, notamment ^{16}O , ^{28}Si et ^{56}Fe .

3.1 Validation du code Geant4

Avant de procéder à notre étude, il est essentiel de valider notre implémentation du code Geant4 (version 10.2.2) en reproduisant les résultats de référence de Pamisa et al. [30]. À cette fin, nous avons réalisé des simulations Monte Carlo avec des faisceaux de 10^6 protons d'une énergie de 160 MeV et de 10^6 ions carbone d'une énergie de 306.83 MeV/n, incident sur une cible d'eau de dimensions 250 mm $\times$ 250 mm $\times$ 250 mm. La figure 3.1 illustre l'interaction d'un faisceau de 500 ions carbone avec un cube rempli d'eau. La liste des processus physiques utilisés est présentée ci-dessous :

```

1  #include "PhysicsList.hh"
2  #include "G4SystemOfUnits.hh"
3  #include "G4UnitsTable.hh"
4  // EM Physics
5  #include "G4EmStandardPhysics_option4.hh"
6  // Hadronic Physics
7  #include "G4HadronElasticPhysicsHP.hh"
8  #include "G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP.hh"
9  #include "G4StoppingPhysics.hh"
10 #include "G4HadronPhysicsINCLXX.hh"
11 #include "G4HadronInelasticQBBC.hh"
12 #include "G4IonElasticPhysics.hh"
13 // Ion Physics
14 #include "G4IonINCLXXPhysics.hh"

```

```

15  #include "G4IonPhysics.hh"
16  // Decay Physics
17  #include "G4DecayPhysics.hh"
18  #include "G4RadioactiveDecayPhysics.hh"
19  #include "G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP.hh"
20  #include "G4StoppingPhysics.hh"
21  #include "GammaPhysics.hh"
22  #include "G4RadioactiveDecayPhysics.hh"
23
24  PhysicsList::PhysicsList()
25      : G4VModularPhysicsList()
26  {
27      G4int verb = 1;
28      SetVerboseLevel(verb);
29
30      new G4UnitDefinition("millielectronVolt", "meV", "Energy", 1.e-3 * eV);
31      new G4UnitDefinition("mm2/g", "mm2/g", "Surface/Mass", mm2/g);
32      new G4UnitDefinition("um2/mg", "um2/mg", "Surface/Mass", um * um / mg);
33
34      RegisterPhysics(new G4EmStandardPhysics_option4());
35      RegisterPhysics(new G4HadronElasticPhysicsHP(verb));
36      RegisterPhysics(new G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP(verb));
37      RegisterPhysics(new G4IonElasticPhysics(verb));
38      RegisterPhysics(new G4IonINCLXXPhysics(verb));
39      RegisterPhysics(new G4StoppingPhysics(verb));
40      RegisterPhysics(new G4DecayPhysics());
41      RegisterPhysics(new GammaPhysics("gamma"));
42      RegisterPhysics(new G4RadioactiveDecayPhysics());
43  }
44
45  PhysicsList::~~PhysicsList() {}
46

```

```
47 void PhysicsList::SetCuts()  
48 {  
49     SetCutValue(1 * mm, "proton");  
50     SetCutValue(1 * mm, "e-");  
51     SetCutValue(1 * mm, "e+");  
52     SetCutValue(1 * mm, "gamma");  
53 }
```

La figure 3.2 illustre les profils de pénétration des protons et des ions carbone dans la cible. Nos résultats montrent un bon accord avec ceux obtenus par Pamisa et al. [30], confirmant ainsi la validité et la fiabilité de notre code pour les simulations ultérieures.

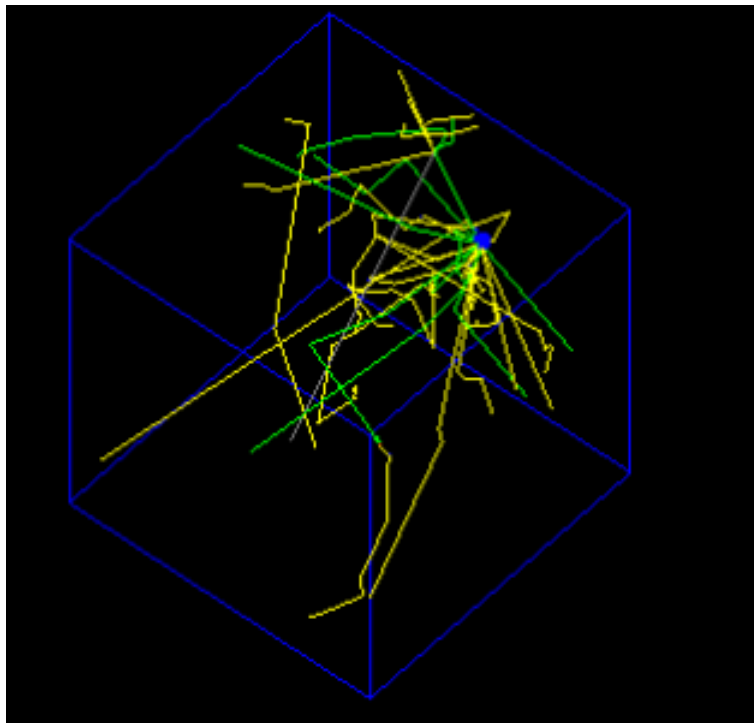


FIGURE 3.1 – Illustration graphique de l'interaction d'un faisceau de 500 ions carbone avec un cube rempli d'eau, réalisée avec le code Geant4. Chaque couleur représente une particule : bleu (électrons), vert (neutrons), rouge (protons), jaune (photons gamma).

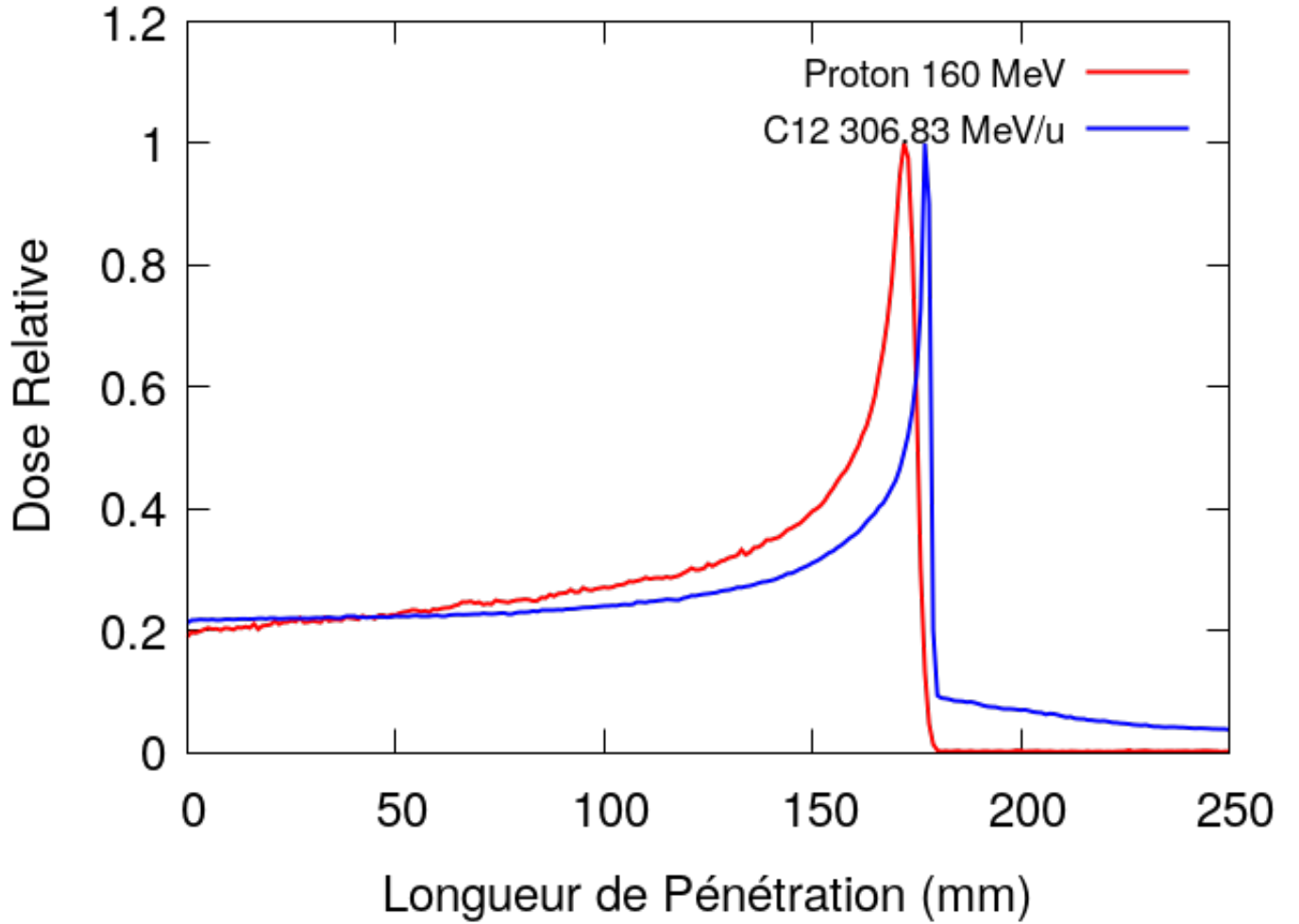


FIGURE 3.2 – Profil du dépôt d'énergie en fonction de la longueur de pénétration des protons et ions de carbone primaires dans l'eau. Les dépôt sont normalisées par rapport à leurs valeurs maximales.

3.2 Interactions des ions lourds avec les matériaux de blindage

Dans cette section, nous examinons l'efficacité de blindage des matériaux suivants : l'aluminium (Al), le polyéthylène (PE, $(\text{CH}_2)_n$), l'hydruure de lithium (LiH) et l'hydruure de magnésium (MgH_2). Les ions considérés sont les ions d'oxygène (^{16}O) à une énergie de 380 MeV par nucléon, les ions

de silicium (^{28}Si) à 290 MeV par nucléon et les ions de fer (^{56}Fe) à 1 GeV par nucléon. Ce choix est justifié par le fait que ces faisceaux d'ions lourds représentent l'une des principales composantes des rayonnements cosmiques galactiques (GCR)[31].

3.2.1 Interaction des ions d'oxygène-matériaux de blindage

3.2.1.1 Profil d'énergie déposée

Dans cette section, nous avons bombardé chaque cible avec 10^6 ions de silicium (^{28}Si) d'une énergie de 290 MeV/n. L'annexe A présente une partie du fichier de sortie issu de l'interaction des ions de silicium avec l'hydru de lithium LiH, ce fichier détaillant les différents processus en jeu ainsi que leurs caractéristiques. La figure 3.3 illustre les profils d'énergie déposée par des ions d'oxygène (^{16}O) de 380 MeV par nucléon interagissant avec différents matériaux de blindage. Les pics de Bragg, correspondant au dépôt maximal d'énergie avant l'arrêt des ions, sont clairement visibles. Leurs profondeurs varient selon les propriétés des matériaux : environ 88 mm pour l'aluminium (Al), 144.14 mm pour l'hydru de magnésium (MgH_2), 194.89 mm pour le polyéthylène (PE) et 246.16 mm pour l'hydru de lithium (LiH). Ces différences reflètent les capacités d'arrêt des matériaux, influencées par leur densité et leur teneur en hydrogène. L'aluminium, plus dense, montre une profondeur de Bragg réduite, indiquant une interaction plus rapide avec les ions et une apparente efficacité pour stopper les ions primaires. Cependant, l'évaluation d'un blindage ne se limite pas à cet aspect. La production de neutrons secondaires, représentant un risque pour les astronautes et les équipements électroniques, doit également être considérée. Ce point sera approfondi dans la section suivante, pour une analyse complète des performances de ces matériaux en matière de protection contre les radiations spatiales.

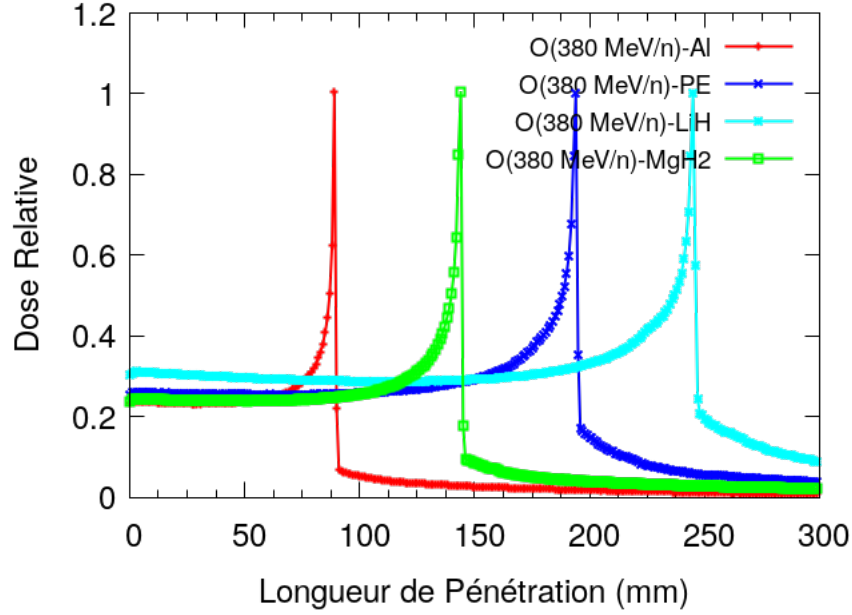
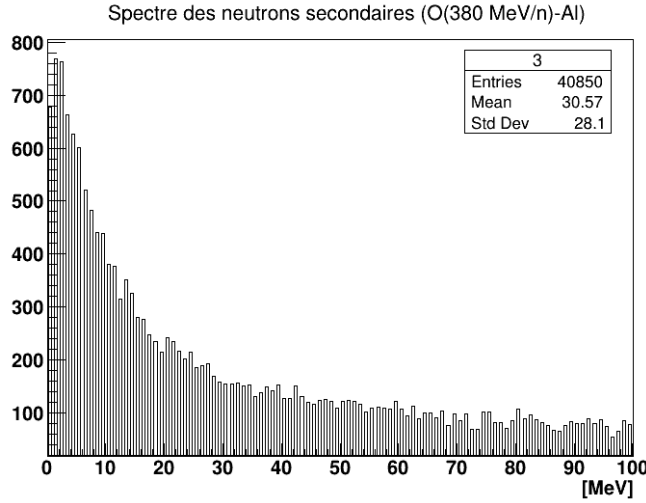


FIGURE 3.3 – Profil du dépôt d'énergie relative en fonction de la profondeur de pénétration des ions d'oxygène primaires d'une énergie de 380 MeV/n dans l'aluminium, le polyéthylène (PE), l'hydrure de lithium (LiH) et l'hydrure de magnésium (MgH₂).

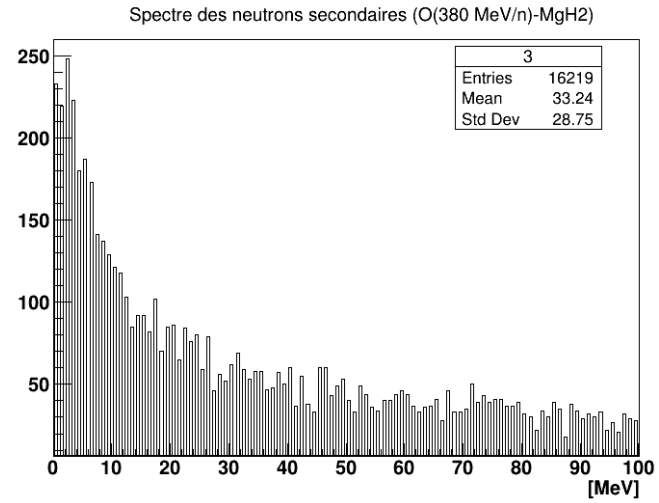
3.2.1.2 Distribution des neutrons secondaires

Dans le cadre de cette étude, les matériaux de blindage aluminium (Al), polyéthylène (PE), hydrure de magnésium (MgH₂) et hydrure de lithium (LiH) ont été soumis à un faisceau de 10^6 ions d'oxygène (^{16}O) d'une énergie de 380 MeV/n, avec une épaisseur identique pour chaque échantillon, afin d'évaluer la production de neutrons secondaires et leur spectre énergétique. Les résultats (voir figure 3.4) montrent que l'aluminium produit le plus grand nombre de neutrons secondaires (40850), suivi par MgH₂ (16219), LiH (11994) et PE (11294), tandis que l'analyse des spectres énergétiques révèle un pic de production dominant dans la plage de 10 à 20 MeV pour tous les matériaux, avec des énergies moyennes distinctes : 30.57 MeV pour Al, 33.24 MeV pour MgH₂, 33.42 MeV pour LiH et 34.31 MeV pour PE, accompagnées d'écart-types élevés (environ 28 à 29 MeV) indiquant une large dispersion énergétique. Ces différences, influencées par la densité et la teneur en hydrogène des matériaux, soulignent l'importance de leur composition dans la gestion des neutrons secondaires, un enjeu critique pour la radioprotection spatiale. Bien que l'aluminium arrête les ions primaires

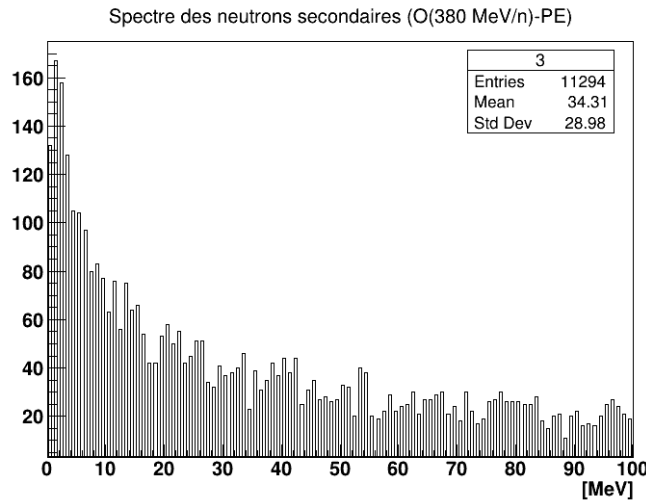
plus rapidement, il génère davantage de neutrons, tandis que le polyéthylène et les hydrures, grâce à leur richesse en hydrogène, offrent une atténuation plus efficace des neutrons secondaires avec une masse réduite, le PE et LiH se distinguant comme le plus efficace grâce à son faible rendement de neutrons et ses densité moindre (0.93 g/cm^3 pour PE, 0.78 g/cm^3 pour LiH), optimisant ainsi le compromis entre protection radiologique et contraintes de masse pour les applications spatiales.



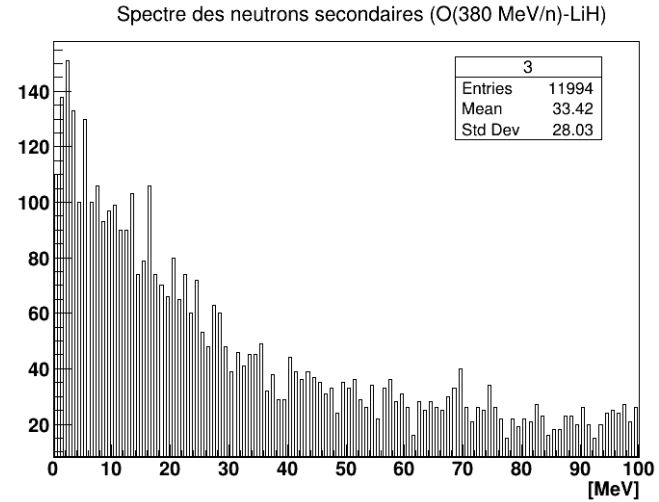
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 3.4 – Spectre des neutrons secondaires produit lors l'interaction des ions d'oxygène primaires d'une énergie de 380 MeV/n avec (a) l'aluminium, (b) l'hydrure de magnésium MgH₂, (c) le polyéthylène (PE) et (d) l'hydrure de lithium (LiH)

3.2.1.3 Dose absorbée

Dans cette section, nous analysons la dose absorbée par différents matériaux de blindage dans le cadre des simulations effectuées. La figure 3.5 illustre la dose absorbée par l'aluminium (Al), le polyéthylène (PE), l'hydrure de lithium (LiH) et l'hydrure de magnésium (MgH₂), lorsqu'ils sont soumis à un faisceau d'ions d'oxygène (¹⁶O) à 380 MeV/n. Les résultats indiquent que l'hydrure de lithium (LiH) présente la dose absorbée la plus élevée avec 9.83×10^{-5} Gy, suivi de près par le polyéthylène (PE) avec 9.34×10^{-5} Gy, tandis que l'hydrure de magnésium (MgH₂) affiche une dose de 6.21×10^{-5} Gy, et l'aluminium (Al) la plus faible avec 3.49×10^{-5} . Ces résultats, mettent en évidence une dépendance significative de la dose absorbée aux propriétés des matériaux, notamment leur teneur en hydrogène et leur densité : les matériaux riches en hydrogène comme LiH et PE absorbent davantage de rayonnement, probablement en raison de leur capacité à modérer les neutrons secondaires, tandis que l'aluminium, plus dense et moins efficace contre ces particules, montre une dose réduite. Cette analyse confirme l'importance de sélectionner des matériaux adaptés pour la radioprotection spatiale, où une dose absorbée élevée peut indiquer une meilleure atténuation des radiations secondaires, bien que cela doive être équilibré avec des contraintes de masse, LiH et PE se distinguant comme des options prometteuses malgré leurs densités faibles par rapport à Al. Nos résultats sont en bon accord avec ceux trouvés par Abdullahi et al[29].

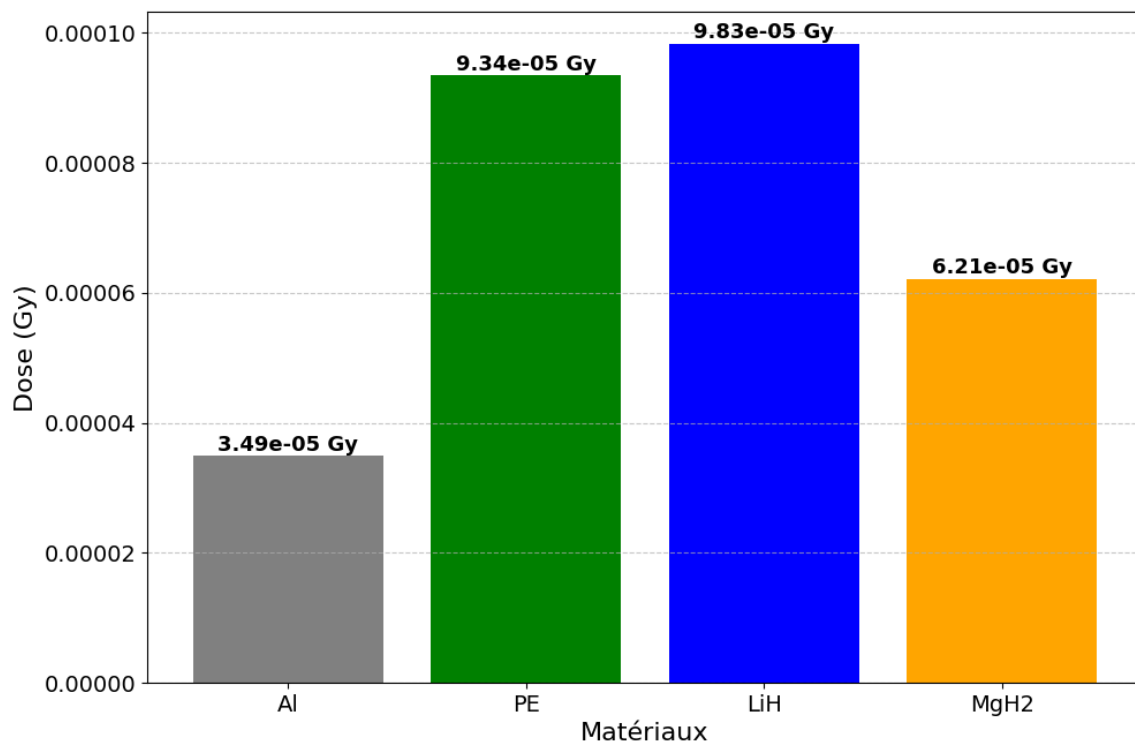


FIGURE 3.5 – Dose absorbée par l'aluminium (Al), le polyéthylène (PE), l'hydrure de lithium (LiH) et l'hydrure de magnésium (MgH₂) lors de l'interaction avec des ions d'oxygène (¹⁶O) primaires d'une énergie de 380 MeV par nucléon.

3.2.2 Interaction des ions de silicium-matériaux de blindage

Dans cette sous-section, nous analysons l'interaction des ions de silicium ^{28}Si à 290 MeV/n par nucléon avec les matériaux de blindage aluminium (Al), polyéthylène (PE), hydrure de lithium (LiH), et hydrure de magnésium (MgH_2). Les profils d'énergie déposée, similaires à ceux des ions d'oxygène, présentent des pics de Bragg dont les profondeurs varient en fonction de la densité et de la teneur en hydrogène des matériaux, avec l'aluminium montrant une profondeur réduite indicative d'une interaction rapide. La production de neutrons secondaires reste élevée pour l'aluminium, tandis que PE et LiH affichent des rendements plus faibles, accompagnés de spectres énergétiques dominants dans la plage de 0 à 20 MeV. La dose absorbée est plus prononcée pour LiH et PE, reflétant leur capacité à modérer les neutrons secondaires, un résultat cohérent avec les observations précédentes.

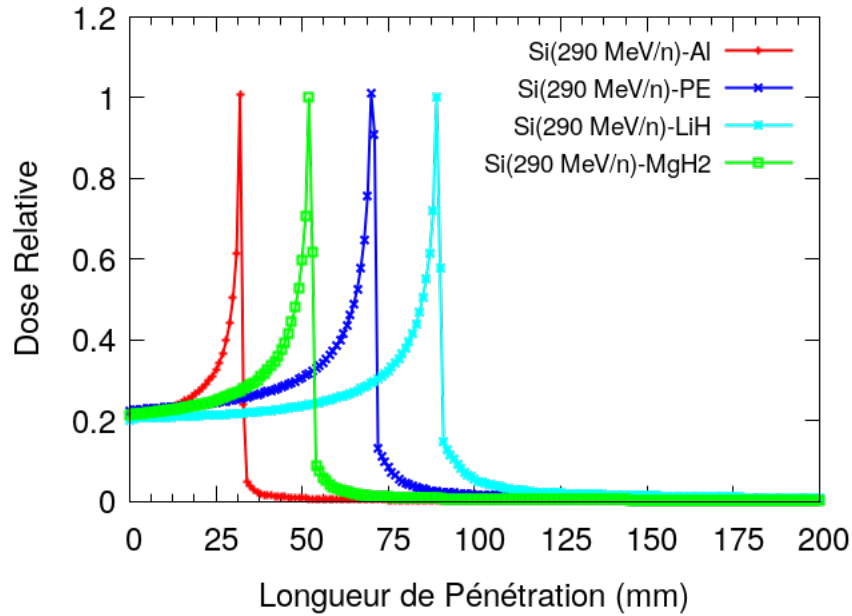
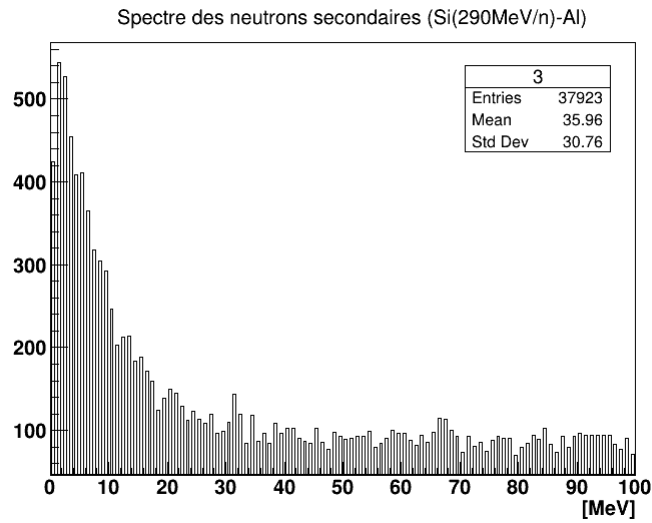
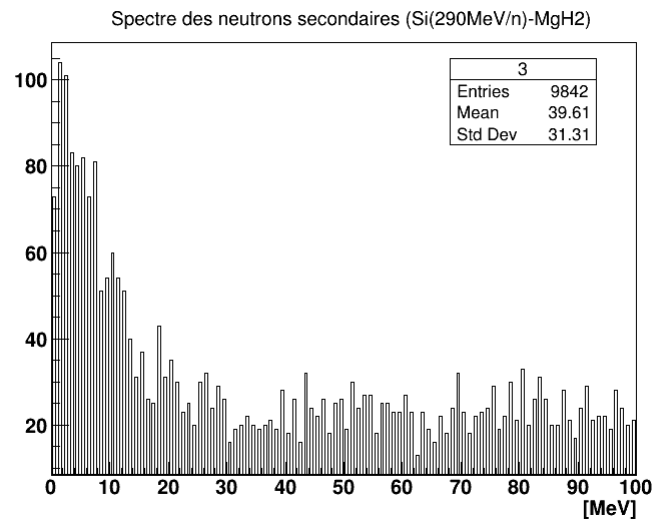


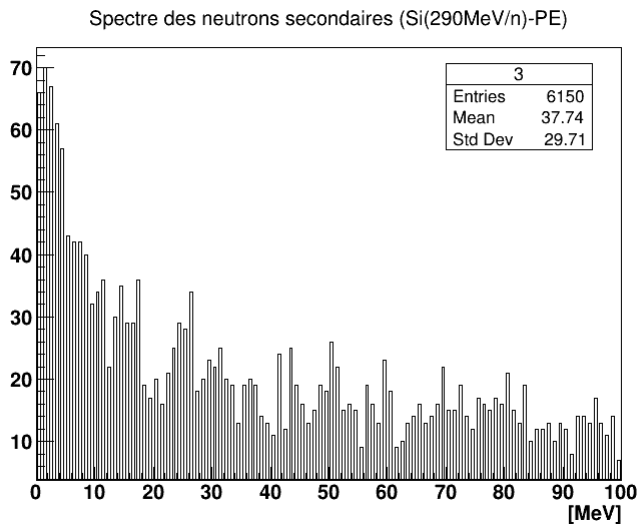
FIGURE 3.6 – Profil du dépôt d'énergie relative en fonction de la profondeur de pénétration des ions de silicium primaires d'une énergie de 290 MeV/n dans l'aluminium, le polyéthylène (PE), l'hydrure de lithium (LiH) et l'hydrure de magnésium (MgH_2).



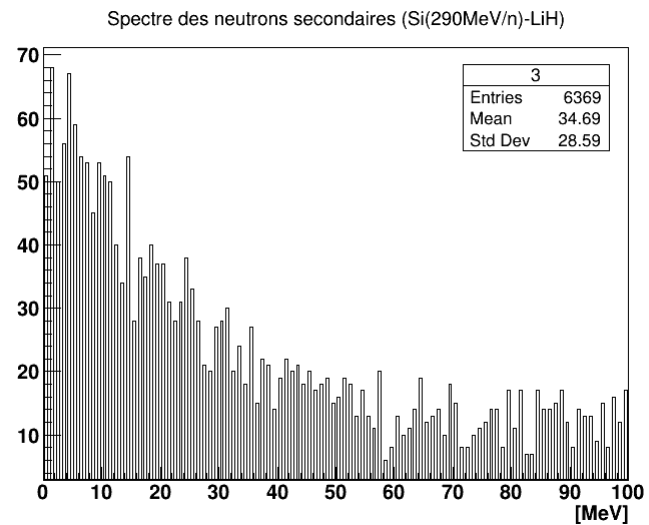
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 3.7 – Spectre des neutrons secondaires produit lors l'interaction des ions de silicium primaires d'une énergie de 290 MeV/n avec (a) l'aluminium, (b) l'hydru de magnésium MgH₂, (c) le polyéthylène (PE) et (d) l'hydru de lithium (LiH)

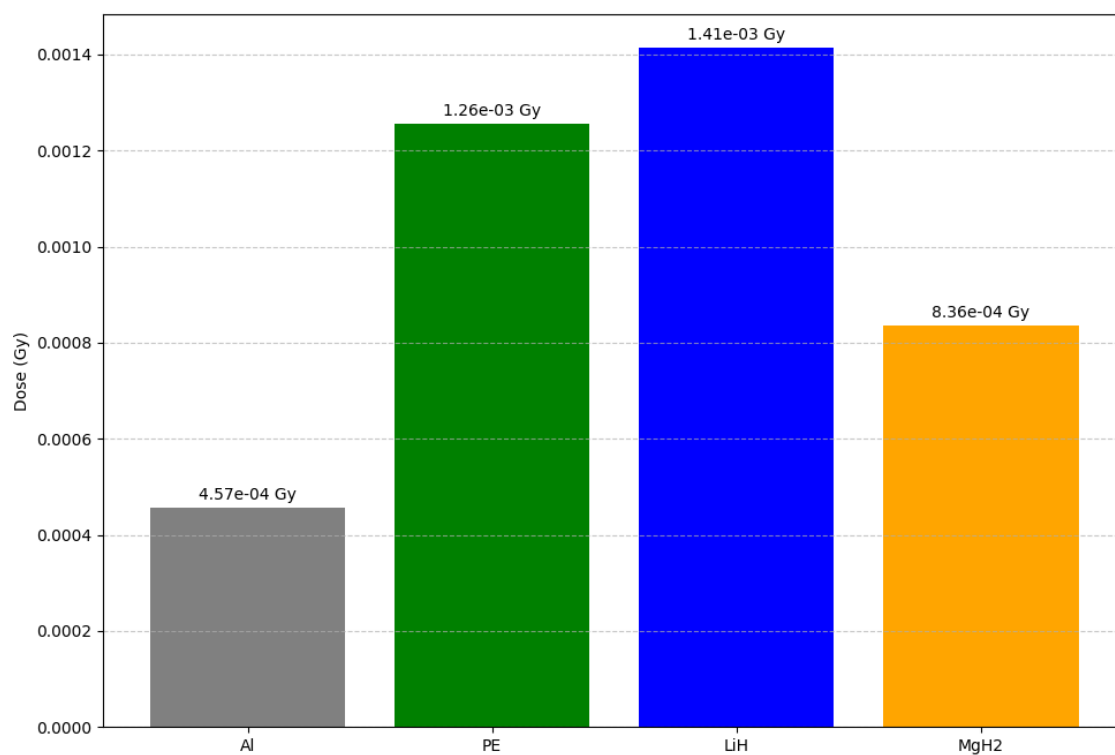


FIGURE 3.8 – Dose absorbée par l’aluminium (Al), le polyéthylène (PE), l’hydrure de lithium (LiH) et l’hydrure de magnésium (MgH₂) lors de l’interaction avec des ions de silicium (²⁸Si) primaires d’une énergie de 290 MeV par nucléon.

3.2.3 Interaction des ions de fer-matériaux de blindage

Cette sous-section examine l'interaction des ions de fer ^{56}Fe à 1 GeV/n avec les matériaux de blindage aluminium (Al), polyéthylène (PE), hydrure de lithium (LiH), et hydrure de magnésium (MgH_2). Les profils d'énergie déposée suivent une tendance comparable à celle des ions d'oxygène, avec des pics de Bragg dépendant des propriétés des matériaux, l'aluminium se distinguant par une profondeur moindre due à sa densité élevée. La production de neutrons secondaires demeure significative pour l'aluminium, tandis que PE et LiH présentent des rendements réduits, avec des spectres énergétiques centrés autour de 0 à 20 MeV. La dose absorbée, plus élevée pour LiH et PE, confirme leur efficacité à atténuer les radiations secondaires, en ligne avec les résultats obtenus pour les ions d'oxygène.

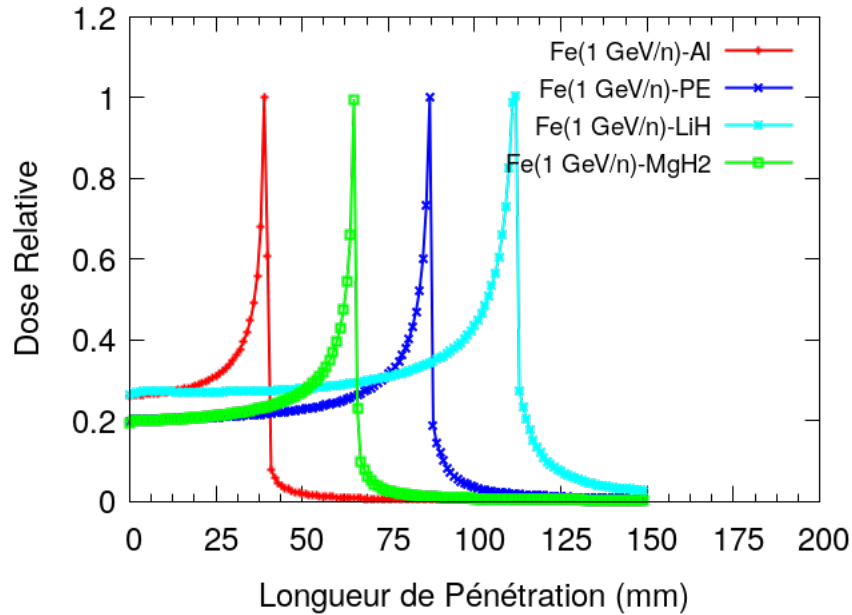
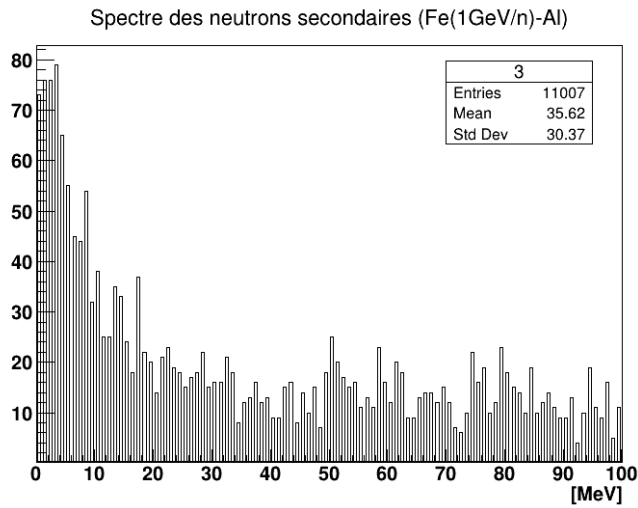
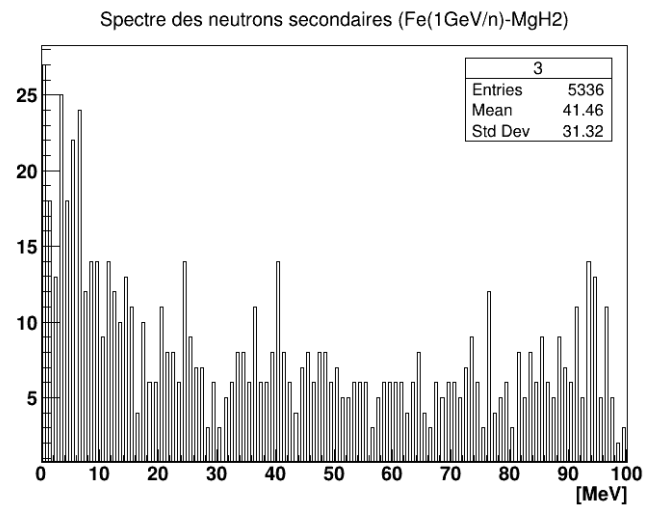


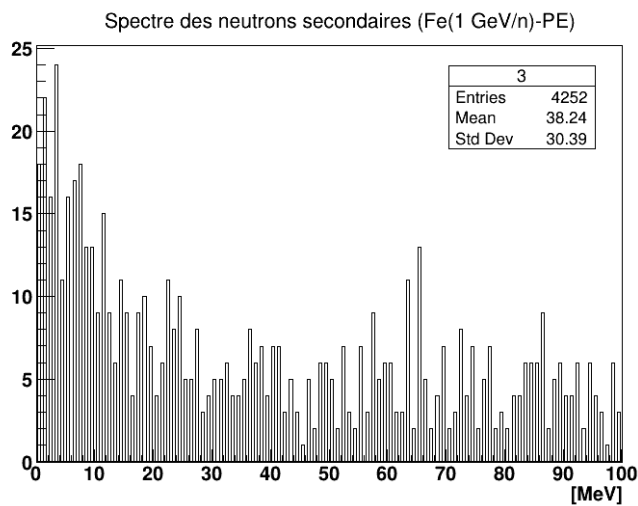
FIGURE 3.9 – Profil du dépôt d'énergie relative en fonction de la profondeur de pénétration des ions de fer primaires d'une énergie de 1 GeV/n dans l'aluminium, le polyéthylène (PE), l'hydrure de lithium (LiH) et l'hydrure de magnésium (MgH_2).



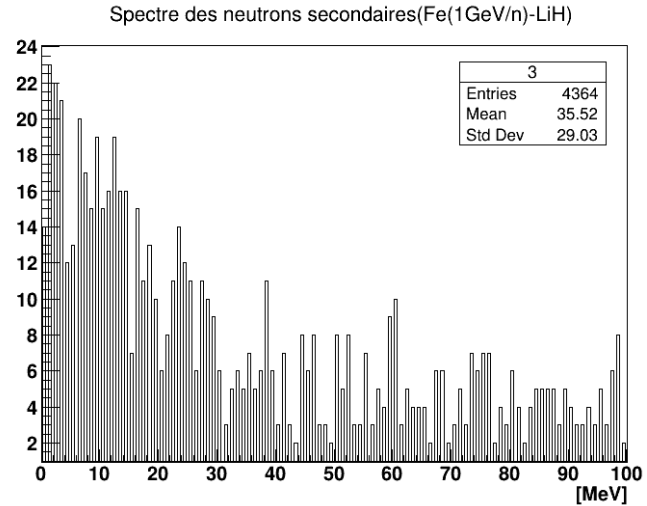
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 3.10 – Spectre des neutrons secondaires produit lors l'interaction des ions de fer primaires d'une énergie de 1 GeV/n avec (a) l'aluminium, (b) l'hydrure de magnésium MgH₂, (c) le polyéthylène (PE) et (d) l'hydrure de lithium (LiH)

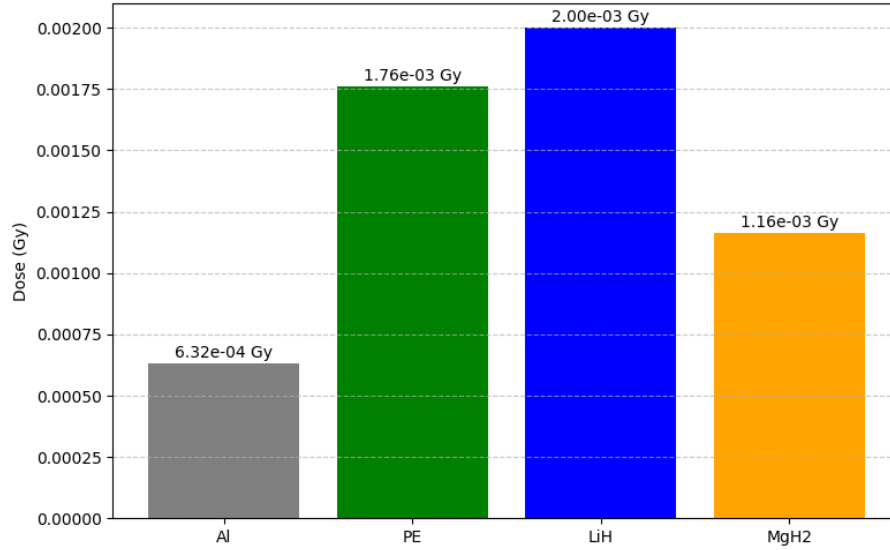


FIGURE 3.11 – Dose absorbée par l’aluminium (Al), le polyéthylène (PE), l’hydrure de lithium (LiH) et l’hydrure de magnésium (MgH₂) lors de l’interaction avec des ions de fer (⁵⁶Fe) primaires d’une énergie de 1 GeV par nucléon.

3.3 Propositions pour améliorer l’efficacité du blindage

Pour optimiser l’efficacité des matériaux de blindage et minimiser la production de neutrons secondaires, plusieurs stratégies peuvent être envisagées, s’appuyant sur des recherches récentes :

- **Incorporation de bore** : Le bore, grâce à sa forte section efficace de capture des neutrons via la réaction $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, peut être intégré dans des matériaux riches en hydrogène comme le PE ou LiH. Par exemple, l’ajout de carbure de bore B₄C[32] ou de nitrure de bore BN peut réduire l’impact des neutrons secondaires tout en maintenant une densité faible. Une étude de la NASA[33] a démontré que des matériaux contenant hydrogène, bore et azote offrent une protection efficace contre les rayonnements cosmiques galactiques (GCR) et les neutrons secondaires.
- **Techniques multicouches** : Une approche multicouche, combinant une couche riche en hydrogène (comme PE ou LiH) pour modérer les neutrons et une couche contenant du bore pour les capturer, peut maximiser l’efficacité globale. Des recherches ont montré que des struc-

tures multicouches réduisent l'exposition aux radiations spatiales, y compris les particules énergétiques solaires (SEP)[34].

- **Nanocomposites** : L'intégration de nanostructures, telles que les nanotubes de nitrure de bore (BNNT), dans des matrices polymères riches en hydrogène améliore à la fois les propriétés mécaniques et le blindage radiologique. Une étude récente a rapporté une efficacité de blindage de 13.56% contre les neutrons pour des nanocomposites renforcés au bore[35].
- **Validation expérimentale** : Ces propositions doivent être validées par des tests en accélérateurs ou des simulations avancées pour confirmer leur efficacité dans des environnements réels de rayonnement spatial.

Conclusion Générale

Cette étude a permis d'évaluer l'efficacité de différents matériaux de blindage : aluminium (Al), polyéthylène (PE), hydrure de lithium (LiH) et hydrure de magnésium (MgH_2) face aux rayonnements cosmiques galactiques (GCR), en simulant l'interaction d'ions lourds (^{16}O à 380 MeV/n, ^{28}Si à 290 MeV/n, et ^{56}Fe à 1 GeV/n à l'aide de l'outil de simulation Monte Carlo Geant4 (version 10.2.2). Les résultats révèlent que l'aluminium, bien qu'efficace pour arrêter les ions primaires grâce à une profondeur de Bragg réduite (88 mm pour ^{16}O), génère un nombre élevé de neutrons secondaires (40850), augmentant les risques radiologiques pour les astronautes et les équipements électroniques. En revanche, le polyéthylène et l'hydrure de lithium, avec des rendements de neutrons plus faibles (11294 pour PE et 11994 pour LiH) et des doses absorbées élevées 9.34×10^{-5} Gy pour PE et 9.83×10^{-5} Gy pour LiH, se distinguent comme des solutions optimales, offrant un équilibre entre protection radiologique et contraintes de masse grâce à leurs densités réduites 0.93 g/cm^3 pour PE et 0.78 g/cm^3 pour LiH. Les ions de silicium et de fer, bien que plus pénétrants en raison de leurs énergies élevées, confirment ces tendances, soulignant l'importance des matériaux riches en hydrogène pour atténuer les radiations secondaires. Pour améliorer davantage l'efficacité des blindages, des stratégies prometteuses ont été proposées, telles que l'incorporation de bore pour capturer les neutrons via la réaction $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, l'utilisation de structures multicouches combinant des couches riches en hydrogène et borées, et le développement de nanocomposites intégrant des nanotubes de nitrure de bore (BNNT). Ces avancées pourraient non seulement renforcer la protection des astronautes lors de missions habitées, mais aussi accroître la fiabilité des satellites

miniaturisés en orbites élevées, où les rayonnements sont plus intenses. Enfin, ce travail met en lumière l'importance des outils de simulation comme Geant4 pour optimiser la conception des blindages spatiaux, ouvrant la voie à des recherches futures sur des matériaux innovants et des configurations multicouches adaptées aux défis des environnements radiatifs extrêmes.

Output file de l'interaction : 10^6 ^{16}O (380 MeV/n) avec LiH

```

1  =====
2  HADRONIC PROCESSES SUMMARY (verbose level 1)
3  -----
4  Hadronic Processes for GenericIon
5
6  Process: ionElastic
7      Model:          NNDiffuseElastic: 0 eV /n ---> 1 TeV/n
8  Cr_sctns: Glauber-Gribov nucleus nucleus: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
9      Cr_sctns:          GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
10
11 Process: ionInelastic
12     Model:          INCL++ v5.2.9.5: 0 eV /n ---> 54 GeV/n
13     Model:          FTFP: 53.9 GeV/n ---> 1 TeV/n
14 Cr_sctns: Glauber-Gribov nucleus nucleus: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
15     Cr_sctns:          GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
16
17 -----
18 Hadronic Processes for He3
19
20 Process: hadElastic
21     Model:          hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n
22 Cr_sctns: Glauber-Gribov nucleus nucleus: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
23     Cr_sctns:          GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
24
25 Process: He3Inelastic
26     Model:          INCL++ v5.2.9.5: 0 eV /n ---> 9 GeV/n
27     Model:          FTFP: 8.9 GeV/n ---> 1 TeV/n
28 Cr_sctns: Glauber-Gribov nucleus nucleus: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
29     Cr_sctns:          GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
30
31 -----
32 Hadronic Processes for alpha
33
34 Process: hadElastic
35     Model:          hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n

```

```

36 Cr_sctns:          GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
37
38 Process: alphaInelastic
39     Model:          INCL++ v5.2.9.5: 0 eV /n ---> 12 GeV/n
40     Model:          FTFP: 11.9 GeV/n ---> 1 TeV/n
41 Cr_sctns: Glauber-Gribov nucleus nucleus: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
42     Cr_sctns:          GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
43
44 -----
45                         Hadronic Processes for anti_He3
46
47 Process: hadElastic
48     Model:          hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100.1 MeV/n
49     Model:          AntiAElastic: 100 MeV/n ---> 100 TeV/n
50 Cr_sctns:          AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
51     Cr_sctns:          GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
52
53 Process: anti_He3Inelastic
54     Model:          FTFP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n
55 Cr_sctns:          AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
56     Cr_sctns:          GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
57
58 Process: hFritiofCaptureAtRest
59 -----
60                         Hadronic Processes for anti_alpha
61
62 Process: hadElastic
63     Model:          hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100.1 MeV/n
64     Model:          AntiAElastic: 100 MeV/n ---> 100 TeV/n
65 Cr_sctns:          AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
66     Cr_sctns:          GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
67
68 Process: anti_alphaInelastic
69     Model:          FTFP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n
70 Cr_sctns:          AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
71     Cr_sctns:          GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
72
73 Process: hFritiofCaptureAtRest
74 -----
75                         Hadronic Processes for anti_deuteron
76
77 Process: hadElastic
78     Model:          hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100.1 MeV/n
79     Model:          AntiAElastic: 100 MeV/n ---> 100 TeV/n
80 Cr_sctns:          AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
81     Cr_sctns:          GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
82
83 Process: anti_deuteronInelastic
84     Model:          FTFP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n
85 Cr_sctns:          AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
86     Cr_sctns:          GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
87
88 Process: hFritiofCaptureAtRest
89 -----

```

```

90             Hadronic Processes for anti_neutron
91
92     Process: hadElastic
93         Model:             hElasticLHEP: 0 eV ---> 100 TeV
94     Cr_sctns:             GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
95
96     Process: anti_neutronInelastic
97         Model:             FTFP: 0 eV ---> 100 TeV
98     Cr_sctns:             AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
99         Cr_sctns:         GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
100
101 -----
102             Hadronic Processes for anti_proton
103
104     Process: hadElastic
105         Model:             hElasticLHEP: 0 eV ---> 100.1 MeV
106         Model:             AntiAElastic: 100 MeV ---> 100 TeV
107     Cr_sctns:             AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
108         Cr_sctns:         GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
109
110     Process: anti_protonInelastic
111         Model:             FTFP: 0 eV ---> 100 TeV
112     Cr_sctns:             AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
113         Cr_sctns:         GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
114
115     Process: hFritiofCaptureAtRest
116 -----
117             Hadronic Processes for anti_triton
118
119     Process: hadElastic
120         Model:             hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100.1 MeV/n
121         Model:             AntiAElastic: 100 MeV/n ---> 100 TeV/n
122     Cr_sctns:             AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
123         Cr_sctns:         GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
124
125     Process: anti_tritonInelastic
126         Model:             FTFP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n
127     Cr_sctns:             AntiAGlauber: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
128         Cr_sctns:         GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
129
130     Process: hFritiofCaptureAtRest
131 -----
132             Hadronic Processes for deuteron
133
134     Process: hadElastic
135         Model:             hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n
136     Cr_sctns:             GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
137
138     Process: dInelastic
139         Model:             INCL++ v5.2.9.5: 0 eV /n ---> 6 GeV/n
140         Model:             FTFP: 5.9 GeV/n ---> 1 TeV/n
141     Cr_sctns: Glauber-Gribov nucleus nucleus: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
142         Cr_sctns:         GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
143

```

```

144 -----
145             Hadronic Processes for gamma
146
147     Process: photonNuclear
148           Model:             BertiniCascade: 0 eV   ---> 10 GeV
149 Cr_sctns:             PhotoNuclearXS: 0 eV   ---> 100 TeV
150           Cr_sctns:             GheishaInelastic: 0 eV   ---> 100 TeV
151
152 -----
153             Hadronic Processes for kaon+
154
155     Process: hadElastic
156           Model:             hElasticLHEP: 0 eV   ---> 100 TeV
157 Cr_sctns:             GheishaElastic: 0 eV   ---> 100 TeV
158
159     Process: kaon+Inelastic
160           Model:             FTFP: 4 GeV   ---> 100 TeV
161           Model:             BertiniCascade: 0 eV   ---> 5 GeV
162 Cr_sctns:             Glauber-Gribov: 0 eV   ---> 2.88022e+295 J
163           Cr_sctns:             GheishaInelastic: 0 eV   ---> 100 TeV
164
165 -----
166             Hadronic Processes for kaon-
167
168     Process: hadElastic
169           Model:             hElasticLHEP: 0 eV   ---> 100 TeV
170 Cr_sctns:             GheishaElastic: 0 eV   ---> 100 TeV
171
172     Process: kaon-Inelastic
173           Model:             FTFP: 4 GeV   ---> 100 TeV
174           Model:             BertiniCascade: 0 eV   ---> 5 GeV
175 Cr_sctns:             Glauber-Gribov: 0 eV   ---> 2.88022e+295 J
176           Cr_sctns:             GheishaInelastic: 0 eV   ---> 100 TeV
177
178     Process: hBertiniCaptureAtRest
179 -----
180             Hadronic Processes for lambda
181
182     Process: hadElastic
183           Model:             hElasticLHEP: 0 eV   ---> 100 TeV
184 Cr_sctns:             GheishaElastic: 0 eV   ---> 100 TeV
185
186     Process: lambdaInelastic
187           Model:             BertiniCascade: 0 eV   ---> 6 GeV
188           Model:             FTFP: 2 GeV   ---> 100 TeV
189 Cr_sctns:             ChipsHyperonInelasticXS: 0 eV   ---> 100 TeV
190           Cr_sctns:             GheishaInelastic: 0 eV   ---> 100 TeV
191
192 -----
193             Hadronic Processes for mu-
194
195     Process: muMinusCaptureAtRest
196 -----
197             Hadronic Processes for neutron

```

```

198
199 Process: hadElastic
200 Model: hElasticCHIPS: 19.5 MeV ---> 100 TeV
201 Model: NeutronHPElastic: 0 eV ---> 20 MeV
202 Cr_sctns: NeutronHPElasticXS: 0 eV ---> 20 MeV
203 Cr_sctns: G4NeutronElasticXS: 0 eV ---> 100 TeV
204 Cr_sctns: GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
205
206 Process: neutronInelastic
207 Model: FTFP: 4 GeV ---> 100 TeV
208 Model: BertiniCascade: 19.9 MeV ---> 5 GeV
209 Model: NeutronHPInelastic: 0 eV ---> 20 MeV
210 Cr_sctns: NeutronHPInelasticXS: 0 eV ---> 20 MeV
211 Cr_sctns: Barashenkov-Glauber: 0 eV ---> 100 TeV
212 Cr_sctns: GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
213
214 Process: nCapture
215 Model: NeutronHPCapture: 0 eV ---> 20 MeV
216 Model: nRadCapture: 19.9 MeV ---> 100 TeV
217 Cr_sctns: NeutronHPCaptureXS: 0 eV ---> 20 MeV
218 Cr_sctns: G4NeutronCaptureXS: 0 eV ---> 100 TeV
219 Cr_sctns: NeutronHPCaptureXS: 0 eV ---> 20 MeV
220 Cr_sctns: GheishaCaptureXS: 0 eV ---> 100 TeV
221
222 Process: nFission
223 Model: NeutronHPFission: 0 eV ---> 20 MeV
224 Model: G4LFission: 19.9 MeV ---> 2.88022e+295 J
225 Cr_sctns: NeutronHPFissionXS: 0 eV ---> 20 MeV
226 Cr_sctns: GheishaFissionXS: 0 eV ---> 100 TeV
227
228 -----
229 Hadronic Processes for pi+
230
231 Process: hadElastic
232 Model: hElasticLHEP: 0 eV ---> 1.0001 GeV
233 Model: hElasticGlauber: 1 GeV ---> 100 TeV
234 Cr_sctns: Barashenkov-Glauber: 0 eV ---> 100 TeV
235 Cr_sctns: GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
236
237 Process: pi+Inelastic
238 Model: FTFP: 4 GeV ---> 100 TeV
239 Model: BertiniCascade: 0 eV ---> 5 GeV
240 Cr_sctns: G4CrossSectionPairGG: 0 eV ---> 100 TeV
241 G4CrossSectionPairGG: G4PiNuclearCrossSection cross
    sections
242 below 91 GeV, Glauber-Gribov above
243 Cr_sctns: GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
244
245 -----
246 Hadronic Processes for pi-
247
248 Process: hadElastic
249 Model: hElasticLHEP: 0 eV ---> 1.0001 GeV
250 Model: hElasticGlauber: 1 GeV ---> 100 TeV

```

```

251 Cr_sctns:      Barashenkov-Glauber: 0 eV ---> 100 TeV
252      Cr_sctns:      GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
253
254      Process: pi-Inelastic
255      Model:      FTFP: 4 GeV ---> 100 TeV
256      Model:      BertiniCascade: 0 eV ---> 5 GeV
257 Cr_sctns:      G4CrossSectionPairGG: 0 eV ---> 100 TeV
258      G4CrossSectionPairGG: G4PiNuclearCrossSection cross
      sections
259 below 91 GeV, Glauber-Gribov above
260 Cr_sctns:      GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
261
262      Process: hBertiniCaptureAtRest
263 -----
264      Hadronic Processes for proton
265
266      Process: hadElastic
267      Model:      hElasticCHIPS: 0 eV ---> 100 TeV
268 Cr_sctns:      ChipsProtonElasticXS: 0 eV ---> 100 TeV
269      Cr_sctns:      GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
270
271      Process: protonInelastic
272      Model:      FTFP: 4 GeV ---> 100 TeV
273      Model:      BertiniCascade: 0 eV ---> 5 GeV
274 Cr_sctns:      Barashenkov-Glauber: 0 eV ---> 100 TeV
275      Cr_sctns:      GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
276
277 -----
278      Hadronic Processes for triton
279
280      Process: hadElastic
281      Model:      hElasticLHEP: 0 eV /n ---> 100 TeV/n
282 Cr_sctns:      GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV
283
284      Process: tInelastic
285      Model:      INCL++ v5.2.9.5: 0 eV /n ---> 9 GeV/n
286      Model:      FTFP: 8.9 GeV/n ---> 1 TeV/n
287 Cr_sctns: Glauber-Gribov nucleus nucleus: 0 eV ---> 2.88022e+295 J
288      Cr_sctns:      GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV
289
290 List of generated particles:
291 B10:      188      Emean = 3.6346 GeV ( 3.0475 GeV --> 4.0599 GeV)
292 B11:      168      Emean = 4.0356 GeV ( 3.505 GeV --> 4.5526 GeV)
293 B12:      23      Emean = 4.3171 GeV ( 3.4713 GeV --> 4.7017 GeV)
294 B13:      1      Emean = 4.6248 GeV ( 4.6248 GeV --> 4.6248 GeV)
295 B15:      1      Emean = 5.4817 GeV ( 5.4817 GeV --> 5.4817 GeV)
296 B8:      1      Emean = 2.2021 GeV ( 2.2021 GeV --> 2.2021 GeV)
297 Be10:     46      Emean = 3.6104 GeV ( 3.0884 GeV --> 4.0809 GeV)
298 Be7:      199      Emean = 2.4674 GeV ( 1.9664 GeV --> 3.0737 GeV)
299 Be9:      64      Emean = 3.2326 GeV ( 2.7969 GeV --> 3.6576 GeV)
300 C10:      45      Emean = 3.6661 GeV ( 3.2067 GeV --> 4.01 GeV)
301 C11:      199      Emean = 4.0409 GeV ( 3.4521 GeV --> 4.5073 GeV)
302 C12:      211      Emean = 4.4129 GeV ( 3.8781 GeV --> 5.0545 GeV)
303 C13:      120      Emean = 4.7392 GeV ( 4.1974 GeV --> 5.2626 GeV)

```

```

304 C14:      54  Emean =  5.1554 GeV ( 4.8214 GeV --> 5.4432 GeV)
305 He3:     897  Emean = 778.59 MeV ( 341.34 keV --> 1.573 GeV)
306 He5:       9  Emean = 12.668 MeV ( 1.0832 MeV --> 35.691 MeV)
307 He6:     101  Emean = 721.16 MeV ( 1.3806 MeV --> 2.8695 GeV)
308 Li5:       3  Emean =  7.5722 MeV ( 4.0751 MeV --> 10.427 MeV)
309 Li6:     383  Emean =  1.5013 GeV ( 2.2573 MeV --> 2.8514 GeV)
310 Li7:     195  Emean =  2.4337 GeV ( 1.3916 GeV --> 2.9775 GeV)
311 Li8:      55  Emean =   2.765 GeV ( 1.2094 GeV --> 3.5578 GeV)
312 N13:      60  Emean =  4.7325 GeV ( 4.0719 GeV --> 5.0441 GeV)
313 N14:     367  Emean =  5.1802 GeV ( 4.6075 GeV --> 5.5815 GeV)
314 N15:     390  Emean =  5.5857 GeV ( 5.1298 GeV --> 5.8908 GeV)
315 N16:       2  Emean =  5.9448 GeV ( 5.8779 GeV --> 6.0117 GeV)
316 O14:       4  Emean =  5.2386 GeV ( 5.0547 GeV --> 5.4838 GeV)
317 O15:     320  Emean =  5.5983 GeV ( 4.9282 GeV --> 5.9624 GeV)
318 O16:      25  Emean =  5.9148 GeV ( 5.487 GeV --> 6.0632 GeV)
319 O17:       1  Emean =   6.004 GeV ( 6.004 GeV --> 6.004 GeV)
320 alpha:   4594  Emean =   1.0609 GeV ( 78.395 keV --> 2.431 GeV)
321 deuteron: 4628  Emean =   423.3 MeV ( 100.38 keV --> 1.5432 GeV)
322 e-: 989859  Emean =   491.53 keV ( 297.46 keV --> 1.0044 MeV)
323 gamma:   2139  Emean =   4.6641 MeV ( 123.82 eV --> 21.565 MeV)
324 neutron: 11994  Emean =   197.8 MeV ( 3.6119 keV --> 1.8695 GeV)
325 pi+:    187  Emean =  99.876 MeV ( 222.93 keV --> 321.1 MeV)
326 pi-:    191  Emean =  95.962 MeV ( 2.502 MeV --> 366.85 MeV)
327 pi0:    188  Emean =   87.51 MeV ( 1.83 MeV --> 360.99 MeV)
328 proton: 11118  Emean =  230.54 MeV ( 51.336 keV --> 1.2252 GeV)
329 triton:  1294  Emean =  602.15 MeV ( 66.813 keV --> 1.8237 GeV)

```

Bibliographie

- [1] L. Sihver and S. Mortazavi. Radiation Risks and Countermeasures for Humans on Deep Space Missions. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, (2019), pp. 1-10. doi: [10.1109/AERO.2019.8742175](https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8742175)
- [2] Alessandro Rizzo et al. Foundations of radiological protection in space : the integrated multidisciplinary approach for next manned missions in deep space. Eur. Phys. J. Plus (2023) 138 :1001. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04572-3>
- [3] Insoo Jun et al. A review on radiation environment pathways to impacts : Radiation effects, relevant empirical environment models, and future needs. Advances in Space Research. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.079>
- [4] C. G. Bruno, J. Glorius and P. J. Wood. Nuclear Astrophysical Reaction Studies Using Heavy Ion Storage Rings ,Nuclear Physics News, 33(3), 23-26. <https://doi.org/10.1080/10619127.2023.2230852>
- [5] Joseph R. Castro et al. Treatment of cancer with heavy charged particle, International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics. 8(12) (1982) 2191-2198 . [https://doi.org/10.1016/0360-3016\(82\)90569-7](https://doi.org/10.1016/0360-3016(82)90569-7)
- [6] Cornelius A. Tobias. The Future of Heavy-Ion Science in Biology and Medicine. Radiat Res 103 1-33 1985. <https://doi.org/10.2307/3576668>.
- [7] Carlo Cazzaniga et al. Measurements of ultra-high energy lead ions using silicon and diamond detectors,Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 985 (2021) 164671. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164671>

- [8] Valérien LALUCAA. Etude des effets singuliers produits par les particules énergétiques chargées de l'environnement radiatif spatial sur les capteurs d'images CMOS. Thèse de doctorat (2013). Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)
- [9] Beringer et al. Particle data group, Phys. Rev. D, vol. 86, no. 01001, (2012). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001>
- [10] RADIATION BIOLOGY : A HANDBOOK FOR TEACHERS AND STUDENTS. IAEA, VIENNA, 2010. IAEA-TCS-42. ISSN 1018-5518.
- [11] Zeitlin C and La Tessa C. The Role of Nuclear Fragmentation in Particle Therapy and Space Radiation Protection. Front. Oncol. 6 :65 (2016). doi: [10.3389/fonc.2016.00065](https://doi.org/10.3389/fonc.2016.00065)
- [12] Thomas Gorbine. Étude des réactions de spallation $^{136}\text{Xe} + p$ et $^{136}\text{Xe} + ^{12}\text{C}$ à 1 GeV par nucléon auprès de l'accélérateur GSI (Darmstadt, Allemagne). Thèse de doctorat (2011). Université PARIS-SUD XI. https://theses.hal.science/tel-00660583/file/VD2_GORBINET_THOMAS_10112011.pdf
- [13] Encinas et al. Quiescent adult neural stem cells are exceptionally sensitive to cosmic radiation. Experimental Neurology 210 (2008) 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2007.10.021>
- [14] <https://www.cusabio.com/receptor/Stem-Cell-Receptor.html>
- [15] Kolasinski, W. A. Effects of space radiation on electronic microcircuits. NASA, Langley Research Center, NASA(SDIO Space Environmental Effects on Materials Workshop, Part 2 (1989). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19890014178>
- [16] J. A. Pellish et al. Heavy Ion Testing With Iron at 1 GeV/amu. IEEE Transactions on Nuclear Science, 57, no. 5, (2010) 2948-2954. doi: [10.1109/TNS.2010.2066575](https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2066575)
- [17] Metropolis et al. Monte Carlo calculations on intranuclear cascades. I. Low-energy studies. Physical Review, 110, no 1, (1958) p. 185. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.185>
- [18] Agostinelli S, et al, GEANT4—a simulation toolkit. Nuclear instruments and methods in physics research section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 506 (3) (2003), 250-303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [19] J. Apostolakis et al. Geometry and physics of the Geant4 toolkit for high and medium energy applications. Radiation Physics and Chemistry 78 (2009) 859-873. doi: [10.1016/j.radphyschem.2009.04.026](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.04.026)
- [20] S Iskandar. Modified Monte Carlo method for integral. J. Phys. : Conf. Ser. 1462 (2020) 012061. doi: [10.1088/1742-6596/1462/1/012061](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1462/1/012061)

- [21] Vladimir Skavysh, Sofia Priazhkina, Diego Guala, Thomas R. Bromley. Quantum monte carlo for economics : Stress testing and macroeconomic deep learning. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 153, (2023), 104680. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2023.104680>
- [22] MOHAMED, M.O., DIB, A.S.A. BELBACHIR, A.H. Energy distribution of cosmic rays in the Earth's atmosphere and avionic area using Monte Carlo codes. *Pramana - J Phys* 87, 1 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12043-016-1210-1>
- [23] Flore Chappuis, Hoang Ngoc Tran, Sara A. Zein, Claude Bailat, Sébastien Incerti, François Bochud, Laurent Desorgher. The general-purpose Geant4 Monte Carlo toolkit and its Geant4-DNA extension to investigate mechanisms underlying the FLASH effect in radiotherapy : Current status and challenges. *Physica Medica* 110, (2023), 102601. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102601>
- [24] Mounir Ould-Mohamed. Étude des Interactions des Particules Énergétiques Avec la Matière par la Méthode Monte Carlo. Thèse de doctorat (2018). Université USTO-MB. http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=2717
- [25] Antoni, R., Bourgois, L. Principe de la méthode de Monte-Carlo appliquée aux calculs de dosimétrie et de radioprotection. In : *Physique appliquée à l'exposition externe. Ingénierie et Développement Durable*.(2013) Springer, Paris. https://doi.org/10.1007/978-2-8178-0311-1_6
- [26] Mesick K. E., Feldman W. C., Coupland D. D. S., Stonehill L. C. Benchmarking Geant4 for simulating galactic cosmic ray interactions within planetary bodies. *Earth and Space Science*, 5 (2018) 324-338. <https://doi.org/10.1029/2018EA000400>
- [27] S. Guetersloh, C. Zeitlin, L. Heilbronn, J. Miller, T. Komiyama, A. Fukumura, Y. Iwata , T. Murakami, M. Bhattacharya. Polyethylene as a radiation shielding standard in simulated cosmic-ray environments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms*, 252 (2006) 319-332. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2006.08.019>
- [28] Felix Horst, Daria Boscolo, Marco Durante, Francesca Luoni, Christoph Schuy, Uli Weber. Thick shielding against galactic cosmic radiation : A Monte Carlo study with focus on the role of secondary neutrons. *Life Sciences in Space Research* 33 (2022) 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.03.003>
- [29] Abdullahi Ahmed,M N Maharaz,Chifu E. Ndikilar. Investigation of The Shielding Properties of Hydrides as a Shielding Material for Space Radiation Protection Using Geant4 Mon-

- tecarlo Simulation. Dutse Journal of Pure and Applied Sciences (DUJOPAS),10 No. 4b (2024).<https://dx.doi.org/10.4314/dujopas.v10i4b.23>
- [30] D R Pamisa, V Convicto, A Lintasan, C T Quiñones. Monte Carlo Investigation of the Depth-dose Profile of Proton Beams and Carbon Ions in Water, Skeletal Muscle, Adipose Tissue, and Cortical Bone for Hadron Therapy Applications. *Journal of Physics : Conference Series* 1505 (2020) 012010. doi:[10.1088/1742-6596/1505/1/012010](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1505/1/012010)
- [31] Masayuki Naito et al. Applicability of composite materials for space radiation shielding of spacecraft. *Life Sciences in Space Research* 31 (2021) 71-79.<https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.08.004>
- [32] D.D. DiJulio, C.P. Cooper-Jensen, H. Perrey, K. Fissum, E. Rofors, J. Scherzinger, P.M. Bentley. A polyethylene-B4C based concrete for enhanced neutron shielding at neutron research facilities. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 859 (2017) 41-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.064>
- [33] Thibeault et al. Radiation Shielding Materials Containing Hydrogen, Boron, and Nitrogen : Systematic Computational and Experimental Study. *NASA Technical Reports Server* (2014). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160010096>
- [34] Ankit Gohel, Rajnikant Makwana. Multi-layered shielding materials for high energy space radiation. *Radiation Physics and Chemistry* 197 (2022) 110131.<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110131>
- [35] M. Özcan, C. Kaya, F. Kaya. Cosmic radiation shielding property of boron reinforced continuous fiber nanocomposites produced by electrospinning. *Discover Nano* 18 (2023) 152. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03940-3>

