

UNIVERSITE DE BLIDA-1

Faculté des sciences

Département de physique

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Rayonnements

Contribution à l'étude du ralentissement des ions lourds dans la matière.

Par :

FOUL Sihem

Devant le jury composé de :

M ^r . M. Kars	Professeur	U.S.D.B.1	Président
M ^r . R. KHELIFI	Professeur	U.S.D.B.1	Directeur de thèse
M ^r . M. CHEKIRINE	M.C.B	U.S.D.B.1	Co-Directeur de thèse
M ^r . M. OULD-MOHAMED	M.C.A	U.S.D.B.1	Examinateur
M ^r . B. BOUZID	Professeur	U.S.T.H.B	Examinateur

Blida, 2025

Remerciements

Je remercie tout d'abord «Allah» de m'avoir donné santé, courage, et volonté d'entamer et de finir cette thèse.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de physique théorique et de l'interaction Rayonnement-Matière à l'Université de Blida 1.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et ma gratitude au directeur de thèse en l'occurrence monsieur KHELIFI Rachid, Professeur à USDB1 pour le soutien, le contenu de ses conseils et sa disponibilité durant ma préparation de thèse. Qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et ma gratitude au co-directeur de thèse en l'occurrence monsieur CHEKIRINE Mamoun, MCB à USDB1, pour la qualité de son encadrement et sa bienveillance, ses compétences professionnelles, ses expériences fructueuses, la perfection sur laquelle il insiste dans son travail, ainsi que son soutien, le contenu de ses conseils et sa disponibilité durant ma préparation de thèse. Qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

Je remercie Monsieur KARS Mohamed Professeur à l'USDB1 de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Qu'il trouve ici le témoignage de ma gratitude et mon profond respect.

Je tiens également à remercier Messieurs BOUZID Boualem Professeur à USTHB, et OULD-MOHAMED Mounir MCA à USDB1 d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Enfin, j'adresse mes remerciements aux membres du laboratoire de physique théorique et de l'interaction Rayonnement-Matière de l'Université de Blida 1, sans oublier l'ensemble des professeurs qui ont contribué à ma formation depuis mon enfance.

Dédicaces

A mes très chers parents, aucune dédicace ne saurait être suffisante pour exprimer mes profonds respects et amours et ma sincère reconnaissance.

Je vous remercie pour tout l'amour, le soutien, l'encouragement et les sacrifices que vous me portez depuis mon enfance, que ce travail soit la réalisation de vos vœux.

Vos prières et vos bénédictions m'ont été d'une grande faveur pour mener à bien mon parcours d'étude.

Puisse Dieu le tout puissant, vous préserve, et vous accorde, santé, longue vie, et bonheur.

A mes chers et adorables frères et sœur, en témoignage de mon affection, tendresse, reconnaissance et amour que je porte pour vous, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé, et de succès, que Dieu, le très haut vous protège et vous bénisse.

A mes chers petits neveux et nièces. Que dieu vous protège, vous garde, et vous aide à réussir tout au long de vos chemins de vie.

C'est avec une vive émotion que je tiens à saluer la mémoire de monsieur BOUKRA Salah, qui avait si gentiment accepté de présider mon jury de thèse. Son décès a été une épreuve particulièrement pénible pour moi, mais aussi pour l'ensemble du milieu scientifique dont il était un membre si important.

Mais bien plus que son rôle à l'université, monsieur BOUKRA Salah était une personne que l'on respectait et que l'on admirait, dont l'engagement, et la gentillesse ont laissé une empreinte forte sur toutes les personnes qui ont eu la chance de le connaître et de travailler avec lui.

C'est donc avec une profonde émotion que je lui rends hommage aujourd'hui, et c'est à lui que je dédie avec respect et reconnaissance le résultat de ce long travail.

Je ne saurais oublier de dédier cette thèse aux défunts parents et épouse de Monsieur Chekirine Mamoun.

A la mémoire des parents de Monsieur Chekirine Mamoun.

A la mémoire de Madame Chekirine Naima, épouse de Monsieur Chekirine Mamoun.

ملخص

في هذا العمل، اقترحنا صيغتين لحساب قوة التوقف للجسيمات المشحونة المستنبطه من صيغة Bethe-Bloch المعدلة. تستند هذه التعبيرات بشكل أساسى إلى بيانات تجريبية دقيقة لقوة توقف البروتونات وكذلك الجسيمات α وهي مستقلة عن تصحيح الطبقة وإمكانات التأين وتأثير الكثافة. قمنا بحساب قوة التوقف ل O^{16} , He^4 , Li^7 , C^{12} , O^{16} , Al^{27} , Cu^{63} , Ag^{107} , Au^{197} في أهداف البوليبروبيلان، الميلار و البوليكربونات للطاقات من 1 إلى 14 MeV/n (منطقة .(Bethe

تمت مقارنة القيم المحسوبة بواسطة هاتين الصيغتين مع تلك التي تم الحصول عليها بواسطة صيغة Bethe-Bloch المعدلة، التي تم تقديمها تجريبيا وتم إنشاؤها بواسطة برامج المحاكاة SRIM-2013، PSTAR-ASTAR و MSTAR. تم العثور على توافق جيد بشكل خاص بين قيمنا و تلك التي تحددها صيغة Bethe-Bloch المعدلة، التي تم الحصول عليها تجريبيا وتم تجميعها بواسطة برنامج المحاكاة SRIM-2013.

تم إجراء مقارنة بين قيم قوة التوقف لأيون Li^7 في أهداف البوليكربونات، Ag^{107} , Au^{197} , Al^{27} , Cu^{63} التي تم الحصول عليها من خلال هاتين الصيغتين في نطاق الطاقة من 1 إلى 14 MeV / n. ولوحظ أن غالبية النقاط تتناظر مع برنامج المحاكاة SRIM-2013.

أخيرا، قمنا بتوسيع نطاق الطاقة من 1 إلى 120 MeV/n باستخدام قيم قوة التوقف للبروتونات في الأهداف Al^{27} و Ag^{107} الواردة في برامج المحاكاة SRIM-2013 و PSTAR، باستعمال الصيغة الأولى. قمنا بحساب قوة التوقف لأيونات O^{16} , He^4 , Al^{27} , Ag^{107} في هدفي على التوالي. تم العثور على تطابق ملحوظ بين قيمنا والقيم الناتجة عن برامج المحاكاة SRIM-2013، ASTAR و MSTAR. بالنسبة للطاقات $E \geq 3$ MeV/n، وجد أن الارتباطات أقل من 3%.

الكلمات المفتاحية : قوة التوقف، صيغة Bethe-Bloch المعدلة، PSTAR, ASTAR, SRIM-2013، Ag^{107} , Al^{27} , Cu^{63} , الميلار، البوليبروبيلان، البوليكربونات.

Résumé

Dans le présent travail, nous avons proposé deux expressions pour le calcul du pouvoir d'arrêt des particules chargées déduites à partir de la formule de Bethe-Bloch modifiée. Ces expressions sont basées principalement sur des données expérimentales précises du pouvoir d'arrêt des protons ainsi que les particules α et sont indépendantes de la correction de couche, du potentiel d'ionisation, de l'effet de densité. Nous avons calculé le pouvoir d'arrêt des ions ^1H , ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polypropylène, mylar et polycarbonate pour des énergies de 1 à 14 MeV/n (région de Bethe).

Les valeurs calculées par ces deux expressions ont été comparées avec celles obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées par les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR-ASTAR, MSTAR. Un bon accord a été trouvé particulièrement entre nos valeurs et celles déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, obtenues expérimentalement et compilées par le code de calcul SRIM-2013.

Une comparaison a été faite entre les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polycarbonate obtenues à travers ces deux expressions dans la gamme d'énergie de 1 à 14 MeV/n. On a remarqué que la majorité des points coïncident avec le code de calcul SRIM-2013.

Enfin, nous avons élargi la gamme d'énergie de 1 à 120 MeV/n en utilisant les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans les cibles ^{27}Al , ^{107}Ag compilées par les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR, en appliquant la première expression. Nous avons calculé le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^{16}O respectivement dans les cibles ^{27}Al , ^{107}Ag . Un accord remarquable est trouvé entre nos valeurs et les valeurs générées par les codes SRIM-2013, ASTAR et MSTAR. Pour des énergies $E \geq 3$ MeV/n, les écarts sont trouvés inférieurs à 3%.

Les mots clés : Pouvoir d'arrêt, Formule de Bethe-Bloch modifiée, SRIM-2013, PSTAR, ASTAR, MSTAR, ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polypropylène, mylar, polycarbonate.

Abstract

In the present work, we have proposed two expressions for the calculation of the stopping power for charged particles deduced from the modified Bethe-Bloch formula. These expressions are based mainly on accurate experimental data of the stopping power for protons as well as α -particles and are independent of the shell correction, the mean excitation energy and the density effect correction. We have calculated the stopping power of ^1H , ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O ions through ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polypropylene, mylar and polycarbonate for energies ranging from 1-14 MeV/n (Bethe region).

The values calculated by these two expressions were compared with those obtained by the modified Bethe-Bloch formula, given experimentally and generated through SRIM-2013, PSTAR-ASTAR, MSTAR calculation codes. A good agreement was found particularly between our values and those determined by the modified Bethe-Bloch formula, obtained experimentally and compiled by SRIM-2013 calculation code.

A comparison was made between the values of the stopping power for ^7Li ion in the targets ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polycarbonate obtained through these two expressions in the energy range 1-14 MeV/n. It was noticed that the majority of the points coincide with SRIM-2013 calculation code.

Finally, we extended the energy range from 1 to 120 MeV/n using the values of the proton's stopping power in ^{27}Al and ^{107}Ag targets compiled by SRIM-2013 and PSTAR calculation codes, applying the first expression. We calculated the stopping power of ^4He , ^{16}O ions in the ^{27}Al , ^{107}Ag targets, respectively. A remarkable agreement is found between our values and the values generated by SRIM-2013, ASTAR and MSTAR calculation codes. For energies $E \geq 3$ MeV/n, the deviations are found to be less than 3%.

Keywords: Stopping power, modified Bethe-Bloch formula, SRIM-2013, PSTAR, ASTAR, MSTAR, ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polypropylene, mylar, polycarbonate.

Contenu

INTRODUCTION GENERALE.....	17
CHAPITRE 1: RALENTISSEMENT DES PARTICULES CHARGEES DANS LA MATIERE.....	21
Introduction	21
Théories du pouvoir d'arrêt :	21
<i>Approches théoriques et tabulations semi-empiriques du pouvoir d'arrêt</i>	21
<i>Les mécanismes du ralentissement des particules chargées dans la matière</i>	22
1.1.2. Evaluation du ralentissement électronique des particules chargées à basse et à haute vitesse.....	22
1.1.3. Limites de validité du traitement classique de Bohr et quantique de Bethe	24
1.1.4. Description probabiliste de la perte d'énergie (Section efficace de Rutherford)	25
1.1.5. Première approche classique de Bohr.....	26
1.2.7. Deuxième approche classique de Bohr.....	27
1.2.8. Approche quantique de Bethe	28
1.2.9. Potentiel d'ionisation et d'excitation moyen I.....	28
1.2.10. Formule de Bethe-Bloch modifiée	29
1.2.11. Correction des couches atomiques C/Z2	30
1.2.12. Correction de l'effet de densité $\delta/2$	31
1.2.13. Correction de Barkas $Z_1 L_1$	31
1.2.14. Correction de Bloch $Z_1^2 L_2$	31
1.3. Pouvoir d'arrêt des composés.....	32
1.4. Définition de la charge effective	33
1.5. Expression théorique et semi empirique de la charge effective (Modèle BK-ZBL)	33
CHAPITRE 2: CORRECTION DE COUCHE, EXPRESSION DU POUVOIR D'ARRET ET CHARGE EFFECTIVE.	36
2.1. Introduction	36
2.2. Corrections des couches atomiques.....	36
2.2.1. Corrections des couches atomiques K et L	36
2.2.2. Corrections des couches atomiques M , N et $O-P$	38
2.2.3. Corrections des couches atomiques des cibles $^{27}_{13}Al$, $^{63}_{29}Cu$, $^{107}_{47}Ag$, $^{197}_{79}Au$	40
2.3. Expression du pouvoir d'arrêt	43
2.3.1. Paramétrisation du pouvoir d'arrêt basée sur $S_p(E)$	43
2.3.2. Paramétrisation du pouvoir d'arrêt basée sur $S_a(E)$	44
2.4. La charge effective	44
2.4.1. Description de la charge effective	44
2.4.2. Expression de la charge effective	45

CHAPITRE 3: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS.....	50
3.1. Introduction	50
3.2. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans les cibles monoatomiques ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au	50
3.2.1. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible ^{27}Al	54
3.2.2. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible ^{63}Cu	55
3.2.3. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible ^{107}Ag	56
3.2.4. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible ^{197}Au	58
3.3. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans les polymères	59
3.3.1. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polypropylène	60
3.3.2. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polycarbonate.....	61
3.4. Le pouvoir d'arrêt des protons dans les cibles monoatomiques ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag et ^{197}Au ..	63
3.4.1. Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{27}Al	66
3.4.2. Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{63}Cu	67
3.4.3. Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{107}Ag	68
3.4.4 Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{197}Au	68
3.5. Le pouvoir d'arrêt des protons dans les polymères	69
3.5.1. Le pouvoir d'arrêt des protons dans le mylar	71
3.5.2. Le pouvoir d'arrêt des protons dans le polycarbonate.....	72
3.6. Ecart sur le pouvoir d'arrêt de quelques ions par rapport aux expressions (2-16) et (2-19)	73
3.7. Comparaison entre les deux expressions (2-16) et (2-19) par rapport au code SRIM-2013 (application à l'ion 7Li dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polycarbonate).....	76
3.8. Extension de la gamme d'énergie à 120 MeV/n pour les ions 4He , ^{16}O traversant les cibles ^{27}Al et ^{107}Ag en utilisant l'expression (2-16)	81
3.9. Conclusion.....	81
CONCLUSION GENERALE	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87
Articles publiés et communications présentées	92
APPENDICE 1	94
Le logiciel SRIM	94
APPENDICE 2	96
Le logiciel MSTAR	96
APPENDICE 3	98

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : RALENTISSEMENT DES PARTICULES CHARGEES DANS LA MATIERE

Figure 1.1: Variation du pouvoir d'arrêt en fonction de l'énergie de la particule chargée incidente (15).	23
.....
Figure 1.2: Diffusion d'une particule (M_1, Z_1) par une cible (M_2, Z_2) dans le système du centre de masse (21).	25
.....
Figure 1.3: Correction des couches atomiques C/Z_2 , pour les éléments $^{12}_6C, ^{27}_{13}Al, ^{63}_{29}Cu, ^{107}_{47}Ag, ^{197}_{79}Au$ et $^{238}_{92}U$ prise du rapport ICRU-37 (34), obtenues par la procédure d'échelle semi empirique de Bichsel.....	30

CHAPITRE 2 : CORRECTTION DE COUCHE, EXPRESSION DU POUVOIR D'ARRET ET CHARGE EFFECTIVE

Figure 2.1: la variation de θ_K, θ_L en fonction de Z_2 (26).	38
Figure 2.2: La correction des différentes couches atomiques de la cible ^{197}Au (Valeurs prises du rapport de Janni) (45).	39
Figure 2.3: Les corrections de couches atomiques des éléments $^{27}Al, ^{63}Cu, ^{107}Ag$ et ^{197}Au calculées par le développement de Walske-Bischel (26-30).....	42
Figure 2.4.a: Le Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{27}Al	47
Figure 2.4.b: Le Pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la cible ^{27}Al	47
Figure 2.5: le pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la cible ^{27}Al pour différentes expressions de la charge effective.....	48

CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS

Figure 3.1: Pouvoir d'arrêt des protons dans les cibles $^{27}Al, ^{63}Cu, ^{107}Ag, ^{197}Au$, donné expérimentalement, calculé à travers la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilé par les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR.....	53
Figure 3.2: Pouvoir d'arrêt des ions $^4He, ^7Li, ^{12}C, ^{16}O$ dans la cible d' ^{27}Al déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.....	54
Figure 3.3: Pouvoir d'arrêt des ions $^4He, ^7Li, ^{12}C, ^{16}O$ dans la cible de ^{63}Cu déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et compilé à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.....	55
Figure 3.4: Pouvoir d'arrêt des ions $^4He, ^7Li, ^{12}C, ^{16}O$ dans la cible ^{107}Ag déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.....	57
Figure 3.5: Pouvoir d'arrêt des ions $^4He, ^7Li, ^{12}C, ^{16}O$ dans la cible d' ^{197}Au déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et compilé à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR et MSTAR.....	58

Figure 3.6: Pouvoirs d'arrêts des protons (Bethe, expérimental, SRIM, PSTAR) et des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polypropylène avec la présente expression (2-16), déterminés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donnés expérimentalement et compilés par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR et MSTAR.	60
Figure 3.7: Pouvoirs d'arrêts des protons (Bethe, expérimental, SRIM, PSTAR) et des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polycarbonate, avec la présente expression (2-16), déterminés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donnés expérimentalement et compilés par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR et MSTAR.	62
Figure 3.8: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, et compilées à travers les codes de calcul SRIM-2013 et ASTAR.	65
Figure 3.9: Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{27}Al , calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.	66
Figure 3.10: Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{63}Cu , calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.	67
Figure 3.11: Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{107}Ag , calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.	68
Figure 3.12: Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{197}Au , calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.	69
Figure 3.13: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le mylar, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.	70
Figure 3.14: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le polycarbonate, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.	71
Figure 3.15: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans le mylar, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et PSTAR.	71
Figure 3.16: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans le polycarbonate, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et PSTAR.	72
Figure 3.17: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts des protons dans la cible ^{63}Cu , donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013 par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-19).	73
Figure 3.18: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^4He dans la cible ^{27}Al , donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013 par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-16).	74
Figure 3.19: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^7Li dans le polypropylène, donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013 par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-16).	75
Figure 3.20: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^{12}C dans le polycarbonate, donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013, par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-16).	75

Figure 3.21: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^{16}O dans la cible ^{197}Au , donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013, par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-16).	76
Figure 3.22: Comparaison entre les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au et polycarbonate calculées par les expressions (2-16, 2-18), et compilées par le code SRIM-2013.....	77
Figure 3.23: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^7Li dans la cible ^{27}Al , calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.....	78
Figure 3.24: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^7Li dans la cible ^{63}Cu , calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.....	78
Figure 3.25: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^7Li dans la cible ^{107}Ag , calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.....	79
Figure 3.26: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^7Li dans la cible ^{197}Au , calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.....	79
Figure 3.27: Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^7Li dans le polycarbonate, calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.....	80
Figure 3.28: Pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^{16}O respectivement dans les cibles ^{27}Al et ^{107}Ag dans la gamme d'énergie 1-120 MeV/n en utilisant les valeurs générées par les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR dans l'expression (2-16).....	81

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2 : CORRECTTION DE COUCHE, EXPRESSION DU POUVOIR D'ARRET ET CHARGE EFFECTIVE

Tableau 2.1: La correction de couche atomique de l'élément ^{27}Al calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).....	40
Tableau 2.2: La correction de couche atomique de l'élément ^{63}Cu calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).....	41
Tableau 2.3: La correction de couche atomique de l'élément ^{107}Ag calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).....	41
Tableau 2.4: La correction de couche atomique de l'élément ^{197}Au calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).....	42
Tableau 2.5: Différentes expressions analytiques proposées pour le calcul de la charge effective.....	46

CHAPITRE 3 : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS

Tableau 3.1: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible d' ^{27}Al	51
Tableau 3.2: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible de ^{63}Cu	51
Tableau 3.3: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible d' ^{107}Ag	52
Tableau 3.4: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible d' ^{197}Au	52
Tableau 3.5: Comparaison entre les valeurs du pouvoir d'arrêt expérimentales des protons compilées par différents auteurs données dans (19) et celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée dans le cuivre.....	53
Tableau 3.6: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible de polypropylène expérimentales, déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, PSTAR.	59
Tableau 3.7: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible de polycarbonate expérimentales, déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, PSTAR.	60
Tableau 3.8: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{27}Al données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.....	63
Tableau 3.9: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{63}Cu données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.....	63
Tableau 3.10: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{107}Ag données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.....	64

Tableau 3.11: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{197}Au données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.....	64
Tableau 3.12: Comparaison entre les valeurs du pouvoir d'arrêt expérimentales des particules α données par différents auteurs compilées dans (19), et celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée dans la cible d'or	65
Tableau 3.13: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le mylar, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.....	70
Tableau 3.14: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le polycarbonate, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.....	70
Tableau 3.15: Les valeurs des écarts maximums sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^7Li dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au et polycarbonate pour les expressions (2-16,2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.	80

APPENDICE 3

Tableau 3.1: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible de ^{27}Al	98
Tableau 3.2: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de ^{27}Al	98
Tableau 3.3: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de ^{27}Al	99
Tableau 3.4: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de ^{27}Al	99
Tableau 3.5: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible de ^{63}Cu	100
Tableau 3.6: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de ^{63}Cu	100
Tableau 3.7: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de ^{63}Cu	101
Tableau 3.8: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de ^{63}Cu	101
Tableau 3.9: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible d' ^{107}Ag	102

Tableau 3.10: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible d' $^{107}_{47}\text{Ag}$	102
Tableau 3.11: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible d' $^{107}_{47}\text{Ag}$	103
Tableau 3.12: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible d' $^{107}_{47}\text{Ag}$	103
Tableau 3.13: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible d' $^{197}_{79}\text{Au}$	104
Tableau 3.14: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013 et MSTAR dans la cible d' $^{197}_{79}\text{Au}$	104
Tableau 3.15: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013 et MSTAR dans la cible d' $^{197}_{79}\text{Au}$	105
Tableau 3.16: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013 et MSTAR dans la cible d' $^{197}_{79}\text{Au}$	105
Tableau 3.17: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, ASTAR	105
Tableau 3.18: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, MSTAR	106
Tableau 3.19: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, MSTAR	106
Tableau 3.20: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, MSTAR	107
Tableau 3.21: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR	107
Tableau 3.22: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, MSTAR	107
Tableau 3.23: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, MSTAR	108
Tableau 3.24: Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, MSTAR	108

Tableau 3.25: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculé par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée dans la cible de $^{27}_{13}Al$ par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.....	108
Tableau 3.26: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur la cible $^{63}_{29}Cu$ par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.....	109
Tableau 3.27: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur la cible $^{107}_{47}Ag$ par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.....	109
Tableau 3.28: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur la cible $^{197}_{79}Au$ par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.....	110
Tableau 3.29: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur le mylar par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.....	110
Tableau 3.30: Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur le polycarbonate par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.....	110

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

ASTAR: Alpha Stopping and Range

CasP: Convolution approximation for swift Particles

HWF: Hydrogen wave function

ICRU: International Commission on Radiation Units

LDA: Local Electron Density Approximation

MSTAR: More stopping and Range

PASS: Peter, Andreas, Sigmund, Schinner

PSTAR: Proton Stopping and Range

SRIM: Stopping and Range of Ions in Matter

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le ralentissement des ions énergétiques dans la matière a fait l'objet d'un grand nombre de travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux. Ces travaux ont largement contribué au développement de la physique des interactions rayonnements-matière et à ses applications dans des domaines variés tels que les sciences des matériaux (1), la biologie (1), la médecine (notamment la radiothérapie) (1,2), la physique nucléaire et l'implantation ionique (2).

En dépit du grand progrès scientifique réalisé dans ce domaine, des questions pertinentes, nécessitant des investigations tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, ne cessent d'être posées. Depuis le vingtième siècle à ce jour, plusieurs approches théoriques ont été développées pour prédire le pouvoir d'arrêt des particules chargées dans la matière. Par conséquent, les mesures et les compilations du pouvoir d'arrêt de ces particules chargées dans des matériaux de différentes natures connaissent un regain d'intérêt notamment pour les composés tels que les polymères organiques.

Les travaux théoriques les plus importants développés pour prédire le pouvoir d'arrêt des ions légers et lourds dans la matière, nous les devons à Bohr (3,4), Bethe (5), Bloch (6), Lindhard (7,8) et récemment Sigmund-Schinner (9) ainsi que Grande-Schiwietz (8-12). Le grand nombre de tabulations semi-empiriques et données expérimentales disponibles permet d'évaluer le pouvoir d'arrêt avec une précision acceptable et de tester la validité des différentes théories correspondantes. Les valeurs du pouvoir d'arrêt calculées à partir des modèles théoriques et semi-empiriques sont générées par les codes PASS (13), CasP (14), SRIM-2013 (15), PSTAR, ASTAR (16) et MSTAR (17).

La formule de Bethe-Bloch modifiée dépend de plusieurs termes correctifs dont le plus important est sans aucun doute la correction de couche surtout pour des énergies de quelques MeV/u, sa contribution peut influer la valeur du pouvoir d'arrêt jusqu'à 10% ou plus (18). L'état de charge des ions incidents est d'une grande importance également dans le calcul du pouvoir d'arrêt, en particulier pour les ions lourds à des vitesses intermédiaires $2Z_1V_0 \geq V \geq V_0Z_1^{2/3}$ (2).

Le manque de données du pouvoir d'arrêt, en particulier pour les ions lourds, ainsi que les difficultés dans la détermination de la correction de couche particulièrement pour les

cibles lourdes et la correction de l'effet de densité, nous ont motivés à proposer deux expressions. Ces deux expressions peuvent être utilisées comme alternatives à la formule de Bethe-Bloch modifiées où les calculs seront plus simples à faire et les résultats seront meilleurs.

Dans le présent travail, nous proposons deux expressions pour le calcul du pouvoir d'arrêt des particules chargées dans des cibles monoatomiques et composées pour des énergies $E \geq 1\text{MeV/n}$. Ces expressions sont basées principalement sur les données expérimentales précises du pouvoir d'arrêt des protons ainsi que les particules alpha, et sont indépendantes des termes de la correction de couche, du potentiel d'ionisation et de la correction de l'effet de densité des cibles.

Nous calculons le pouvoir d'arrêt de quelques ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans différentes cibles ^{27}Al [1-14] MeV/n, ^{63}Cu [1-12] MeV/n, ^{107}Ag [1-5] MeV/n, ^{197}Au [1-6] MeV/n, le polypropylène [1-3] MeV/n et le polycarbonate [1,2-2,9] MeV/n, en utilisant la première expression. Dans la deuxième partie de ce travail, on détermine le pouvoir d'arrêt des protons dans les mêmes cibles monoatomiques citées ci-dessus [1-13] MeV/n, le Mylar [1,1-7,1] MeV/n et le Polycarbonate [1,1-6] MeV/n, en appliquant la deuxième expression.

Les valeurs calculées sont comparées à celles obtenues à partir de la formule de Bethe-Bloch modifiée, générées à travers les codes de calcul SRIM-2013 (15), PSTAR-ASTAR (16) et MSTAR (17) ainsi que les valeurs expérimentales compilées par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (19).

Le premier chapitre est consacré au ralentissement des particules chargées dans la matière, par un rappel sur les théories classique de Bohr et quantique de Bethe. Nous présentons l'extension du modèle de Bethe communément appelée "Théorie de Bethe-Bloch modifiée" (1), en introduisant les différentes corrections apportées à ce dernier.

Au second chapitre, nous présentons les différents développements effectués pour retrouver les relations afin de déterminer la correction de couches atomiques (K , L , M ,...) de la cible ainsi que les expressions du pouvoir d'arrêt proposées dans ce travail. On termine ce chapitre par la description de la charge effective de l'ion incident et nous donnons quelques expressions proposées dans la littérature.

Enfin, le dernier chapitre est dédié à la présentation et à la discussion des résultats obtenus du pouvoir d'arrêt des ions ^1H , ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans les cibles $^{27}_{13}\text{Al}$, $^{63}_{29}\text{Cu}$, $^{107}_{47}\text{Ag}$, $^{197}_{79}\text{Au}$, *polypropylène*, *mylar* et *polycarbonate* dans la gamme d'énergie de 1-14 MeV/n.

Nous comparons les valeurs trouvées par les présentes expressions avec celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, générées par les codes de calcul SRIM-2013 (15), PSTAR-ASTAR (16), MSTAR (17) et les résultats expérimentaux compilés par AIEA (19).

CHAPITRE 1

RALENTISSEMENT DES PARTICULES CHARGEES DANS LA MATIERE

CHAPITRE 1

RALENTISSEMENT DES PARTICULES CHARGEES DANS LA MATIERE.

1.1. Introduction :

Le ralentissement des ions projectiles énergétiques est caractérisé par les différentes grandeurs physiques : les sections efficaces de collisions élastiques et inélastiques, le pouvoir d'arrêt, le straggling en énergie (δE) et le parcours (R) dans la matière.

Le pouvoir d'arrêt $\frac{-dE}{dx}$ est une grandeur fondamentale qui décrit le ralentissement des particules chargées énergétiques dans un milieu ralentisseur. Il est défini par la quantité d'énergie déposée par unité de parcours de l'ion incident dans la matière.

Le premier concept de base est celui donné par Bohr communément appelé « l'approche classique de Bohr » (3,4), fondée sur l'échange d'énergie entre la particule chargée et les électrons du milieu ralentisseur. Par la suite, Bethe (5) a élaboré un développement dans le cadre de la mécanique quantique basé sur l'approximation de Born au premier ordre. Enfin, les corrections apportées par Bloch (6) à la formule de Bethe ont relié le développement classique de Bohr au traitement quantique de Bethe.

Dans ce chapitre, nous présentons la théorie classique de Bohr (3,4), quantique de Bethe (5) et celle de Bethe-Bloch (6), et nous introduisons les corrections apportées à cette dernière ainsi que les concepts relatifs à la description du pouvoir d'arrêt électronique d'une particule chargée au cours de son interaction avec la matière.

1.2. Théories du pouvoir d'arrêt :

1.2.1. Approches théoriques et tabulations semi-empiriques du pouvoir d'arrêt :

Le développement des modèles théoriques et semi empiriques du pouvoir d'arrêt, des particules chargées dans la matière a été une activité scientifique très intense. Actuellement, ces travaux ont connu un intérêt croissant en raison des progrès avancés de la physique et ses applications. Les approches théoriques importantes ont été proposés par : Bohr (3,4), Bethe (5), Bloch (6), Lindhard (7,8), Sigmund-Schinner (9) et Grande-Schiwietz (10-12). Les

premières bases de l'étude du pouvoir d'arrêt nous les devons à Bohr (3,4), où l'interaction ion projectile-atome cible a été traitée dans le cadre de la mécanique classique. Ce traitement a influencé, de manière remarquable, tous les développements théoriques entrepris ultérieurement.

A nos jours, les tabulations semi-empiriques disponibles permettent de générer le pouvoir d'arrêt avec une bonne précision, vis-à-vis des valeurs expérimentales existantes dans la littérature, et de confirmer les théories correspondantes. Les résultats du pouvoir d'arrêt calculés à travers les références (9) et (10-12), sont compilées respectivement par les programmes PASS (12), (ICRU-73) et CasP (14). Cependant, des approches semi-empiriques ont été développées par Ziegler, Berger et Helmut Paul sous la forme de codes de calculs SRIM (15), PSTAR, ASTAR (16) et MSTAR (17).

1.2.2. Les mécanismes du ralentissement des particules chargées dans la matière :

Selon Bohr, le ralentissement des particules chargées dans la matière se fait par deux principaux mécanismes : l'interaction nucléaire et l'interaction électronique. L'importance relative de ces deux processus d'interaction dépend de la vitesse de l'ion projectile.

1.2.2.1. Interaction nucléaire : qui se fait par le biais des collisions élastiques en induisant des transferts d'énergies coulombiennes de l'ion incident vers le noyau atomique du matériau traversé. Ce type d'interaction engendre une perte d'énergie du projectile, appelée « *perte d'énergie nucléaire* ».

1.2.2.2. Interaction électronique : provenant des collisions inélastiques qui se manifestent par des excitations et des ionisations des atomes cibles, donnant lieu à ce qu'on l'appelle souvent « *perte d'énergie électronique* ».

N.B : Dans notre gamme d'énergie [1-14] MeV/n, la perte d'énergie est principalement électronique.

1.2.3. Evaluation du ralentissement électronique des particules chargées à basse et à haute vitesse :

Le transfert d'énergie aux électrons du milieu ralentisseur est faible par rapport à l'énergie cinétique de la particule incidente. Ce transfert provient d'une succession de phénomène d'ionisation et/ou d'excitation des électrons-cible.

Adoptons comme référence la vitesse de Fermi, qui est définie comme étant la vitesse moyenne des électrons dans leurs orbites d'un atome neutre ($V_0 Z_1^{2/3}$), où : $V_0 = \frac{e^2}{\hbar} = \frac{c}{137}$ V_0 : est la vitesse de Bohr qui correspond à une particule d'énergie de 25 keV/u, C étant la vitesse de la lumière et Z_1 est le numéro atomique de l'ion incident. Trois principales zones de vitesses sont à distinguer (figure 1.1).

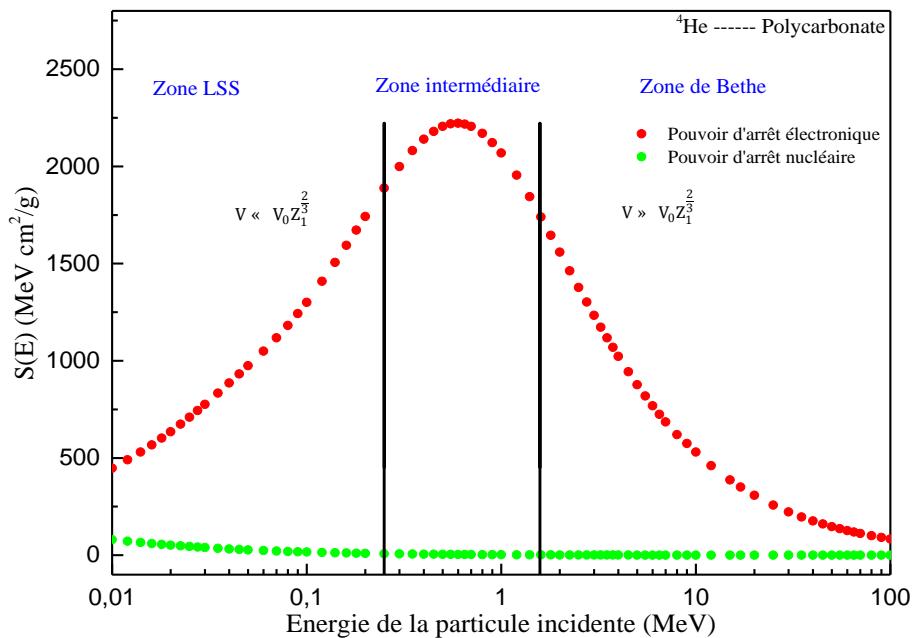


Figure 1.1 : Variation du pouvoir d'arrêt en fonction de l'énergie de la particule chargée incidente (15).

1.2.3.1. Zone de basses vitesses ($V \ll V_0 Z_1^{2/3}$) :

Le pouvoir d'arrêt électronique est pratiquement proportionnel à la vitesse V de l'ion projectile pour les faibles vitesses, la majorité des électrons-cible ont une vitesse orbitale plus grande que celle de l'ion incident. Seuls les électrons faiblement liés de la cible contribueront à la perte d'énergie de l'ion. Dans cette région, le pouvoir d'arrêt est décrit par la théorie de Lindhard, Scharff et Schiott (théorie LSS) (7) ainsi que celle de Firsov (20).

L'expression de Lindhard est donnée comme suit (21):

$$S = \frac{8\pi e^2 a_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1^{7/6} Z_2}{\left(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}\right)^{3/2}} \frac{V}{V_0} \quad (1-1)$$

a_0 : est le rayon de Bohr, $a_0 = 0.529 \text{ \AA}$.

L'expression de Firsov est donnée par (21) :

$$S = 5.15 \cdot 10^{-15} (Z_1 + Z_2) \frac{V}{V_0} \text{ eV.cm}^2. \quad (1-2)$$

1.2.3.2. Zone intermédiaire ($V \approx V_0 Z_1^{2/3}$) :

Dans cette partie, Il n'existe aucune approche qui décrit précisément le comportement de l'ion projectile énergétique qui préserve quelques électrons liés, traversant le matériau ralentisseur. Le pouvoir d'arrêt atteint son maximum (pic de Bragg), la vitesse de la particule chargée est inférieure ou du même ordre de grandeur que celles des électrons-cible principalement les électrons des couches internes. Ce régime est généralement décrit par la théorie diélectrique de Lindhard (8), ou bien par la formule de Bethe-Bloch modifiée en introduisant le paramètre de charge effective pour des vitesses $V \geq V_0 Z_1^{2/3}$.

1.2.3.3. Zone de hautes vitesses ($V \gg V_0 Z_1^{2/3}$) :

Dans cette gamme de vitesse, où l'ion projectile perd tous ses électrons et devient donc considéré approximativement comme une charge ponctuelle $Z_1 e$, est assez bien décrite par le traitement quantique de Bethe. Le pouvoir d'arrêt peut être estimé en tenant en compte les processus d'excitation et d'ionisation des électrons-cible.

1.2.4. Limites de validité du traitement classique de Bohr et quantique de Bethe :

Deux traitements ont été mis en évidence pour déterminer le pouvoir d'arrêt des particules chargées dans la matière. Le premier est le traitement classique de Bohr (3,4), basé sur l'utilisation du paramètre d'impact pour obtenir l'expression du pouvoir d'arrêt, en impliquant la distribution angulaire de Rutherford, le deuxième est le traitement quantique de Bethe (5), qui dépend du transfert d'impulsion du projectile aux électrons-cible.

En 1948, Bohr a proposé une description classique (4) de la perte d'énergie des particules chargées dans la matière, en introduisant le paramètre de Bohr " η ". Selon ce dernier, la perte d'énergie de l'ion projectile résulte à grandes vitesses du transfert d'énergie électronique. Sa première approche est fondée sur le paramètre d'impact p .

La longueur d'onde de Broglie λ , et la distance minimale d'approche b sont données comme suit :

$$\lambda = \frac{\hbar}{mv} \quad (1-3)$$

$$b = \frac{2Z_1 e^2 (M_1 + m)}{M_1 m v^2} \quad (1-4)$$

Où : m est la masse de l'électron, M_1 est la masse de l'ion projectile.

Le rapport de ces deux longueurs caractéristiques est appelé « paramètre de Bohr (η) ». Dans le cas où la masse de l'électron serait rendue négligeable devant celle de l'ion projectile (M_1), cela s'écrit par :

$$\eta = \frac{b}{\lambda} = 2Z_1 \frac{e^2}{\hbar v} = 2Z_1 \frac{V_0}{v} = 2Z_1 \frac{e^2 c}{\hbar c v} = 2Z_1 \frac{\alpha}{\beta} \quad (1-5)$$

$\alpha = \frac{1}{137}$ et $\beta = \frac{v}{c}$ sont respectivement la constante de structure fine et la vitesse relative de l'ion projectile (c : est la vitesse de la lumière).

Selon la valeur du paramètre η , deux cas sont distingués :

- ✓ $\eta \gg 1$: un traitement classique de Bohr est imposé, basé sur la diffusion de Rutherford et le paramètre d'impact.
- ✓ $\eta \ll 1$: un traitement quantique de Bethe basé sur l'approximation de Born au premier ordre PWBA (22) est utilisé.

1.2.5. Description probabiliste de la perte d'énergie (Section efficace de Rutherford) :

Lorsqu'une particule incidente de charge Z_1 et de vitesse V arrive sur un noyau cible de masse M_2 et de numéro atomique Z_2 avec un paramètre d'impact p (figure 1.2), la probabilité de collision est donnée par la section efficace $d\sigma$.

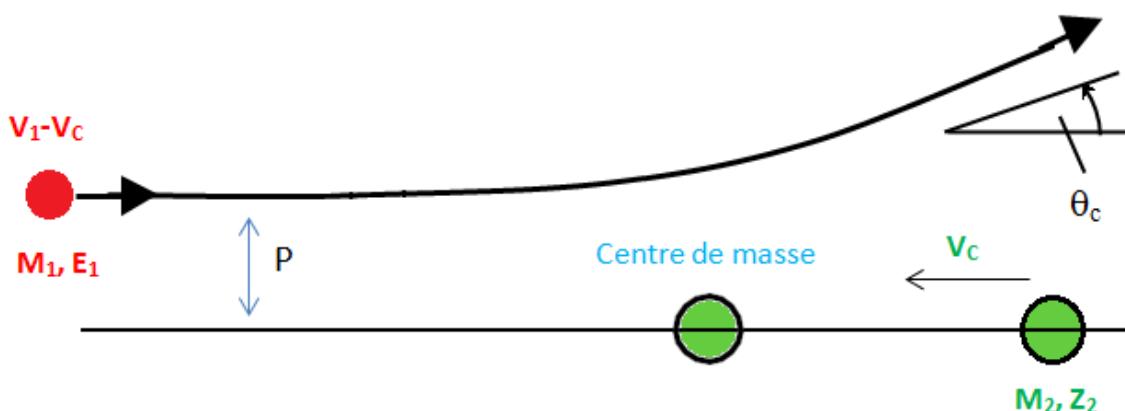


Figure 1.2 : Diffusion d'une particule (M_1, Z_1) par une cible (M_2, Z_2) dans le système du centre de masse (21).

L'angle de diffusion θ_c dans le système du centre de masse est donné par:

$$\tan \frac{\theta_c}{2} = \frac{b}{2p} \quad (1-6)$$

Dans le cas d'un choc frontal ($p = 0, \theta_c = \pi$) :

$$b = \frac{2Z_1 Z_2 e^2}{\mu V^2} \quad (1-7)$$

$\mu = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)}$ est la masse réduite.

La section efficace différentielle de diffusion coulombienne de Rutherford (23), est donnée par :

$$d\sigma = 2\pi p dp = \pi \frac{b^2 T^{max}}{4T^2} dT \quad (1-8)$$

$$\text{Avec : } T = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_1 \sin^2 \left(\frac{\theta_c}{2} \right) = T^{max} \sin^2 \left(\frac{\theta_c}{2} \right) \quad (1-9)$$

T^{max} : L'énergie maximale transférée lors d'un choc frontal.

D'après les équations (1-6) et (1-9) on obtient :

$$T = T^{max} \frac{1}{1 + \left(\frac{2p}{b} \right)^2} \quad (1-10)$$

$$\text{Ce qui implique: } p^2 = \frac{b^2}{4} \left(\frac{T^{max}}{T} - 1 \right) \quad (1-11)$$

$$\frac{dE}{dx} = N \int_{T^{min}}^{T^{max}} T d\sigma = N \pi \left(\frac{b}{2} \right)^2 T^{max} \int_{T^{min}}^{T^{max}} \frac{dT}{T} = 2\pi N \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{M_2 v^2} \int_{T^{min}}^{T^{max}} \frac{dT}{T} \quad (1-12)$$

T^{min} et T^{max} représentent respectivement, les énergies minimale et maximale transférées à l'atome cible.

$$\int_{T^{min}}^{T^{max}} \frac{dT}{T} = \int_{p^{min}}^{p^{max}} \frac{2p dp}{p^2 + \left(\frac{b}{2} \right)^2} \quad (1-13)$$

p^{max} et p^{min} : représentent respectivement les paramètres d'impacts maximale et minimale.

1.2.6. Première approche classique de Bohr :

Bohr propose, de façon beaucoup plus justifiée, la valeur maximale du paramètre d'impact p au-dessus de laquelle l'interaction devient adiabatique et ne produit aucun transfert d'énergie. Cette valeur doit correspondre à la distance pour laquelle le temps d'interaction $\tau = \frac{2p}{V}$ soit comparable au temps moyen de précession des électrons autour de leurs noyaux

atomique, $t = \langle \omega \rangle^{-1}$ ($\langle \omega \rangle$ est la vitesse angulaire moyenne des électrons atomiques sur leurs orbites.)

Dans le cas d'une diffusion sur un électron cible $m_2 = m_e$ où $m_1 \gg m_e$ (m_e étant la masse de l'électron et $Z_2 = -1$) et pour $Z_2 N$ électrons dans une cible, la perte d'énergie devient :

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = 2\pi \frac{NZ_2^2 Z_1^2 e^4}{m_e V^2} \int_0^{p_{max}} \frac{2pdP}{p^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (1-14)$$

Avec : $p_{max} \approx \frac{V}{\langle \omega \rangle}$ (21).

Le pouvoir d'arrêt donné par Bohr est :

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = 4\pi \frac{NZ_2 Z_1^2 e^4}{m_e V^2} \ln\left(\frac{m_e V^3}{Z_1 e^2 \langle \omega \rangle}\right) \quad (1-15)$$

1.2.7. Deuxième approche classique de Bohr :

Dans sa deuxième approche, Bohr considère que les effets de liaisons électroniques sont importants pour un traitement correct de la perte d'énergie. Il préconise l'existence d'un paramètre d'impact intermédiaire p_0 et réalise alors un calcul plus rigoureux en considérant séparément les collisions proches ($p < p_0$) des collisions lointaines ($p > p_0$). Dans ce qui suit nous allons rappeler brièvement la deuxième approche de Bohr sans entrer dans les détails. Bohr suppose dans un premier temps, que les collisions sont proches, c'est-à-dire pour des faibles paramètres d'impact ($p < p_0$), les chocs sont soudains et les transferts d'énergie sont supérieurs aux énergies de liaisons des électrons-cible. Ce type de collisions conduit à des ionisations des atomes du milieu ralentisseur. Bohr considère que les électrons de l'atome cible sont libres et traite alors l'interaction élémentaire ion projectile-électron cible par la diffusion de Rutherford. Dans le deuxième cas, il suppose que les collisions sont lointaines ($p > p_0$), les diffusions sont pratiquement adiabatiques (élastiques) et conduisent à des faibles transferts d'énergies. Les électrons cibles ne sont plus considérés libres, leurs comportements sont décrits par le modèle des oscillateurs harmoniques. Bohr a introduit la structure atomique dans le cadre du calcul du pouvoir d'arrêt, où il a associé à ces électrons des fréquences orbitales classiques.

En tenant compte de ces deux contributions, Bohr obtient le pouvoir d'arrêt total dont l'expression est la suivante :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{cp} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{cl} = 4\pi \cdot N \frac{Z_1^2 Z_2 e^4}{m_e V^2} \ln\left(\frac{1.1229 m_e V^3}{Z_1 e^2 \langle \omega \rangle}\right) \quad (1-16)$$

On constate que les deux expressions du pouvoir d'arrêt trouvées par Bohr en utilisant les deux approches, sont presque identiques.

1.2.8. Approche quantique de Bethe :

Bethe a élaboré une approche quantique afin de remédier aux contraintes liée au domaine des vitesses élevées. Dans le cas où la vitesse de l'ion incident est très supérieure à la vitesse des électrons-cible dans leurs orbites ($V \gg Z_1 V_0$), la perte d'énergie électronique devient prédominante, et l'interaction peut être envisagée comme une perturbation.

En se basant sur ces considérations, Bethe a proposé un traitement quantique du pouvoir d'arrêt des particules chargées rapides, son approche est basée sur l'approximation de Born au premier ordre (22).

La formulation quantique de Bethe du pouvoir d'arrêt est :

$$S(E) = 4\pi \frac{Z_1^2 e^4}{m_e V^2} N Z_2 \ln\left(\frac{2m_e V^2}{\langle I \rangle}\right) = \frac{4\pi e^4 Z_1^2}{m_e V^2} N B \quad (1-17)$$

B : est le nombre d'arrêt, il est égal à : $B = Z_2 \ln\left(\frac{2m_e V^2}{\langle I \rangle}\right)$, $\langle I \rangle$ est le potentiel d'ionisation et d'excitation moyen de l'atome cible.

1.2.9. Potentiel d'ionisation et d'excitation moyen $\langle I \rangle$:

Le potentiel d'ionisation et d'excitation moyen possède un rôle principal dans le calcul du pouvoir d'arrêt par la formule de Bethe. C'est un paramètre intrinsèque de la cible qui dépend de sa nature, essentiellement la structure électronique de ses constituants (atomes, molécules). Il est défini comme étant la somme (24) qui fait intervenir les forces d'oscillateurs généralisées f_n , et les énergies propres des états électroniques de la cible.

Il est donné par (24) :

$$\ln\langle I \rangle = \sum f_n \ln(E_n) \quad (1-18)$$

Avec :

E_n : est l'énergie d'excitation et d'ionisation de l'atome dans le domaine d'énergie (T , $T+dT$).
 f_n : la force d'oscillateur dipolaire normalisée $\sum_{n=1}^{\infty} f_n = 1$, est donnée par la relation suivante:

$$f_n = \frac{2m_e E_n}{\hbar^2 Z_2} \left| \sum_j \langle n | x_j | 0 \rangle \right|^2 \quad (1-19)$$

$\langle n |$: désigne l'ensemble des états d'excitation ou d'ionisation de l'atome dans le domaine d'énergie (T , $T+dT$).

$|0\rangle$: caractérise l'état atomique initial d'énergie.

x_j : est la projection de r_j (est la position de j^{ieme} électron de la cible) sur la direction définie par $q = \vec{p} - \vec{p}' = \hbar K$ (où: q est le moment transféré tandis que p et \vec{p}' sont respectivement les quantités de mouvement de la particule incidente avant et après l'interaction et K représente le vecteur d'onde associé au transfert du moment).

En se basant sur le modèle de Thomas-Fermi, Bloch (25), a montré que ce paramètre est proportionnel à Z_2 .

$$I(Z_2) = I_0 \cdot Z_2 \approx 10 \cdot Z_2 \text{ (eV)} \quad (1-20)$$

Selon l'aspect statistique de Fermi, cette expression est valable quand $Z_2 \geq 10$.

1.2.10. Formule de Bethe-Bloch modifiée :

L'extension de la théorie de Bethe va au-delà du formalisme de Born, en ajoutant plusieurs termes correctifs dans l'expression (1-17) de Bethe. Fano a étendu la formule de Bethe en suggérant une forme relativiste de celle-ci (26). D'autres corrections (6, 27, 28, 29) ont par ailleurs été proposées pour améliorer cette formule, ce qui permet d'aboutir à l'expression de Bethe-Bloch modifiée, qui peut s'écrire, en fonction de la vitesse relative β de l'ion incident (18) :

$$S(\beta) = \frac{dE}{\rho dx} = \frac{K}{\beta^2} Z_1^2 Z_2 [L_0(\beta) + Z_1 L_1(\beta) + Z_1^2 L_2(\beta)] \quad (1-21)$$

$$K \approx \frac{4\pi}{m_0 c^2} \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right)^2 (\hbar c)^2 \frac{N}{M_2} m_0 c^2 \approx 0.511 \text{ MeV}, \hbar c \approx 197 \text{ MeV.fm}, N = 6.022 \cdot 10^{23} \frac{\text{atomes}}{\text{mole}}$$

$$K = \frac{0.307}{M_2} \quad (M_2 : \text{est la masse de l'atome cible}) \text{ quand } [S(E)] = \text{MeV.cm}^2/\text{g}.$$

β^2 : est la vitesse de l'ion projectile donnée par la relation suivante :

$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\left[1 + \frac{E(\text{MeV})}{931.494 \cdot M(u)} \right]^2} \quad (1-22)$$

Où : E et M sont respectivement l'énergie cinétique en MeV et la masse en u.m.a de l'ion.

$L_0(\beta)$: représente le nombre d'arrêt principale, obtenu dans la correction relativiste de Fano.

Il est donné par :

$$L_0(\beta) = \left\{ \ln\left(\frac{2m_eV^2}{\langle I \rangle}\right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \frac{C}{Z_2} - \frac{\delta}{2} \right\} \quad (1-23)$$

C/Z_2 , $(\delta/2)Z_1L_1(\beta)$, $Z_1^2L_2(\beta)$: Sont respectivement les termes des corrections de couche atomiques, correction de l'effet de densité, les corrections de Barkas et de Bloch.

1.2.11. Correction des couches atomiques C/Z_2 :

L'influence de ce paramètre est pertinente et d'autant plus marquante pour des particules chargées d'énergie de l'ordre de quelques MeV/n, où leurs vitesses sont inférieures à la vitesse des électrons-cible dans leurs orbites ($V_{ion} \ll V_e$), ça contribution devient plus importante dans les cibles lourdes et peut dépasser les 10% (18). Il existe plusieurs approximations permettant d'évaluer ce terme, deux sont généralement appliquées, la première (26-30) fait appel aux fonctions d'ondes hydrogénoides (HWF) alors que la deuxième (31-33) se base sur l'approximation de la densité électronique locale (LDA). Dans le chapitre 2, on procèdera à l'évaluation du terme de la correction de couches en appliquant la première approximation.

La figure 1.3 ci-dessous, prise du rapport ICRU-37 (34), montre des exemples de corrections des couches atomiques totales C/Z_2 , calculées par la méthode semi empirique de Bichsel pour quelques éléments simples (^{12}C , ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au et ^{238}U).

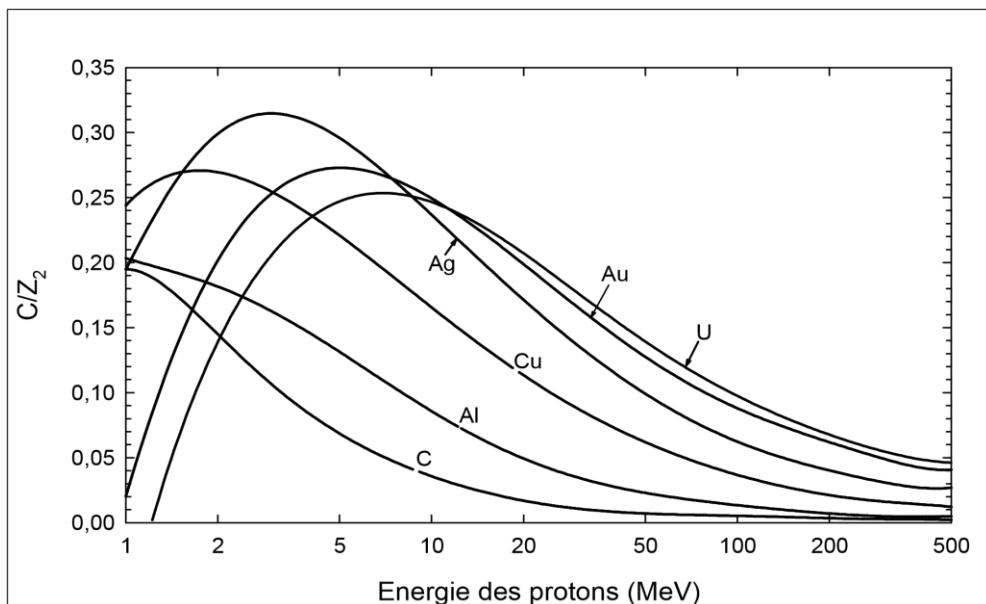


Figure 1.3 : Corrections des couches atomiques, C/Z_2 , pour les éléments ^{12}C , ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au et ^{238}U , en fonctions de l'énergie des protons, prises du rapport ICRU-37 (34), obtenues par la procédure d'échelle semi empirique de Bichsel.

1.2.12. Correction de l'effet de densité $\delta/2$:

L'effet de densité $\delta/2$ est dû à la polarisation du milieu ralentisseur, induite par le champ électrique créé par l'ion projectile, la constante diélectrique du matériau cible sert à réduire le champ subit par ces électrons. Cette correction n'est importante que pour les particules dont l'énergie incidente est supérieure à celle au repos ($\beta > 0,88$), et donc largement supérieure à celles étudiées dans le présent travail. Cet effet a été traité par plusieurs auteurs, principalement Sternheimer (35).

1.2.13. Correction de Barkas $Z_1 L_1$:

Pour montrer la différence de trajectoire des particules de charges opposées dans un même milieu ralentisseur, Barkas et al., ont observés la différence entre les parcours des de particules présentant des charges opposées (π^+ et π^- , proton et antiproton) (36). Cet effet communément appelé « effet Barkas » s'explique par la polarisation du milieu ralentisseur générée par le champ de la particule chargée qui induit par la suite l'apparition d'un moment dipolaire agissant sur le projectile incident, l'orientation du moment dipolaire dépend de la charge de la particule incidente, impliquant la différence de parcours entre les particules et les antiparticules. Pour des ions incidents dont la vitesse est comprise entre 0.6 MeV/u et 10 MeV/u, l'effet Barkas n'est plus négligeable.

Ziegler a proposé une formule empirique de terme de Barkas (18) :

$$L_1 = \frac{L_{low} L_{high}}{L_{low} + L_{high}} \quad (1-24)$$

Avec : $L_{low} = 0.001E$ et $L_{high} = (1.5/E^{0.4}) + 45000/Z_2 E^{1.6}$, où : E est l'énergie de l'ion incident, donnée en keV/n.

1.2.14. Correction de Bloch $Z_1^2 L_2$:

Bloch (6) a quantifié la différence entre la description classique de Bohr et la description quantique de Bethe. Il a développé une autre formulation du pouvoir d'arrêt en 1933, reliant le calcul quantique de Bethe au traitement classique de Bohr. Il a montré que le traitement classique de Bohr est valable lorsque le paramètre sans dimension η est sensiblement supérieur à l'unité.

Pour $\eta \ll 1$ correspondant aux vitesses du projectile nettement supérieures à celle de Bohr ($V \gg 2 Z_1 V_0$), le traitement par la théorie des perturbations de Bethe peut être appliqué.

Bloch a obtenu l'expression du pouvoir d'arrêt dans le cas des vitesses non relativistes:

$$S(\beta) = \frac{0.307}{\beta^2} Z_1^2 \frac{Z_2}{M_2} \times \left[\ln \left(\frac{2m_e V^2}{\langle I \rangle} \right) + Z_1^2 L_2(\beta) \right] \quad (1-25)$$

Le terme de Bloch est défini comme suit :

$Z_1^2 L_2 = \psi(1) - \operatorname{Re} \left(\frac{2+K}{2} \right)$, où ψ est la fonction digamma dérivée logarithmique de la fonction gamma et $K = \frac{2Z_1 V}{V_0}$.

L'expression la plus utilisée proposée pour le terme de Bloch est (6) :

$$-Z_1^2 L_2 = \frac{K^2}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n^2 + \frac{K^2}{4})} \cong 1.202 \left[\frac{K^2}{4} \right] \quad (1-26)$$

Par la suite, Bischel a développé une paramétrisation (37) pour estimer le terme de correction de Bloch, donné par la relation suivante :

$$Z_1^2 L_2 = -y^2 [1.202 - y^2 (1.042 - 0.855y^2 + 0.343y^4)] \quad (1-27)$$

Avec : $y = \frac{Z_1 \alpha}{\beta}$, cette expression est valable pour $y < 1$.

Approximation :

- ✓ Pour les faibles vitesses : le terme de Bloch $Z_1^2 L_2$ tend vers $(-0,58 - \ln y)$.
- ✓ Pour les très grandes vitesses : le terme de Bloch $Z_1^2 L_2$ tend vers $(-1,2y^2)$.

L'ajustement de la formule de Bethe par les différents termes de corrections citées ci-dessus, a donné lieu à l'expression de Bethe-Bloch modifiée donnée par :

$$S(\beta) = \kappa \frac{Z_1^2 Z_2}{\beta^2} \left\{ \ln \left(\frac{2m_e V^2}{\langle I \rangle} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \frac{c}{Z_2} - \frac{\delta}{2} + Z_1 L_1 + Z_1^2 L_2 \right\} \quad (1-28)$$

1.3. Pouvoir d'arrêt des composés :

Dans une substance composée, le pouvoir d'arrêt est basé sur la règle d'additivité de Bragg-Kleeman (38), sous l'estimation d'une combinaison linéaire des pouvoirs d'arrêt des éléments constituant, pondérés par rapport à leurs abondances dans le matériau ralentisseur. Cette approximation suppose que les effets d'agrégation de la matière dus aux états de phase et/ou aux liaisons chimiques qui régissent ces éléments constitutifs ne possèdent pas d'impact au cours du ralentissement. Selon ces contraintes, la loi d'additivité de Bragg est donnée par :

$$S_{com}(\beta) = \sum_j \omega_j S_j(\beta) \quad (1-29)$$

Où : ω_j et S_j représentent respectivement, la fraction de masse du $j^{\text{ème}}$ atome constituant et le pouvoir d'arrêt de celui-ci.

1.4. Définition de la charge effective :

Au cours de leur passage dans la matière, les particules chargées subissent des interactions avec les constituants du milieu ralentisseur, l'état de charge des particules chargées peut être modifié par capture et pertes d'électrons. Leur ralentissement va donc dépendre énormément des phénomènes de capture et de perte d'électrons du milieu par l'ion incident. En fin de parcours, lorsque l'énergie devient faible, l'ion n'étant plus ionisant, perd son énergie par interactions élastiques avec les atomes du milieu. L'estimation du degré de neutralisation des particules chargées, au cours de leurs ralentissements dans la matière a commencé avec la découverte de la fission nucléaire. Il a été reconnu qu'une théorie du pouvoir d'arrêt électronique, nécessitait la compréhension de l'état de charge de la particule, et sa neutralisation par les électrons capturés une fois que son énergie diminue.

Bohr identifie la charge effective Z_1^* portée par le projectile à la charge moyenne \bar{q} :

$$Z_1^* = \bar{q} \quad \text{Où:} \quad Z_1^* = [\sum_i F_i q_i^2]^{1/2} \quad (1-30)$$

F_i représente la fraction de charge dans l'état q_i .

En se basant sur le modèle de Thomas-Fermi, Bohr (39) a obtenu l'expression suivante de la charge effective :

$$Z_1^* = Z_1^{\frac{1}{3}} V / V_0, \quad V < V_0 Z_1^{\frac{2}{3}} \quad (1-31)$$

Pour les projectiles partiellement ionisés, la formule de Bethe-Bloch peut être utilisée si l'on remplace Z_1 par Z_1^* .

1.5. Expression théorique et semi empirique de la charge effective (Modèle BK-ZBL) :

Brandt et Kitagawa (40) sont les premiers à établir l'expression théorique de la charge effective, en se basant sur les propriétés diélectriques et l'approximation « PPA » (Plasmon Pole Approximation) de la constante diélectrique. Leur expression de fraction de charge effective est donnée comme suit :

$$\gamma_{BK} = q + C(1 - q) \ln \left[1 - \left(\frac{2\Lambda V_F}{a_0 V_0} \right)^2 \right] \quad (1-32)$$

q : est le degré d'ionisation, il est donné par : $q = 1 - \frac{N}{Z_1}$, N est le nombre d'électrons encore liés à l'ion de numéro atomique Z_1 .

Λ : est la longueur d'écran (mal définie dans cette théorie).

Pour obtenir une description de γ_{BK} , il faut tout d'abord connaître avec une bonne précision la variable C et la longueur d'écran Λ . Suivant le traitement semi-empirique de Ziegler, Biersack et Littmark (BK-ZBL) basé sur la compilation de plus de 10 000 résultats expérimentaux du pouvoir d'arrêt, ils ont donné les expressions suivantes (41):

$$C \approx \frac{1}{2} \left(\frac{V_0}{V_F} \right)^2 \quad (1-33)$$

$$q = 1 - \exp(0.803y_r^{0.3} - 1.3167y_r^{0.6} - 0.38157y_r - 0.008983y_r^2) \quad (1-34)$$

y_r : est la vitesse effective de l'ion, donnée par : $y_r = \frac{V_r}{V_0 Z_1^{2/3}}$.

V_r : est la vitesse relative de l'ion, elle est donnée en fonction de la vitesse V_1 du projectile et la vitesse de Fermi V_F par :

$$V_r = V_1 \left(1 + \frac{V_F^2}{5 V_1^2} \right) \text{ pour } V_1 \geq V_F \quad (1-35)$$

$$V_r = \frac{3}{4} V_F \left(1 + \frac{2V_1^2}{3 V_F^2} + \frac{V_1^4}{15 V_F^4} \right) \text{ pour } V_1 \leq V_F \quad (1-36)$$

Une description plus détaillée de la charge effective va être développée au chapitre 2.

CHAPITRE 2

CORRECTION DE COUCHE, EXPRESSION DU POUVOIR D'ARRET ET CHARGE

EFFECTIVE

CHAPITRE 2

CORRECTION DE COUCHE, EXPRESSION DU POUVOIR D'ARRET ET CHARGE

EFFECTIVE.

2.1. Introduction:

La formule de Bethe-Bloch modifiée, contient plusieurs termes correctifs (C/Z_2 , $\delta/2$, $Z_1 L_1$, $Z_1^2 L_2$), le plus important de ces derniers est le terme de correction de couche qui peut contribuer jusqu'à 10% du pouvoir d'arrêt total ou plus particulièrement pour des cibles lourdes à des énergies du projectile incident de quelques MeV. L'état de charge de l'ion incident peut influer aussi sur le pouvoir d'arrêt principalement les ions lourds. Nous proposons dans le présent travail, deux expressions pour le calcul du pouvoir d'arrêt qui sont basées principalement sur les valeurs expérimentales précises des protons ainsi que les particules α et qui sont indépendantes de la correction de couches, du potentiel d'ionisation, de l'effet de densité. Nous procédons dans ce chapitre, à l'évaluation des différentes couches (K, L, M,...), à la démonstration des deux expressions proposées et à la description de la charge effective Z_1^* .

2.2. Corrections des couches atomiques:

2.2.1. Corrections des couches atomiques K et L:

Le terme de corrections des couches atomiques C/Z_2 est introduit dans l'expression du pouvoir d'arrêt de Bethe pour corriger la défection de l'hypothèse de Bethe selon laquelle la vitesse du projectile est nettement supérieure à celles des électrons cibles ($V \gg Z_1 V_0$). Cette hypothèse peut ne pas être valide pour le cas des particules chargées incidentes de faibles vitesses et le terme de correction de couche sera évalué en tenant compte des détails de chacune des orbites électroniques de l'atome cible (C_K/Z_2 , C_L/Z_2 ,.....). Parmi les différentes approximations permettant l'évaluation de ce terme, deux principales approches sont

généralement utilisées : celle basée sur l'utilisation des fonctions d'ondes hydrogénoides et celle basée sur l'utilisation de l'approximation de densité électronique locale.

Dans le présent travail nous avons opté pour l'approche basée sur l'utilisation des fonctions d'ondes hydrogénoides (HWF).

Des évaluations théoriques des corrections des couches atomiques (K, L, M, \dots) ont été publiées par Walske, Bichsel (26,27,30), Khandelwal et Merzbacher (28,29) ainsi que Ziegler (33).

En utilisant les fonctions d'ondes hydrogénoides, Walske a trouvé les valeurs de C_K et C_L en utilisant l'expression de B_i définie comme suit :

Rappel de la formule de Bethe:

$$\frac{dE}{dX} = \frac{4\pi e^4 Z_1^2}{m_e V^2} \text{ NB}$$

Où: B est le nombre d'arrêt.

Pour les couches, $i \equiv K, L, M, \dots$, on peut écrire que :

$$B_{total} = \sum_i B_i(\theta_i, \eta_i) = Z_2 \ln \left(\frac{2m_e V^2}{(I)} \right) - \sum_i C_i(\theta_i, \eta_i) \quad (2-1)$$

Avec :

$$C_{total} = \sum_i C_i(\theta_i, \eta_i)$$

Le nombre d'arrêt B_i de la couche atomique i est défini comme suit (29) :

$$B_i(\theta_i, \eta_i) = \int_{W_{min}=\theta_i/n^2}^{\infty} W dW I(\eta_i, W) \quad (2-2)$$

La fonction d'excitation $I(\eta_i, W) = \int_{W^2/4\eta_i}^{\infty} \frac{dQ}{Q^2} |F_{W_i}(Q)|^2$ est donnée en termes du facteur de forme $F_{W_i}(Q)$, où W est l'énergie transférée à l'électron de la couche i en unité $((Z_2^*)_i)^2 \cdot R_H$.

On définit les variables suivantes (généralement la vitesse de la particule est exprimée en fonction de la variable η_i):

- η_i est le nombre quantique principal de la $i^{\text{ème}}$ couche : $\eta_i = \beta^2 / (\alpha \cdot (Z_2^*)_i)^2$, $i \equiv K, L, (Z_2^*)_i$ est la charge effective des atomes cible pour les électrons de couche i , $\alpha = 1/137$, $\beta = V/c$, $(Z_2^*)_K = Z_2 - 0.3$, $(Z_2^*)_L = Z_2 - 4.15$ (42,43).
- θ_i est le rapport du potentiel d'ionisation observé de la couche i : $\theta_i = I_i / ((Z_i^*)^2 R_H / n_i^2)$ (la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état le plus bas inoccupé) sur $((Z_2^*)_i)^2 \cdot R_H / (n_i)^2$ (R_H et n_i sont respectivement, le potentiel d'ionisation de l'atome

d'hydrogène qui est égal à 13.6 eV, et le nombre quantique principal. La figure. 2.1 représente la variation de θ_K , θ_L en fonction de Z_2 (26).

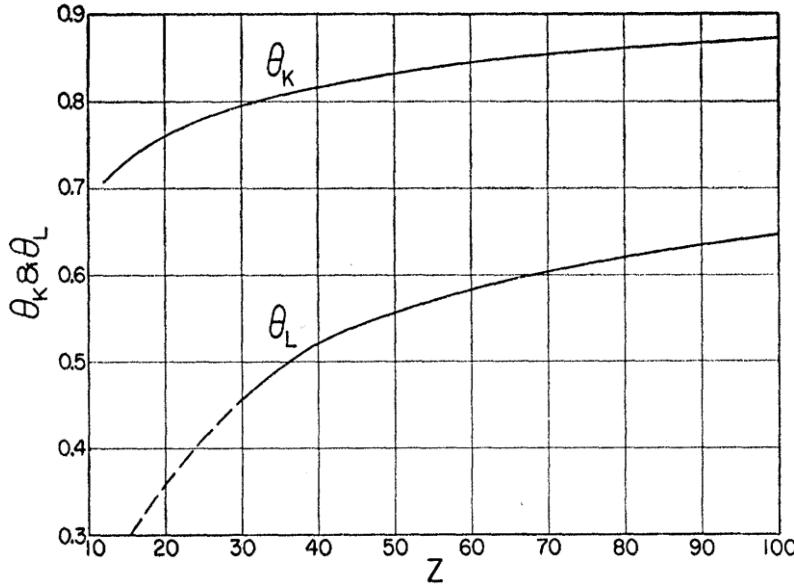


Figure 2.1 : la variation de θ_K , θ_L en fonction de Z_2 (26).

- **Couche K (n=1):** pour η_K grand, le comportement asymptotique de $B_K(\theta_K, \eta_K)$ est donné par (26):

$$B_K(\theta_K, \eta_K) = S_K(\theta_K) \cdot \ln(\eta_K) + T_K(\theta_K) - C_K(\theta_K, \eta_K) \quad (2-3)$$

La correction $C_K(\theta_K, \eta_K)$ peut-être développée en puissance de $1/\eta_K$:

$$C_K(\theta_K, \eta_K) = U(\theta_K) \cdot (\eta_K)^{-1} + V(\theta_K) \cdot (\eta_K)^{-2} + \dots \quad (2-4)$$

Pour un θ_i donné : $U_i(\theta_i)$ et $V_i(\theta_i)$ sont des constantes données dans (34).

- **Couche L (n=2):** pour η_L grand, le comportement asymptotique de $B_L(\theta_L, \eta_L)$ (26) est obtenu par le même développement utilisé pour le calcul de $B_K(\theta_K, \eta_K)$ (26):

$$B_L(\theta_L, \eta_L) = S_L(\theta_L) \cdot \ln(\eta_L) + T_L(\theta_L) - C_L(\theta_L, \eta_L) \quad (2-5)$$

- ✓ Pour un θ_i donné : $S_i(\theta_i)$, $T_i(\theta_i)$ sont donnés dans (28,30,33,42,43).

La correction $C_L(\theta_L, \eta_L)$ peut-être développé en puissance de $1/\eta_L$:

$$C_L(\theta_L, \eta_L) = U(\theta_L) \cdot (\eta_L)^{-1} + V(\theta_L) \cdot (\eta_L)^{-2} + 4.00 \cdot (\eta_L)^{-3} + 4.43 \cdot (\eta_L)^{-4} \quad (2-6)$$

2.2.2. Corrections des couches atomiques M, N et O-P:

Pour évaluer la contribution des corrections des couches externes des éléments de numéros atomiques $Z_2 > 10$ (couches M, N, O-P), H. Bichsel (30,34,44) (dans les référence CHAPITRE 2 : CORRECTION DE COUCHE, EXPRESSION DU POUVOIR D'ARRET ET CHARGE EFFECTIVE

(34,44), on cite les travaux de Bichsel) adopte une procédure d'échelle semi empirique en supposant que ces dernières dépendent de la vitesse du projectile de façon similaire que celle de la couche L . Il obtient alors la correction totale C en sommant les contributions des différentes couches atomiques :

$$C_{total} = C_K(\theta_K, \eta_K) + C_L(\theta_L, \eta_L) + V_M \cdot C_L(\theta_L, H_M, \eta_L) + V_N \cdot C_L(\theta_L, H_N, \eta_L) + \dots \quad (2-7)$$

Où :

$$C_M = V_M \cdot C_L(\theta_L, H_M, \eta_L), \quad C_N = V_N \cdot C_L(\theta_L, H_N, \eta_L), \quad C_{O-P} = V_{O-P} \cdot C_L(\theta_L, H_{O-P}, \eta_L)$$

V_i et H_i ($i \equiv M, N$ et $O-P$) sont les facteurs adoptés dans le rapport ICRU-37 (34), V_M , V_N et V_{O-P} sont égaux au 1/8 du nombre d'électrons se trouvant respectivement dans les couches M , N et $O-P$ tandis que H_M , H_N et H_{O-P} sont des paramètres ajustables expérimentalement. Leurs valeurs sont données dans la référence (34) pour les cibles ^{12}C , ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag et ^{197}Au .

La figure 2.2, montre des exemples de corrections des couches atomiques (K, L, M, N, O, P) de la cible d' ^{197}Au et totale C/Z_2 (les valeurs des différentes couches sont prises du rapport de Janni (45)).

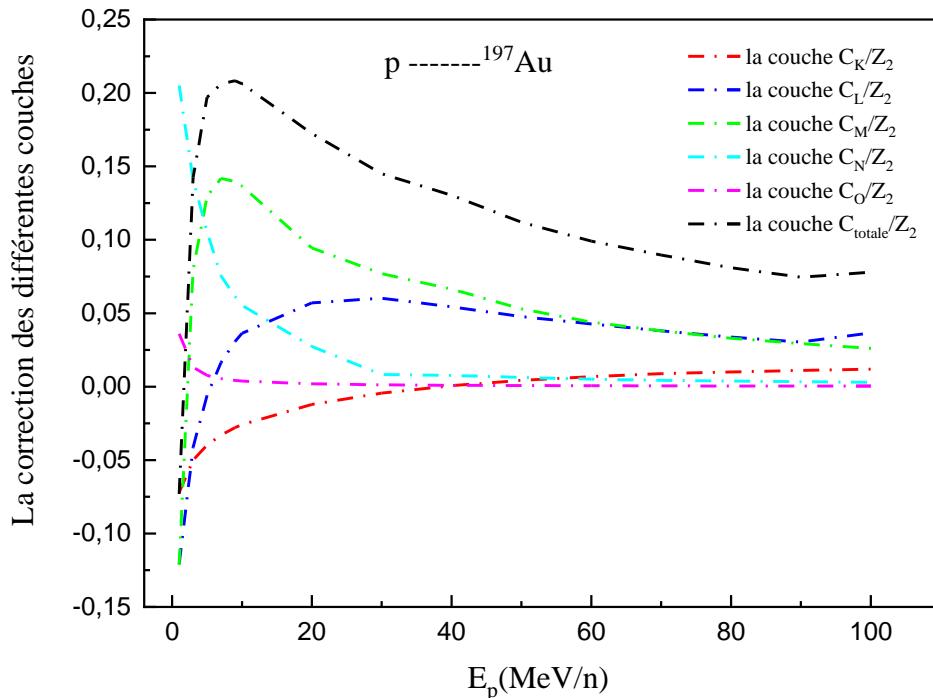


Figure 2.2 : La correction des différentes couches atomiques de la cible ^{197}Au . (Valeurs prises du rapport de Janni) (45).

2.2.3. Corrections des couches atomiques des cibles $^{27}_{13}Al$, $^{63}_{29}Cu$, $^{107}_{47}Ag$, $^{197}_{79}Au$:

Sur les tableaux 2.1-2.4 ainsi que la figure 2.3, nous représentons les valeurs des corrections des couches des différentes cibles monoatomiques étudiées dans ce travail. Nous avons appliqué les méthodes de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33), pour reproduire les valeurs des corrections des couches atomiques des éléments $^{27}_{13}Al$, $^{63}_{29}Cu$, $^{107}_{47}Ag$, $^{197}_{79}Au$, (Tableaux 2.1-2.4). Nous tenons à mentionner que dans les prochains calculs du pouvoir d'arrêt par la formule de Bethe-Bloch modifiée, nous avons utilisé les corrections des couches atomiques déterminées par le développement de Walske-Bischel (26-30).

Ziegler dans son programme TRIM, donne l'expression de la correction de couche suivante (33) :

$$C/Z_2 = \sum_{i=0}^4 a_i (\ln E)^i = a_0 + a_1 \ln(E) + a_2 \ln(E)^2 + a_3 \ln(E)^3 + a_4 \ln(E)^4 \quad (2-8)$$

les coefficients a_i sont ajustés expérimentalement (33), et E est l'énergie exprimée en keV/u.

Tableau 2.1 : La correction de couche atomique de l'élément $^{27}_{13}Al$ calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).

E (MeV/n)	C/Z ₂ (calculée) (26-30)	C/Z ₂ (Ziegler) (33)
1	0,2	0,1175
1,1	0,1988	0,1214
1,2	0,1970	0,1243
1,5	0,1904	0,1292
1,8	0,1832	0,1307
2	0,1785	0,1305
2,2	0,1741	0,1301
2,4	0,1698	0,1292
2,6	0,1658	0,1281
2,8	0,1619	0,1268
3	0,1583	0,1254
3,2	0,1548	0,1239
3,4	0,1514	0,1224
3,8	0,1451	0,1193
4	0,1421	0,1178
4,2	0,1393	0,1162
4,4	0,1365	0,1147
4,6	0,1338	0,1132
4,8	0,1313	0,1117
5	0,1288	0,1102
5,2	0,1264	0,1088
5,4	0,1240	0,1073
5,6	0,1217	0,1059
7,5	0,1031	0,0941
10	0,0845	0,0816
12	0,0751	0,0736
14	0,0675	0,0668

Tableau 2.2 : La correction de couche atomique de l'élément ^{63}Cu calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).

E (MeV/n)	C/Z₂ (calculée) (26-30)	C/Z₂ (Ziegler) (33)
1	0,2449	0,0971
1,2	0,2594	0,1223
1,4	0,2656	0,1395
1,6	0,2693	0,1518
1,8	0,2686	0,1606
2	0,2678	0,1671
2,2	0,2667	0,1718
2,4	0,266	0,1753
2,6	0,2637	0,1778
2,8	0,2613	0,1795
3	0,2590	0,1807
3,2	0,2560	0,1814
3,4	0,2529	0,1818
3,6	0,2498	0,1819
3,8	0,246	0,1817
4	0,2422	0,1813
4,2	0,2390	0,1808
4,4	0,2344	0,1802
4,6	0,2299	0,1795
4,8	0,2253	0,1786
5	0,2207	0,1777
7,2	0,1952	0,1659
13	0,1468	0,1366

Tableau 2.3 : La correction de couche atomique de l'élément ^{107}Ag calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).

E (MeV/n)	C/Z₂ (calculée) (26-30)	C/Z₂ (Ziegler) (33)
1	0,1835	0,0706
1,2	0,2230	0,1180
1,4	0,2503	0,1513
1,6	0,2696	0,1757
1,8	0,2833	0,1939
2	0,2930	0,2077
2,4	0,3044	0,2266
2,6	0,3073	0,2331
2,8	0,3090	0,2381
3	0,3097	0,2420
3,4	0,3090	0,2472
3,6	0,3080	0,2489
3,8	0,3066	0,2500
4	0,3049	0,2508
4,2	0,303	0,2512
4,4	0,3009	0,2514
4,6	0,2987	0,2513
4,8	0,2965	0,2510
5	0,2941	0,2505
7	0,2733	0,2407
7,2	0,2711	0,2395
13	0,0713	0,2026

Tableau 2.4 : La correction de couche atomique de l'élément ^{197}Au calculée par les développements de Walske-Bischel (26-30) et Ziegler (33).

E (MeV/n)	C/Z₂ (calculée) (26-30)	C/Z₂ (Ziegler) (33)
1	0,0512	-0,0422
1,2	0,1068	0,0232
1,4	0,1480	0,0717
1,6	0,1791	0,1088
1,8	0,2031	0,1380
2	0,2220	0,1614
2,2	0,2369	0,1806
2,4	0,2488	0,1964
2,6	0,2584	0,2096
2,8	0,2663	0,2207
3	0,2726	0,2301
3,2	0,2779	0,2381
3,4	0,2822	0,2450
3,6	0,2857	0,2509
3,8	0,2886	0,2560
4	0,2910	0,2605
6,9	0,3007	0,2841
7	0,3006	0,2843
13	0,2347	0,2700

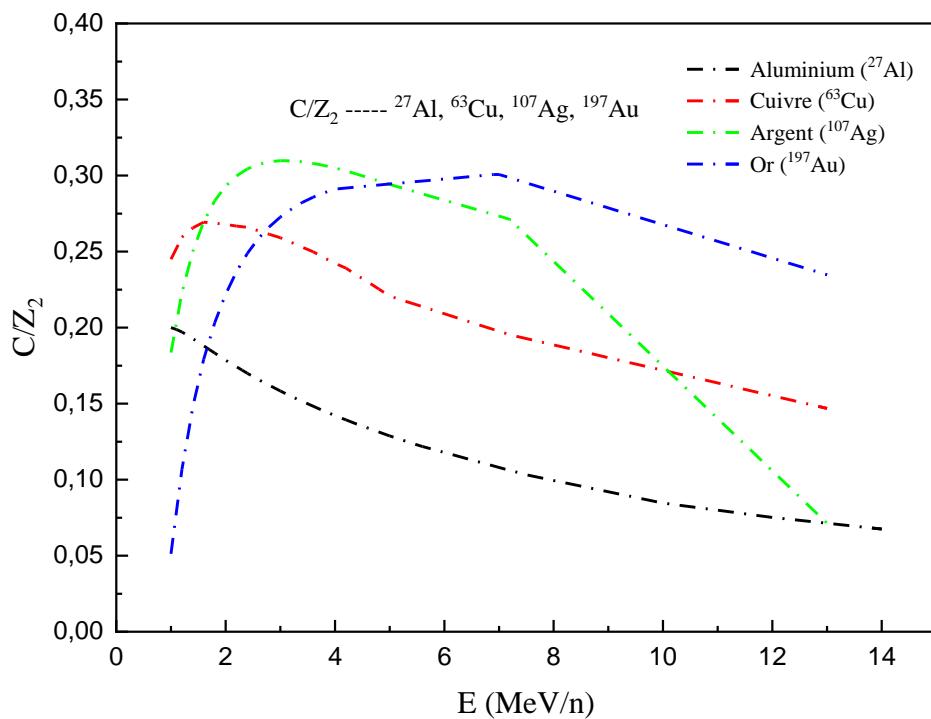


Figure 2.3 : Les corrections de couches atomiques des éléments ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag et ^{197}Au calculées par le développement de Walske-Bischel (26-30).

2.3. Expression du pouvoir d'arrêt

2.3.1. Paramétrisation du pouvoir d'arrêt basée sur $S_p(E)$:

Dans ce qui suit, on va établir l'expression générale du pouvoir d'arrêt de Bethe-Bloch modifiée en fonction de $S(E_p)$, $L_1(p)$, $L_2(p)$ et $L_2(Z_1)$, pour les ions (4He , 7Li , ..., ^{16}O , ...) en utilisant la formule de Bethe-Bloch modifiée.

- Pour les protons de numéro atomique $Z_1 = Z_p = 1$:

$$S_p = \kappa \frac{Z_2}{\beta^2} \{L_0(p) + L_1(\beta, Z_2) + L_2(\beta, p)\} \quad (2-9)$$

d'où :

$$L_0(p) = \frac{S_p \beta^2}{\kappa Z_2} - L_1(\beta, Z_2) - L_2(\beta, p) \quad (2-10)$$

$$\text{On rappelle que : } L_0(\beta) = \left\{ \ln \left(\frac{2m_e V^2}{\langle I \rangle} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \frac{c}{Z_2} - \frac{\delta}{2} \right\} \quad (2-11)$$

- Pour les particules α ($Z_1 = Z_\alpha$):

$$S_\alpha = \frac{\kappa Z_\alpha^2 Z_2}{\beta^2} [L_0(\alpha) + Z_\alpha L_1(\beta, Z_2) + Z_\alpha^2 L_2(\beta, \alpha)] \quad (2-12)$$

A des vitesses égales et dans la même cible $L_0(p) = L_0(\alpha)$ et $L_1(p) = L_1(\alpha)$, (L_0 et L_1 ne dépendent que de la vitesse de la particule incidente et du milieu ralentisseur Z_2), on remplace sur (1-24), on trouve :

$$S_\alpha = Z_\alpha^2 S_p + \frac{\kappa Z_\alpha^2 Z_2}{\beta^2} [(Z_\alpha - 1)L_1(\beta, Z_2) + (Z_\alpha^2 L_2(\beta, \alpha) - L_2(\beta, p))] \quad (2-13)$$

- Pour les ions 7Li ($Z_1 = Z_{Li}$):

$$S_{Li} = \frac{\kappa Z_{Li}^2 Z_2}{\beta^2} [L_0(Li) + Z_{Li} L_1(\beta, Z_2) + Z_{Li}^2 L_2(\beta, Li)] \quad (2-14)$$

A des vitesses égales et dans la même cible $L_0(p) = L_0(Li)$ et $L_1(p) = L_1(Li)$, on montre que:

$$S_{Li} = Z_{Li}^2 S_p + \frac{\kappa Z_{Li}^2 Z_2}{\beta^2} [(Z_{Li} - 1)L_1(\beta, Z_2) + (Z_{Li}^2 L_2(\beta, Li) - L_2(\beta, p))] \quad (2-15)$$

L'expression générale du pouvoir d'arrêt déduite de la formule de Bethe-Bloch modifiée indépendante de la correction de couche, du potentiel d'ionisation et de la correction de l'effet

de densité s'écrit :

$$S_{Z1} = Z_1^2 S_p + \left(\frac{\kappa Z_1^2 Z_2}{\beta^2} \right) [(Z_1 - 1)L_1(\beta, Z_2) + (Z_1^2 L_2(\beta, Z_1) - 4L_2(\beta, p))] \quad (2-16)$$

Cette expression est applicable pour $Z_1 > 1$. Elle a été utilisée dans la première partie de notre travail qui a fait l'objet d'une publication internationale dans le journal « Radiation Physics and Chemistry » (46).

2.3.2. Paramétrisation du pouvoir d'arrêt basée sur $S_\alpha(E)$:

Dans ce qui suit, nous adopterons la même démarche pour développer une deuxième expression pour le calcul du pouvoir d'arrêt. Cette dernière est basée sur les valeurs expérimentales précises des particules α et qui est indépendante de la correction de couche, du potentiel d'ionisation, de la correction de l'effet de densité.

Pour des particules alpha de numéro atomique $Z_1=Z_\alpha=2$:

$$S_\alpha = \kappa \frac{Z_\alpha^2 Z_2}{\beta^2} \{L_0(\alpha) + Z_\alpha L_1(\beta, Z_2) + Z_\alpha^2 L_2(\beta, \alpha)\} \quad (2-17)$$

A des vitesses égales et dans la même cible $L_0(\alpha) = L_0(Z_1)$ et $L_1(\alpha) = L_1(Z_1)$, on obtient :

$$S_{Z1} = \frac{Z_1^2 S_\alpha(E)}{4} + \frac{\kappa Z_1^2 Z_2}{\beta^2} [(Z_1 - Z_\alpha)L_1(\beta, Z_2) + (Z_1^2 L_2(\beta, Z_1) - 4L_2(\beta, \alpha))] \quad (2-18)$$

Dans le présent travail, nous remplaçons $S_\alpha(E)$ par ses valeurs expérimentales précises dans l'expression (2-18), de sorte que cette dernière devienne indépendante des termes C/Z_2 , $\langle I \rangle$ et $\delta/2$.

Remarque: Cette expression est applicable pour $Z_1 = 1$ et $Z_1 > 2$.

- Pour $Z_1=1$: $S_p = \frac{S_\alpha}{4} + \frac{\kappa Z_2}{\beta^2} [(1 - Z_\alpha)L_1(\beta, Z_2) + (L_2(\beta, p) - 4L_2(\beta, \alpha))] \quad (2-19)$
- ✓ Ces deux expressions (2-16 et 2-18) sont complémentaires et peuvent être utilisées pour le calcul du pouvoir d'arrêt de tous les ions ($Z_1 \geq 1$).

2.4. La charge effective:

2.4.1. Description de la charge effective:

La première approche théorique sur la charge effective des ions lourds est apparue avec la découverte de la fission nucléaire et les fragments émis lors de la fission. Bohr fut le premier à donné la formule de la charge effective Z_1^* portée par le projectile (47) :
CHAPITRE 2 : CORRECTION DE COUCHE, EXPRESSION DU POUVOIR D'ARRET ET CHARGE EFFECTIVE

$$Z_1^* = Z_1, \quad V \gg V_0 Z_1^{2/3} \quad (2-20)$$

Par la suite, une description du pouvoir d'arrêt électronique S en terme de charge effective a été proposée par Northcliffe (48) afin d'ajuster les prédictions théoriques aux mesures expérimentales. L'expression proposée par Northcliffe est donnée par:

$$\gamma(v, Z_1) = 1 - \exp(-v/v_0 Z_1^{2/3}) \quad (2-21)$$

Dans le cadre de ce concept, le rapport des pouvoirs d'arrêt électroniques obéit à une loi d'échelle en Z^2 .

$$\frac{S(Z_1, Z_2, V)}{Z_1^2 S(Z_p, Z_2, V)} = \gamma^2 \quad (2-22)$$

Où: $S(Z_1, Z_2, V)$ et $S(Z_p, Z_2, V)$ sont respectivement les pouvoirs d'arrêt de l'ion lourd et de l'ion de référence (proton). Cette référence $S(Z_p, Z_2, V)$ est prise pour des protons de même vitesse en mouvement dans le même milieu ralentisseur. Le rapport de la charge effective sur le numéro atomique Z_1 de l'ion:

$$\gamma = \frac{Z_1^*}{Z_1} \quad (2-23)$$

γ est appelé paramètre de la charge effective, il nous renseigne directement sur l'importance des corrections du pouvoir d'arrêt. Aux énergies élevées $\gamma = 1$.

2.4.2. Expression de la charge effective:

La forme générale des diverses expressions semi-empiriques proposées pour la description de la charge effective des ions lourds est de type :

$$\gamma = 1 - A_0 \cdot \exp \left(-A_1 \cdot \frac{V}{V_0 Z_1^{2/3}} \right) \quad (2-24)$$

A_0 , A_1 sont des paramètres ajustables expérimentalement.

Plusieurs expressions pour le calcul du paramètre de la charge effective ont été proposées : Northcliffe et Schilling (48), Booth et Grant (49), Barkas (50), Anthony-Lanford (51), Schiowitz et Grande (52), Chekirine (53,2), Fadanelli (54) et Ourabah (55,56). Pour certains auteurs, la relation (2-24) est donnée indépendamment de Z_2 , par contre pour d'autres et afin de tenir compte de la dépendance du numéro atomique de la cible surtout pour les noyaux lourds, ils proposent une formule de la charge effective qui varie en fonction de la vitesse V , Z_1 et Z_2 , on donne quelques expressions de la charge effective dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5: Principales expressions analytiques proposées pour le calcul de la charge effective.

Auteurs :	Expressions :
Chekirine (53,2)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - 0.7851 \cdot \exp(-0.7815 \cdot v/v_0 Z_1^{2/3})$
Grande Schiwietz et P.L. Grande (CasP 4.1) (52)	$Z_1^* = Z_1 \frac{12x + x^4}{0,07/x + 6 + 0,3x^{0,5} + 10,37x + x^4}$ $x = \left(v_1/v_0 Z_1^{-0,52} Z_2^{-0,019Z_1^{-0,52}v_1/v_0}/1,68 \right)^{1+1,8/Z_1}$
Antony et al (51)	$\gamma(v, Z_1, Z_2) = 1 - A_0 \cdot \exp(-A_1 \cdot v/v_0 Z_1^{2/3})$ $A_0 = 1.16 - 1.91 \cdot 10^{-3} Z_2 + 1.26 \cdot 10^{-5} \cdot Z_2^2$ $A_1 = 1.18 - 7.50 \cdot 10^{-3} Z_2 + 4.53 \cdot 10^{-5} \cdot Z_2^2$
Booth et Grant (49)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - \exp(-24.73x + 247.6x^2 + 131x^3)$ $x = E^{-4/3} Z_1$ et E en MeV/uma
Northcliffe et Schilling (48)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - \exp(-v/v_0 Z_1^{2/3})$
Brown et Moak (57)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - 1.034 \exp(-v/v_0 Z_1^{0.688})$
Betz et al (58)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - 1.032 \exp(-v/v_0 Z_1^{0.69})$
Forster et al (59)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - A(Z_1) \exp(-0.879v/v_0 Z_1^{2/3})$ $A(Z_1) = 1.035 - 0.4 \exp(-0.16Z_1)$
Ziegler (60)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - \exp(-A)(1.034 - 0.177 \exp(-0.081114Z_1))$ $A = B + 0.0378 \sin(\pi B/2)$ $B = 0.886 (E/25M_1)^{0.5}/Z_1^{2/3}$, E (keV), M_1 (uma)
Barkas (61)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - \exp(-1.25x)$, $x = 100\beta/Z_1^{2/3}$
Pierce et Blann (62)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - \exp(-0.95\beta/\alpha Z_1^{2/3})$
Hubert et al (63)	$\gamma(v, Z_1, Z_2) = 1 - x_1 \exp\{-x_2 E^{x_3} Z_1^{x_4}\}$, E (MeV/n) $x_1 = D + 1.658 e^{-0.05170Z_1}$, $D = 1.164 + 0.2319 e^{-0.004302Z_2}$ $x_2 = 8.144 + 0.09876 \ln Z_2$, $x_3 = 0.3140 + 0.01072 \ln Z_2$, $x_4 = 0.5218 + 0.02521 \ln Z_2$
Ourabah (55,56)	$\gamma(v, Z_1) = 1 - 1.22 \cdot \exp(-1.16 \cdot v/v_0 Z_1^{2/3})$

Pour les projectiles partiellement ionisés, la formule de Bethe-Bloch peut être utilisée si on remplace Z_1 par Z_1^* (charge effective).

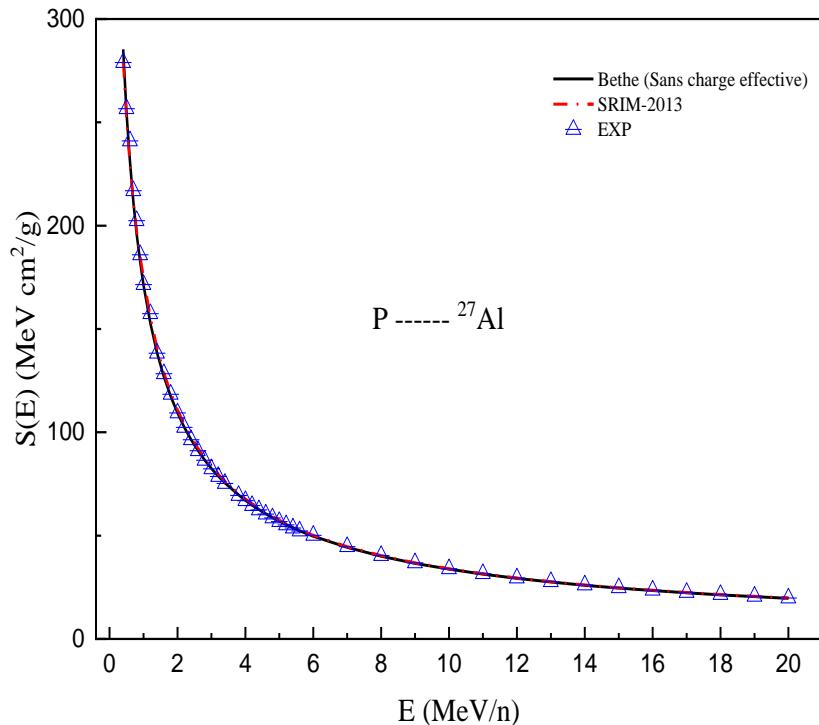


Figure 2.4.a : Le Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ²⁷Al.

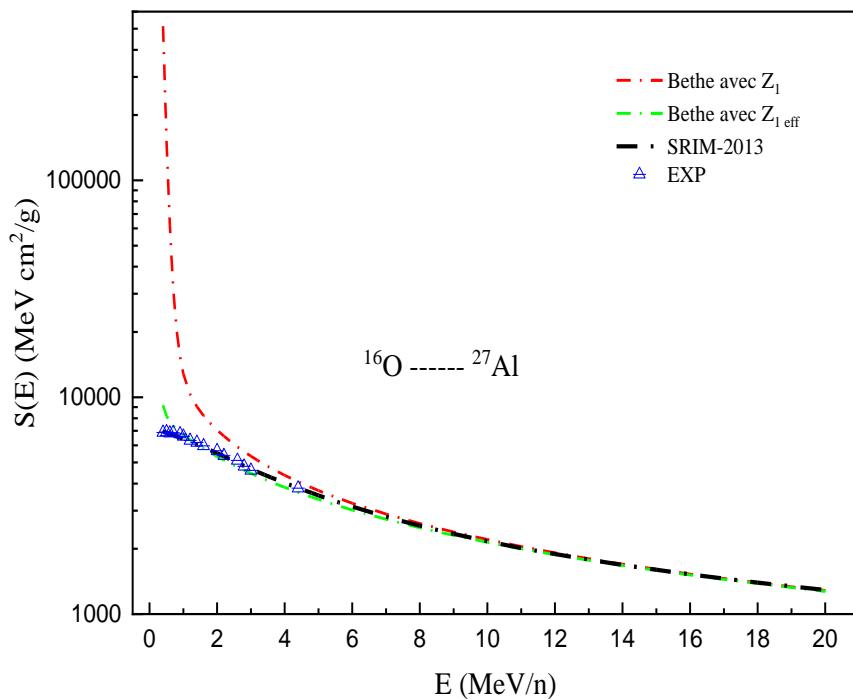


Figure 2.4.b : Le Pouvoir d'arrêt de l'ion ¹⁶O dans la cible ²⁷Al en tenant compte de la charge effective.

Les figures 2.4.a et 2.4.b représentent respectivement les pouvoirs d'arrêt des protons et de l'ion ^{16}O traversant la cible d^{27}Al . On remarque que la contribution de la charge effective est d'un grand intérêt pour l'ion oxygène aux énergies $E_{\text{O}} < 6.6 \text{ MeV/n}$ ($Z_1^* < 8$).

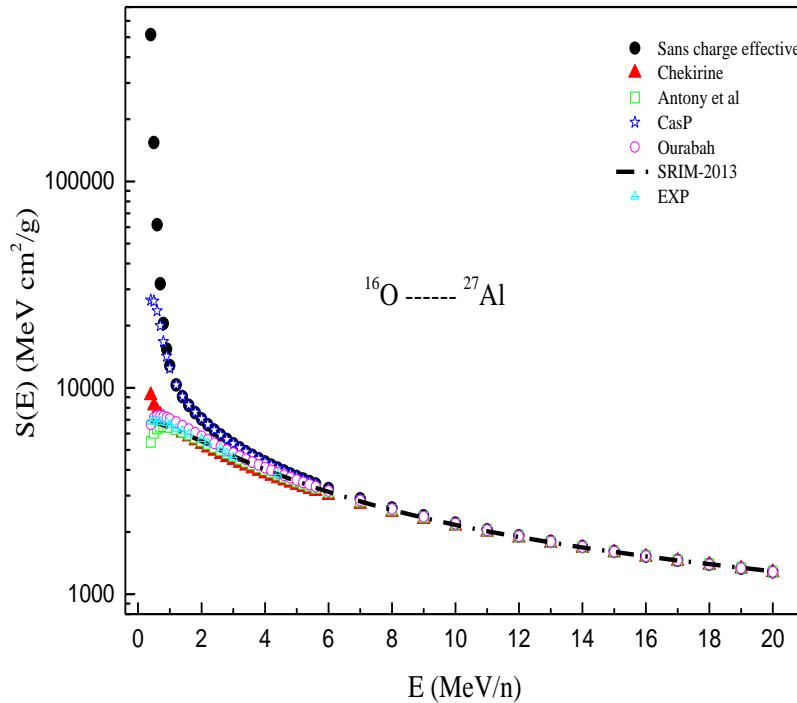


Figure 2.5 : le pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la cible ^{27}Al pour différentes expressions de la charge effective.

Pour opter pour l'une des différentes expressions de la charge effective indiquées dans le tableau 2.5, nous avons représenté sur la figure 2.5, le pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la cible d^{27}Al en utilisant à chaque fois une des quatre expressions (52-54, 56,57). Nous remarquons que celles données par les références (51,53,54,55,56) reproduisent correctement les données expérimentales et les valeurs générées par le code SRIM-2013 pour des énergies $E_{\text{O}} \geq 1 \text{ MeV/n}$. Ceci a guidé notre choix sur l'expression (53,2), qui va être utilisée dans la suite de notre travail pour le calcul du pouvoir d'arrêt des ions ^7Li , ^{12}C et ^{16}O .

CHAPITRE 3

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS

CHAPITRE 3

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS.

3.1. Introduction:

Ce chapitre est dédié aux principaux résultats obtenus du pouvoir d'arrêt pour des vitesses $V \geq V_0 Z_1^{2/3}$ (région de Bethe) des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans ^{27}Al [1-14] MeV/n, ^{63}Cu [1-12] MeV/n, ^{107}Ag [1-5] MeV/n, ^{197}Au [1-6] MeV/n, polypropylène [1-3] MeV/n et polycarbonate [1,2-2,9] MeV/n par la formule (2-16). Nous avons aussi, déterminer les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons à travers les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au pour des énergies [1-13] MeV/n, mylar [1,1-7,1] MeV/n et polycarbonate [1,1-6] MeV/n en utilisant l'expression (2-19). Il sera, notamment, question de discuter les résultats trouvés en les confrontant aux données disponibles dans la littérature, à ceux calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et ceux générés à travers les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR, ASTAR et MSTAR

Pour la détermination des valeurs du pouvoir d'arrêt $S(E)$ des ions ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans les différentes cibles, nous avons utilisé l'expression de Z_1^* (53,2) citée au tableau 2.5, par contre aux énergies $E \geq 1$ MeV/n, la charge effective Z_1^* des ions ^1H et ^4He est égale à Z_1 .

3.2. Le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans les cibles monoatomiques ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag et ^{197}Au :

Dans ce travail, nous avons utilisé les valeurs du pouvoir d'arrêt expérimentales des protons S_p (avec une bonne précision) existantes dans la section des données nucléaires de l'agence internationale de l'énergie atomique (19) (voir tableaux 3.1-3.4, figure 3.1). Nous avons déterminé le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O à travers les cibles d'aluminium [1-14] MeV/n, de cuivre [1-12] MeV/n, d'argent [1-5] MeV/n et d'or [1-6] MeV/n, en utilisant l'expression (2-16) avec Z_1^* donnée par la référence (53,2) uniquement aux ions ^7Li , ^{12}C et ^{16}O ($Z_{He}^* = Z_{He} = 2$).

On définit l'écart relatif (Er) sur $S(E)$ comme suit :

$$Er(S(E)) = \left[\frac{S(E)_{calculé}}{S(E)_{référence}} - 1 \right] \quad (3-1)$$

$S(E)$ est donné en $\text{MeV.cm}^2/\text{g}$.

Tableau 3.1 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible d^{27}Al .

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)
1	171,45	171,18	175,02	172
1,2	157,37	152,82	155,9	153,98
1,3	150,39	145,24	147,9	145,33
1,4	138,30	138,49	140,89	139,10
1,5	132,65	132,42	134,68	132,8
1,7	123,09	121,94	123,87	122,35
2	109,42	109,34	110,86	109,5
2,2	102,42	102,45	103,96	102,07
2,4	96,39	96,49	97,81	96,34
2,5	93,82	93,79	94,91	93,83
2,8	86,47	86,63	87,67	86,74
3	82,33	82,51	83,40	82,5
3,4	75,24	75,46	76,29	75,22
3,8	69,41	69,65	70,35	69,94
4	66,89	67,10	67,74	67,07
4,6	60,42	60,58	61,20	60,28
5	56,83	56,96	57,47	56,95
5,4	53,70	53,80	54,31	54,04
7,5	41,72	42,03	42,49	42,05
10	33,71	33,73	33,97	33,76
12	29,28	29,29	29,50	29,36
14	25,98	25,97	26,16	26,25

Tableau 3.2 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible de^{63}Cu .

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)
1	119,40	114,36	118,99	118,4
1,5	95,17	92,55	94,53	94,03
2	79,27	78,65	79,80	80,05
2,5	70,26	68,75	69,60	69,53
3	62,42	61,36	62,01	61,99
3,5	56,41	55,60	56,12	56,02
4	51,63	50,98	51,39	51,57
4,5	47,70	47,18	47,47	47,46
5	44,41	44,00	44,19	44,18
6	39,14	38,81	38,97	38,87
7	35,11	34,84	34,96	34,98
7,5	33,43	33,19	33,38	33,31
8	31,92	31,71	31,79	31,74

8,5	30,56	30,37	30,50	30,46
9	29,32	29,16	29,21	29,24
9,5	28,20	28,05	28,14	28,12
10	27,16	27,04	27,06	27,09
10,5	26,21	26,08	26,15	26,26
11	25,34	25,21	25,24	25,42
11,5	24,53	24,40	24,46	24,63
12	23,77	23,64	23,68	23,85

Tableau 3.3 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible $d^{107}\text{Ag}$.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)
1	93,26	89,75	93,03	96,06
1,4	78,44	76,04	77,70	79,20
1,8	67,11	66,66	67,63	68,06
2	63,25	62,96	63,74	64,09
2,2	59,95	59,74	60,41	60,56
2,4	57,01	56,90	57,45	57,43
2,6	54,40	54,37	54,81	54,82
2,8	52,06	52,10	52,44	52,56
3	49,94	50,05	50,29	50,41
3,2	48,04	48,18	48,40	48,55
3,4	46,70	46,48	46,64	46,80
3,6	45,10	44,91	45,03	45,07
3,8	43,63	43,47	43,54	43,68
4	42,62	42,13	42,16	42,24
4,2	41,03	40,88	40,95	40,89
4,4	39,81	39,72	39,75	39,67
4,6	38,70	38,63	38,63	38,63
4,8	37,66	37,61	37,62	37,57
5	37,01	36,65	36,60	36,68

Tableau 3.4 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons expérimentales, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, PSTAR dans la cible $d^{197}\text{Au}$.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)
1	62,78	59,36	62,76	62,97
1,4	54,50	52,12	54,71	54,05
1,8	48,49	46,71	48,59	47,97
2	46,09	44,49	46,11	45,62
2,2	43,87	42,52	43,95	43,49
2,4	41,92	40,75	42,00	41,49
2,6	40,16	39,15	40,24	39,78
3	37,14	36,38	37,21	36,94
3,6	33,61	33,00	33,63	33,42
4	31,70	31,13	31,64	31,48
4,2	30,85	30,28	30,81	30,64
4,4	30,06	29,49	29,97	29,89
5,2	27,30	26,76	27,15	27,1
5,8	25,57	25,06	25,42	25,36
6	25,05	24,55	24,88	24,8

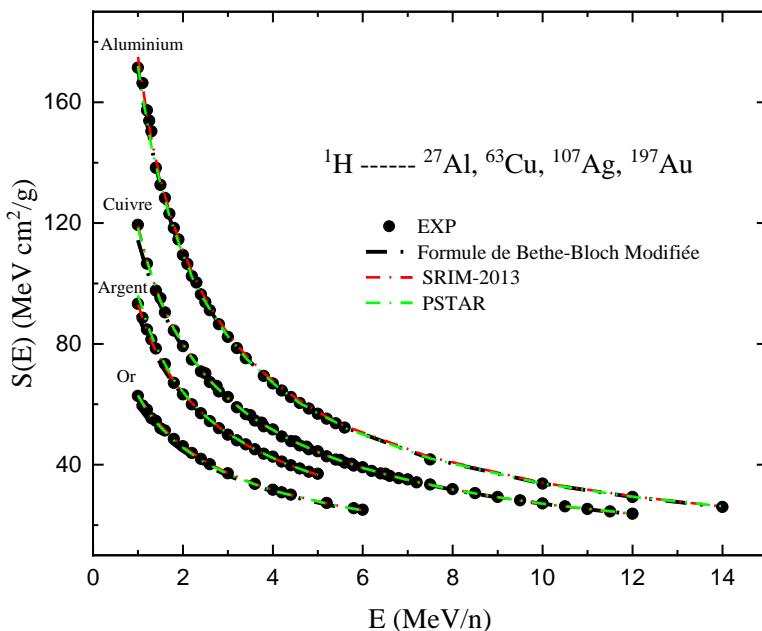


Figure 3.1 : Pouvoir d'arrêt des protons dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , donné expérimentalement, calculé à travers la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilé par les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR.

Tableau 3.5 : Comparaison entre les valeurs du pouvoir d'arrêt expérimentales des protons compilées par différents auteurs données dans (19) et celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée dans le cuivre.

E (MeV/n)	$S_p(E)_{EXP}$ (MeV.cm ² /g)	Reference ID	Incertitude (%)	$S_p(E)_{Bethe}$ (MeV.cm ² /g)	Er (%) ($S_p(E)_{EXP} / S_p(E)_{Bethe}$)
1,2	106,57	An1977 (64)	0,50	104,23	2,24
1,5	95,17	Lu1979 (65)	2,5	92,55	2,83
2,4	70,85	An1977 (64)	0,50	70,49	0,50
3	62,42	An1977 (64)	0,50	61,36	1,72
3,8	52,69	An1977 (64)	0,50	52,72	0,04
4,5	47,70	So1973 (66)	0,40	47,18	1,11
5,2	42,73	An1977 (64)	0,50	42,85	0,28
6	39,14	An1977 (64)	0,50	38,81	0,82
7,2	34,12	An1977 (64)	0,50	34,16	0,11
8	31,92	So1973 (66)	0,40	31,71	0,66
8,5	30,56	So1973 (66)	0,40	30,37	0,62
9	29,32	So1973 (66)	0,40	29,16	0,53
10	27,16	So1973 (66)	0,40	27,04	0,44
10,5	26,21	An1967 (67)	0,30	26,08	0,47
11	25,34	An1967 (67)	0,30	25,21	0,51
11,5	24,53	An1967 (67)	0,30	24,40	0,53
12	23,77	An1967 (67)	0,30	23,64	0,53

Dans la figure 3.1, nous avons pris les valeurs expérimentales du pouvoir d'arrêt des protons (S_p) dans l'aluminium, le cuivre, l'argent et l'or avec des incertitudes généralement inférieures ou égales à 1% ($E > 1,6$ MeV/n). Nous constatons que les écarts trouvés entre ces valeurs et celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée sont généralement

inférieurs ou égaux à 1% pour des énergies $E > 1,6$ MeV/n. Nous avons donné un exemple de ces résultats dans le tableau 3.5, montrant les valeurs expérimentales du pouvoir d'arrêt des protons dans le cuivre avec leurs incertitudes et la référence associée à chaque expérience. La formule de Bethe-Bloch modifiée donne de très bons résultats du pouvoir d'arrêt pour les ions légers 1H et 4He comparés à ceux obtenus expérimentalement (19), ce qui nous a permis de remplacer le pouvoir d'arrêt des protons (S_p) calculé par (S_p) expérimental (pris avec une bonne précision, voir tableau 3.5) dans l'expression (2-16).

3.2.1. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible $^{27}_{13}Al$:

Nous avons calculé le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible $^{27}_{13}Al$ aux énergies E comprises entre 1 et 14 MeV/n par la présente expression (2-16). On peut voir les valeurs obtenues sur les tableaux 3.1-3.4 (voir annexe 3) ainsi que la figure 3.2.

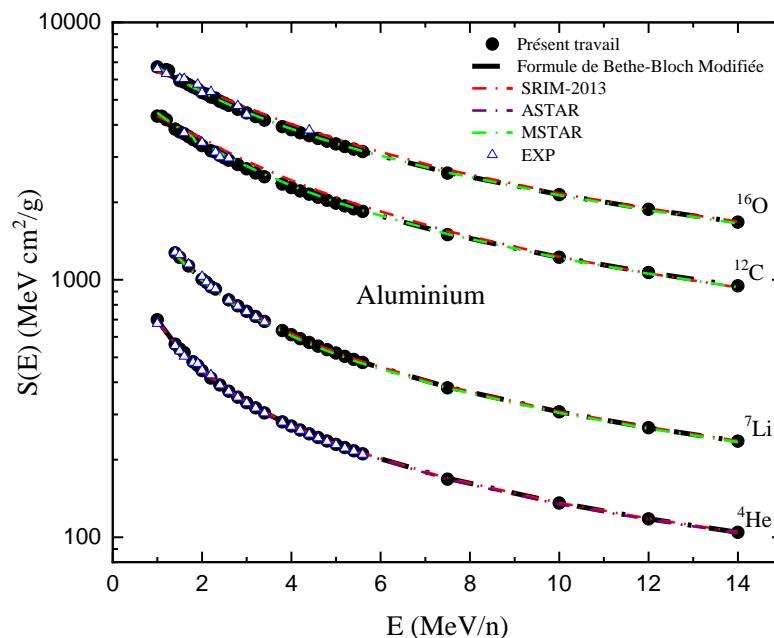


Figure 3.2 : Pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible d' $^{27}_{13}Al$ déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.

Les résultats trouvés par la présente expression sont jugés acceptables par rapport à la formule de Bethe-Bloch modifiée, à ceux générés par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR MSTAR et les données expérimentales, où deux cas sont distingués :

a/ Les ions légers ^4He et ^7Li dans la cible d'aluminium:

Nous remarquons que nos valeurs s'accordent assez bien avec celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, générées par les codes de calculs et données expérimentalement. Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts sont trouvés inférieurs ou égaux à 2,9% et 1,5%, particulièrement par rapport à la formule de Bethe-Bloch modifiée et SRIM-2013. Un très bon accord est trouvé avec les codes de calcul ASTAR, MSTAR et les résultats expérimentaux où les écarts maximums sont respectivement égaux à 2,9%, 2,4%, 2,8%.

b/ Les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans la cible d'aluminium:

Les maximums des écarts sur les pouvoirs d'arrêts sont généralement égaux à 3%, 5% et 3% respectivement par rapport à la formule de Bethe-Bloch modifiée, SRIM-2013 et MSTAR. On constate qu'un accord acceptable existe entre nos résultats et ceux donnés expérimentalement où les maximums des écarts sont égaux à 2,7% et 5% respectivement pour les ions ^{12}C et ^{16}O .

3.2.2. Le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible ^{63}Cu :

Sur les tableaux 3.5-3.8 (voir annexe 3) et la figure 3.3, nous avons présenté les résultats du pouvoir d'arrêt calculés par l'expression (2-16) des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O à travers la cible ^{63}Cu dans la gamme d'énergie comprise entre 1 et 12 MeV/n.

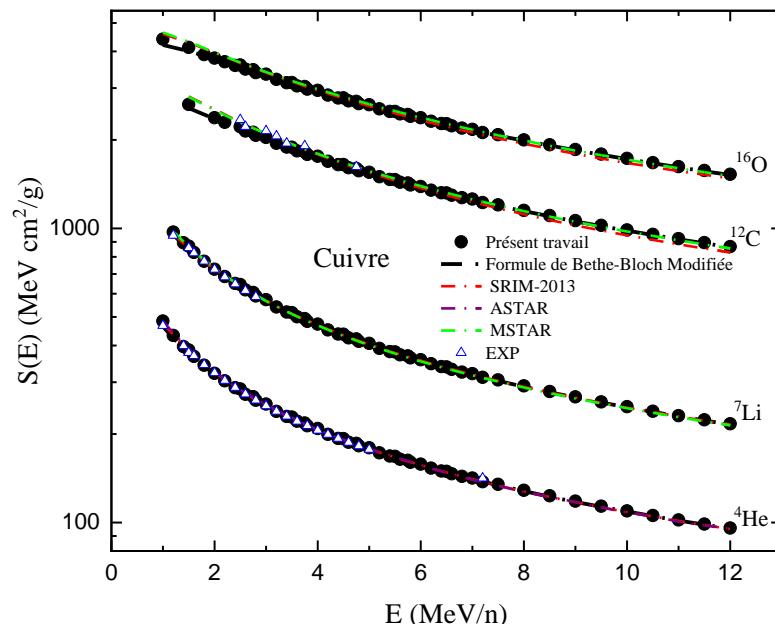


Figure 3.3 : Pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible de ^{63}Cu déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et compilé à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.

Un très bon accord est trouvé entre nos valeurs et celles obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR, MSTAR ainsi que les données expérimentales.

a/ Les ions légers ^4He et ^7Li dans la cible de cuivre:

Nous remarquons que les différences maximales de nos valeurs par rapport à la formule de Bethe-Bloch modifiée sont de 2,8% pour des énergies allant de 1,2 à 12 MeV/n. Un excellent accord existe entre nos résultats et ceux compilés par les codes de calcul principalement SRIM-2013, où l'écart maximum est de 1,7% pour les deux ions dans toute la gamme d'énergie. D'une autre part, tous les écarts sont inférieurs ou égaux à 2% par rapport à ASTAR (^4He) et MSTAR (^7Li). Enfin, on constate qu'un assez bon accord est trouvé avec les données expérimentales, dont la différence maximale est de 2,7% pour l'ion ^4He dans la gamme d'énergie comprise entre 1,2 et 12 MeV/n, de même pour l'ion ^7Li .

b/ Les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans la cible de cuivre:

Pour les ions ^{12}C et ^{16}O un accord acceptable existe entre nos valeurs et celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, la différence maximale est généralement égale à 2,9%. Les résultats sont jugés acceptables comparés aux codes de calcul, les écarts sur les pouvoirs d'arrêts sont généralement inférieurs à 3,5%, par rapport à SRIM-2013 et MSTAR. L'expression (2-16) a reproduit de bons résultats comparés aux valeurs expérimentales, où l'écart $Er(S(E)) \leq 4\%$ pour l'ion ^{12}C . Nous tenons à mentionner qu'il n'existe aucune valeur expérimentale concernant l'ion ^{16}O dans cette cible.

3.2.3. Le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible $^{107}_{47}\text{Ag}$:

Nous avons déterminé les valeurs du pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible $^{107}_{47}\text{Ag}$ aux énergies comprises entre 1 et 5 MeV/n à l'aide de l'expression du pouvoir d'arrêt (2-16). Les résultats trouvés sont représentés dans les tableaux 3.9 –3.12 (voir annexe 3) et la figure 3.4.

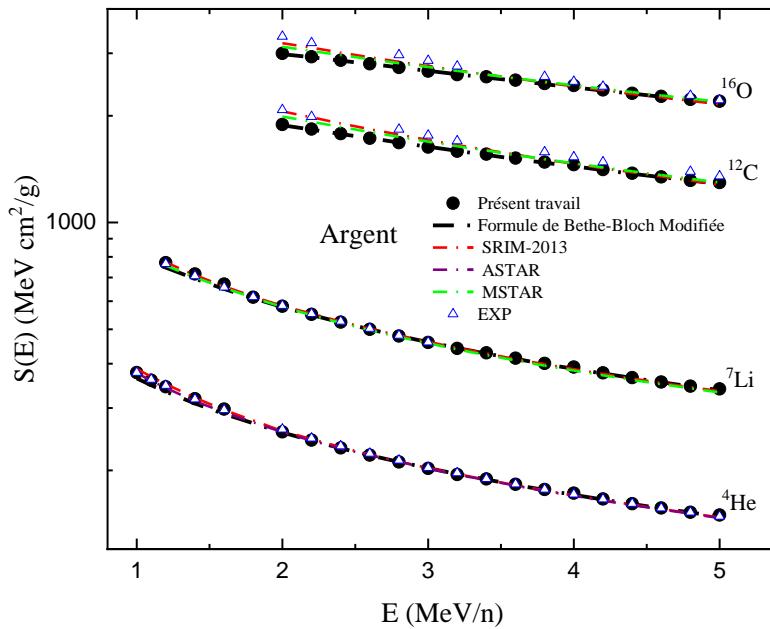


Figure 3.4 : Pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible ^{107}Ag déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.

On note qu'un bon accord existe entre nos calculs et ceux trouvés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, SRIM-2013, ASTAR et MSTAR ainsi que les résultats expérimentaux.

a/ Les ions légers ^4He et ^7Li dans la cible d'argent:

Un très bon agrément existe principalement entre nos résultats et ceux calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, où l'écart maximum est égal à 1,1% pour les énergies comprises entre [1,8-5] MeV/n. Nos résultats sont jugés assez bons par rapport aux codes de calcul particulièrement SRIM-2013, dont les différences sont strictement inférieures à 2,4%. On constate aussi qu'il existe un bon accord avec ASTAR et MSTAR où $Er(S(E)) \leq 2,6\%$. Par ailleurs, les différences maximales entre nos valeurs avec celles obtenues expérimentalement sont de 1,6% et 2% respectivement pour les ions ^4He , ^7Li .

b/ Les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans la cible d'argent:

Les résultats obtenus sont acceptables par rapport à ceux calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, les écarts sont généralement inférieurs à 4,5% pour l'ion ^{12}C et 4,4% pour l'ion ^{16}O dans la gamme d'énergie [2,6-5] MeV/n. En outre, un remarquable accord existe entre les présents résultats et ceux compilés par les codes de calcul SRIM-2013 et MSTAR où $Er(S(E)) \leq 5\%$. Les écarts sur le pouvoir d'arrêt sont trouvés inférieurs ou égaux à 6,9% et 5,6% pour des énergies comprises entre 3,2 et 5 MeV/n, respectivement pour

les ions ^{12}C et ^{16}O par rapport aux valeurs expérimentales, ces différences sont dues aux incertitudes expérimentales.

3.2.4. Le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible ^{197}Au :

L'expression (2-16) a été utilisée pour déterminer le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O à travers la cible ^{197}Au pour des énergies comprises entre 1 et 6 MeV/n. les résultats obtenus sont présentés sur les tableaux 3.13-3.16 (voir annexe 3) et la figure 3.5.

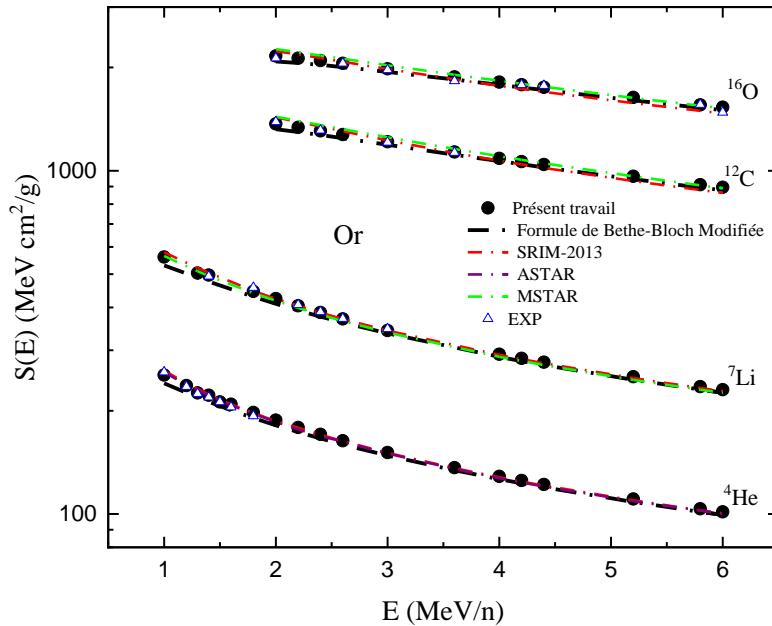


Figure 3.5 : Pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans la cible d' ^{197}Au déterminé avec la présente expression (2-16), calculé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement et compilé à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR et MSTAR.

Un bon accord a été obtenu entre les résultats trouvés par la présente expression (2-16) et ceux calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, générés par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR et donnés expérimentalement par l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

a/ Les ions légers ^4He et ^7Li dans la cible d'or:

Les résultats trouvés sont en bon accord avec la formule de Bethe-Bloch modifiée, on remarque que les écarts sont généralement inférieurs ou égaux à 5% pour l'ion ^4He dans la gamme d'énergie allant de 1,2 à 6 MeV/n. Un accord remarquable existe avec les codes de calcul particulièrement SRIM-2013 où les différences maximales sont égales à 2,8% et 1,5% respectivement pour l'ion ^4He et l'ion ^7Li (dans la gamme d'énergie [1,4-6] MeV/n). Les

écart sont inférieurs à 2,6% pour les deux ions par rapport aux codes de calcul ASTAR, MSTAR et aux données expérimentales.

b/ Les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans la cible d'or:

On constate qu'un assez bon accord existe entre les valeurs calculées par la présente expression (2-16) et celles déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifié, la plupart des écarts sont inférieurs à 3,6%. D'autre part, nos valeurs sont jugées acceptables également avec celles générées par les codes de calcul et principalement avec SRIM-2013, dont les différences sont respectivement inférieures à 3,8%, 4,7% pour les ions ^{12}C et ^{16}O . Les écarts trouvés avec le code MSTAR sont $\leq 5\%$, par contre nos valeurs s'accordent bien avec celles trouvées expérimentalement ou tous les écarts sont inférieurs à 3%.

3.3. Le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans les polymères:

Pour le calcul du pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O passant à travers le polypropylène [1-3] MeV/n et le polycarbonate [1,2-2,9] MeV/n, nous avons utilisé l'expression (2-16) qui est basée sur les valeurs expérimentales des protons (tableaux 3.6-3.7). Pour ces deux films polymères nous avons appliqué la règle Bragg-Kleeman (38).

Tableau 3.6 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible de polypropylène expérimentales, déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)
1	289,17	316,86	285,73	290,6
1,1	280,03	294,39	272,41	272,92
1,2	252,72	275,11	259,59	255,66
1,4	225,93	243,74	233,17	228,35
1,5	217,81	230,81	222,06	216,9
1,6	205,19	219,30	211,95	207,02
1,7	196,30	208,98	202,74	198,11
1,8	187,88	199,69	194,33	189,19
1,9	180,71	191,26	186,93	182,06
2	174,93	183,59	179,52	175,2
2,2	163,51	170,11	167,21	163,09
2,3	157,53	164,16	161,51	157,74
2,5	147,48	153,55	151,30	148
2,6	142,97	148,79	146,99	144,05
2,7	140,01	144,34	142,59	139,91
2,8	134,99	140,18	138,59	135,78
2,9	131,25	136,28	134,89	132,21
3	128,55	132,61	131,18	128,7

Tableau 3.7 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible de polycarbonate expérimentales, déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)
1,2	216,99	236,47	220,75	218,68
1,4	199,49	210,22	199,23	195,99
1,5	190,49	199,37	190,12	186,5
1,6	181,31	189,69	181,82	178,05
1,7	172,69	181,01	174,31	170,46
1,9	161,89	166,04	161,20	157,44
2	153,02	159,54	154,99	151,11
2,2	141,29	148,10	144,69	140,59
2,3	136,29	143,03	139,98	136,39
2,4	135,43	138,34	135,58	132,10
2,5	131,90	133,98	131,28	128,4
2,6	126,37	129,91	127,67	124,74
2,7	120,98	126,11	123,97	121,29
2,8	118,48	122,54	120,57	118,07
2,9	116,21	119,20	117,47	115,01

3.3.1. Le pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polypropylène:

Les résultats du pouvoir d'arrêt des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polypropylène sont illustrés dans les tableaux 3.17-3.20 (voir annexe 3) et la figure 3.6.

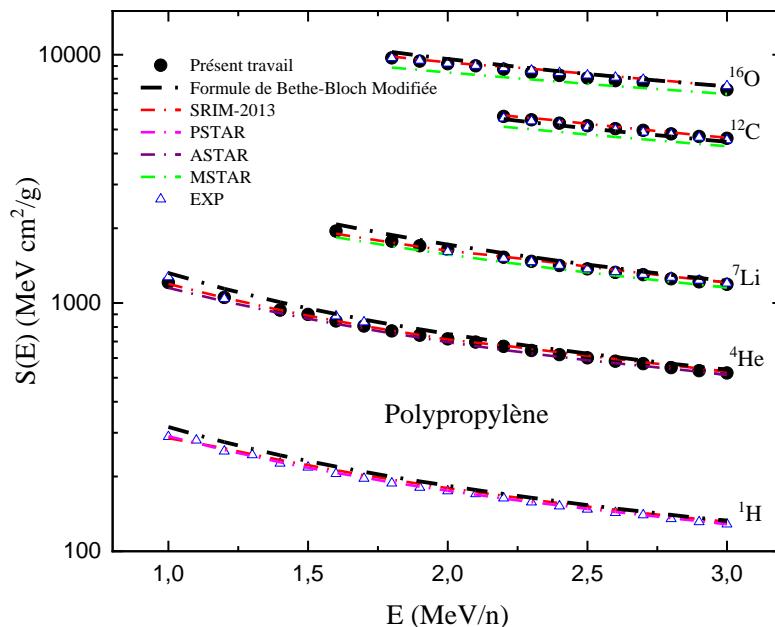


Figure 3.6 : Pouvoirs d'arrêts des protons (Bethe, expérimental, SRIM, PSTAR) et des ions 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polypropylène avec la présente expression (2-16), déterminés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donnés expérimentalement et compilés par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.

Les résultats trouvés sont donnés dans les tableaux 3.17-3.20 (voir annexe 3) et la figure 3.6 sont jugés acceptables, par rapport à ceux donnés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR ainsi que les données expérimentales.

a/ Les ions légers ^4He et ^7Li dans la cible de polypropylène:

On remarque que les présents résultats sont conformes avec ceux calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, on observe des écarts inférieurs ou égaux à 4,8% pour les deux ions dans la gamme d'énergie comprise entre 2 MeV/n et 3 MeV/n. Un bon accord existe par rapport aux codes de calcul principalement SRIM-2013 dont les écarts sont inférieurs à 2,5%. Pour les codes ASTAR et MSTAR, la différence maximale est de 5,1% et 4,7% respectivement pour les ions ^4He et ^7Li dans la gamme d'énergie $1,2 \text{ MeV}/n \leq E \leq 3 \text{ MeV}/n$. On note qu'un remarquable accord existe avec les valeurs expérimentales, où les écarts sont inférieurs ou égaux à 2% pour l'ion ^7Li et 4,7% pour l'ion ^4He dans la gamme d'énergie comprise entre 1,2 MeV/n et 3 MeV/n.

b/ Les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans la cible de polypropylène:

Un bon ajustement a été observé entre nos points et ceux déterminés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, les écarts sont généralement inférieurs ou égaux à 2,5% et 4,5% respectivement pour l'ion ^{12}C et l'ion ^{16}O . Un très bon accord existe entre les résultats trouvés par l'expression (2-16) et ceux générés par SRIM-2013, les écarts sont inférieurs ou égaux à 2,2% et 4,1% respectivement pour les ions ^{12}C et ^{16}O . Cependant, on observe que les différences maximales sont de 10% et 9,2% respectivement pour les ions ^{12}C et ^{16}O par rapport au code de calcul MSTAR. Un assez bon accord a été remarqué entre nos résultats et ceux trouvés expérimentalement, la plupart des écarts sont inférieurs à 3%.

3.3.2. Le pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polycarbonate:

Nous avons suivi la même démarche afin de calculer les pouvoirs d'arrêts des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polycarbonate, les résultats sont représentés dans les tableaux 3.21-3.24 (voir annexe 3) ainsi que la figure 3.7.

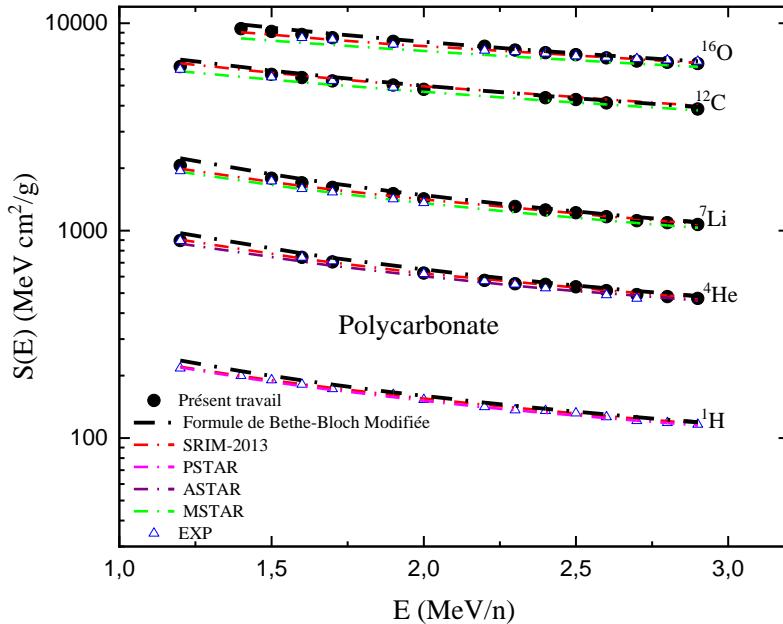


Figure 3.7 : Pouvoirs d’arrêts des protons (Bethe, expérimental, SRIM, PSTAR) et des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O dans le polycarbonate, avec la présente expression (2-16), déterminés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donnés expérimentalement et compilés par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR.

Les tableaux 3.21-3.24 (voir annexe 3) et la figure 3.7 montrent qu’un accord acceptable existe entre nos valeurs et celles données par la formule de Bethe-Bloch modifiée, les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR, MSTAR et les données expérimentales compilées à travers l’AIEA.

a/ Les ions légers ^4He et ^7Li dans la cible de polycarbonate:

L’expression (2-16) reproduit le pouvoir d’arrêt des ions ^4He et ^7Li dans la cible de polycarbonate d’une manière assez bienne et ce en comparant nos valeurs par rapport à la formule de Bethe-Bloch modifiée. On constate que les écarts sont inférieurs ou égaux à 4,8% pour des énergies allant de 1,5 MeV/n à 2,9 MeV/n. Un agrément acceptable est aussi observé entre nos valeurs et celles compilées par les codes de calcul. Les différences maximales obtenues sont généralement de 4,2%, 4,9% et 6% respectivement par rapport à SRIM-2013, ASTAR et MSTAR. On note aussi qu’un accord satisfaisant a été trouvé entre nos résultats et ceux donnés expérimentalement où les déviations maximales sont en leurs majorités inférieures à 2,5% et 6% respectivement pour les ions ^4He , ^7Li .

b/ Les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans la cible de polycarbonate:

Un bon ajustement a été observé entre nos points ainsi que ceux donnés principalement par la formule de Bethe-Bloch modifiée et le code SRIM-2013, les écarts sont généralement inférieurs à 5% pour les deux ions. Par contre l’accord est moins bon avec le code de calcul

MSTAR dont la plupart des déviations sont inférieures à 10%. Enfin, la comparaison de nos valeurs avec celles données expérimentalement sont remarquables, les déviations maximales obtenues sont de 3,1% et 4,6% respectivement pour les ions ^{12}C et ^{16}O .

3.4. Le pouvoir d'arrêt des protons dans les cibles monoatomiques ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag et ^{197}Au :

Dans cette partie, nous avons utilisé les valeurs du pouvoir d'arrêt expérimentales des particules α données dans la section des données nucléaires AIEA (19) avec une bonne précision tableaux 3.8-3.11 et figure 3.8. Nous avons appliqué l'expression (2-19) pour le calcul du pouvoir d'arrêt des protons traversant les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag et ^{197}Au dans la gamme d'énergie [1-13] MeV/n.

Tableau 3.8 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{27}Al données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)
1	698,33	688,63	699,1	680,95
1,2	622,34	619,15	622,29	627,38
1,4	563,17	563,20	560,76	566,67
1,6	515,58	518,05	514,57	517,80
1,8	476,34	481,02	473,49	477,40
2	443,36	448,69	440,1	438,34
2,4	390,78	395,15	384,63	390,13
2,8	350,55	352,91	348,66	349,51
3	333,74	335,60	331,56	332,55
3,6	292,66	294,17	290,21	291,03
4	271,01	272,16	268,26	269,39
4,6	244,52	245,74	242,51	243,05
5	229,85	230,63	227,2	228,54
5,4	217,02	218,12	216,96	215,78
5,6	211,19	211,91	210,38	209,82
7	178,47	179,09	175,97	178,32
13	110,71	111,05	109,82	111,48

Tableau 3.9 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{63}Cu données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)
1	464,19	476,22	483,8	467,21
1,4	390,31	399,02	404,07	399,05
1,8	339,30	345,25	347,65	343,75
2	319,10	323,63	326	322,57
2,4	285,79	289,10	289,78	287,73
2,6	272,01	274,28	276,15	273,28
2,8	259,65	261,47	263,82	260,44

3	248,51	249,96	252,12	249,22
3,2	238,46	239,85	241,03	238,77
3,4	229,31	230,54	231,45	229,54
3,6	220,92	222,04	222,73	220,86
3,8	213,27	214,13	214,02	213,13
4	206,20	206,82	206,28	205,77
4,2	199,61	200,22	200,38	199,18
4,4	193,57	194,01	193,70	193,04
4,6	187,95	188,31	188,45	187,20
4,8	182,69	183,01	182,80	181,99
5	177,77	177,70	177,4	177,07
7,2	137,79	137,67	137,33	141,39
13	89,70	89,50	89,25	89,65

Tableau 3.10 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{107}Ag données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)
1	363,58	386,45	376,3	381,97
1,4	308,94	320,56	313,56	315,20
1,8	270,88	276,01	272,50	273,66
2	255,81	258,19	256,38	257,92
2,4	231,04	232,67	230,44	232,24
2,6	220,70	221,55	220,57	221,41
2,8	211,42	211,84	211,59	211,86
3	203,03	203,14	202,52	203,04
3,4	188,42	188,22	187,95	187,91
3,6	182,01	181,72	181,12	181,49
3,8	176,10	175,61	174,85	175,41
4	170,63	170,01	169,57	169,88
4,2	165,54	164,90	164,29	164,63
4,4	160,79	160,10	159,55	159,89
4,6	156,36	155,69	155,26	155,25
4,8	152,20	151,49	151,00	151,12
5	148,29	147,39	146,71	147,16
7	118,89	117,96	117,46	117,96
7,2	116,67	115,86	115,52	119,69
13	80,43	76,79	76,71	77,09

Tableau 3.11 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible ^{197}Au données expérimentalement, calculées par l'expression de Bethe-Bloch modifiée et générées par les codes SRIM-2013, ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)
1	240,47	261,47	258,7	257
1,2	225,58	240,53	238,09	238,98
1,4	212,33	223,30	221,40	223,17
1,6	200,68	208,98	207,50	209,86
1,8	190,44	197,06	195,75	198,16
2	181,36	186,45	185,6	188,16
2,2	173,27	178,34	176,33	179,10
2,4	166,00	170,43	168,73	170,97
2,6	159,44	163,22	162,47	163,79
2,8	153,47	156,71	155,95	157,15

3	148,01	150,80	149,95	151,17
3,2	143,00	145,50	144,25	145,77
3,4	138,38	140,59	139,86	140,77
3,6	134,10	136,09	135,44	136,25
3,8	130,12	131,88	130,83	132,10
4	126,41	127,98	127,20	128,12
6,9	91,16	91,95	91,54	92,80
7	90,33	91,16	90,61	90,13
13	61,07	60,89	60,55	60,68

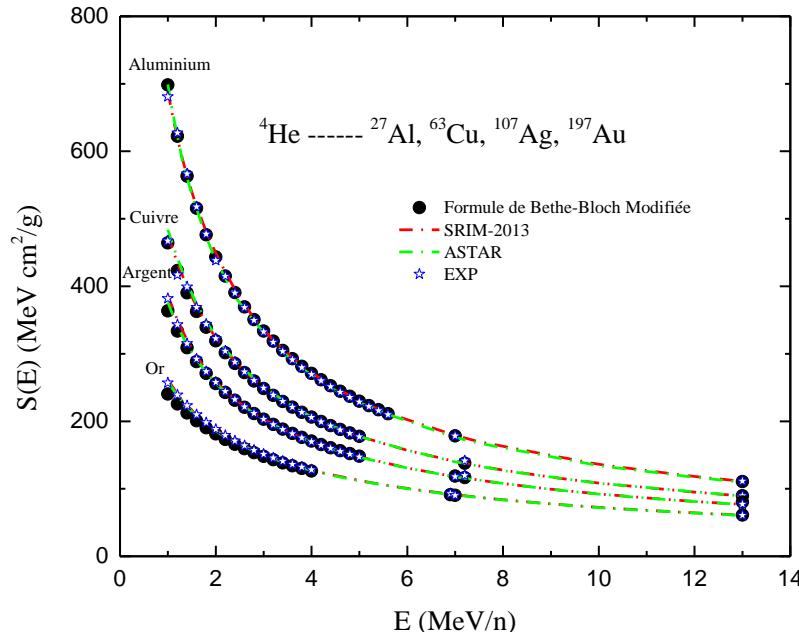


Figure 3.8 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, et compilées à travers les codes de calcul SRIM-2013 et ASTAR.

Tableau 3.12 : Comparaison entre les valeurs du pouvoir d'arrêt expérimentales des particules α données par différents auteurs compilées dans (19), et celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée dans la cible d'or.

E (MeV/n)	$S_p(E)_{EXP}$ (MeV.cm ² /g)	Reference ID	Incertitude (%)	$S_a(E)_{Bethe}$ (MeV.cm ² /g)	Er (%) ($S_a(E)_{EXP} / S_a(E)_{Bethe}$)
1,6	209,86	An1981 (68)	0,6	200,68	4,5
1,8	198,16	An1981 (68)	0,6	190,44	4
2	188,16	An1981 (68)	0,6	181,36	3,7
2,4	170,97	An1981 (68)	0,6	166,00	2,9
2,6	163,79	An1981 (68)	0,6	159,44	2,7
2,8	157,15	An1981 (68)	0,6	153,47	2,4
3	151,17	An1981 (68)	0,6	148,01	2,1
3,4	140,77	An1981 (68)	0,6	138,38	1,7
3,6	136,25	An1981 (68)	0,6	134,10	1,6
3,8	132,10	An1981 (68)	0,6	130,12	1,5
4	128,12	An1981 (68)	0,6	126,41	1,3
6,9	92,80	Ta1983 (69)	0,7	91,16	1,8
7	90,13	Is1971 (70)	1	90,33	0,2
13	60,68	Sk1991 (71)	0,6	61,07	0,6

Dans la figure (3.8), nous avons donné les valeurs expérimentales du pouvoir d'arrêt des particules α à travers les cible d'aluminium, de cuivre, d'argent et d'or pour des énergies allant de 1 à 13 MeV/n, avec des incertitudes généralement inférieures ou égales à 0,6 %. Les différences trouvées entre ces valeurs et celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée sont généralement inférieures ou égales à 2,8 % pour l'aluminium, le cuivre, l'argent et 4% pour l'or. Dans le tableau (3.12) nous avons présenté les valeurs expérimentales du pouvoir d'arrêt des particules α dans l'or avec leurs incertitudes et la référence associée à chaque expérience. Nous constatons qu'il existe un très bon accord entre ces résultats expérimentaux et ceux calculés par de la formule de Bethe-Bloch modifiée. Ce qui nous a permis de remplacer le pouvoir d'arrêt des particules alpha calculé S_α (cal) par S_α (exp) donnés avec une bonne précision (19) dans l'expression (2-19).

3.4.1. Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{27}_{13}Al$:

L'expression (2-19) a été utilisée pour déterminer le pouvoir d'arrêt des protons à travers la cible $^{27}_{13}Al$ pour des énergies comprises entre 1 et 13 MeV/n. les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 3.25 (voir annexe 3) et la figure 3.9.

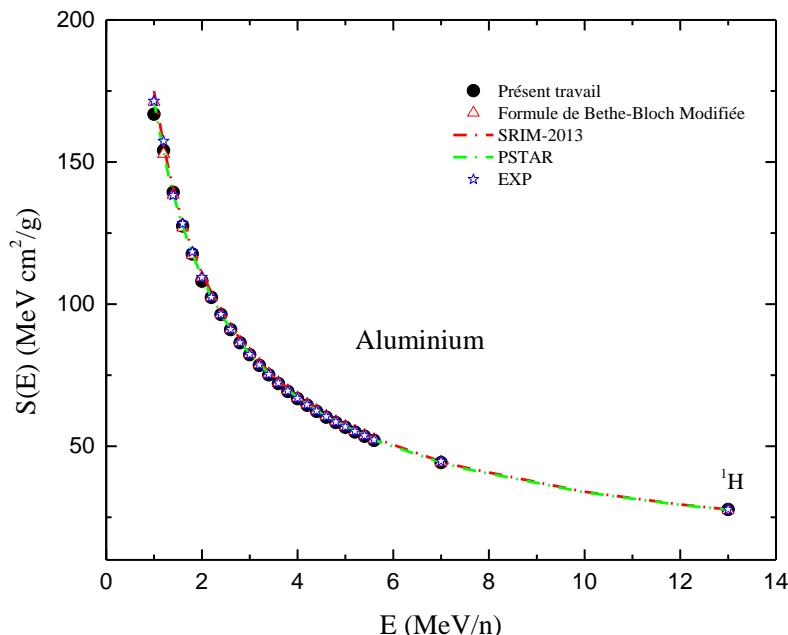


Figure 3.9 : Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{27}_{13}Al$, calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement, et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.

Nous constatons que les valeurs du pouvoir d'arrêt calculées par l'expression (2-19) sont en bon accord avec la formule de Bethe-Bloch modifiée, le maximum des écarts est égal à 2,6%. On remarque aussi que nos valeurs sont jugées acceptables par rapport aux codes de

calcul, où les déviations sont inférieures ou égales à 4,9% et 3% respectivement par rapport à SRIM-2013 et PSTAR. Enfin, un accord remarquable est observé avec les valeurs expérimentales, la différence maximale est de 2,7 % dans la gamme d'énergie 1-13 MeV/n.

3.4.2. Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{63}_{29}Cu$:

Nous avons calculé le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible de $^{63}_{29}Cu$ aux énergies comprises entre 1 et 13 MeV/n en appliquant l'expression (2-19). Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 3.26 (voir annexe 3) et la figure 3.10.

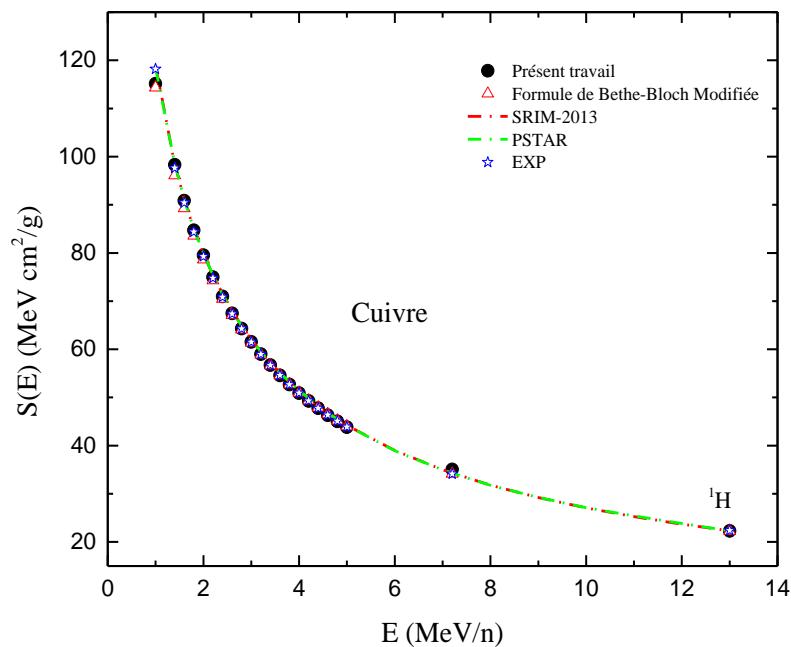


Figure 3.10 : Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{63}_{29}Cu$, calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement, et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.

Nous remarquons qu'un très bon accord existe principalement entre nos résultats et ceux calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR les écarts sont respectivement inférieurs ou égaux à 2,6%, 3,3% et 2,8%. La présente expression reproduit correctement les résultats du pouvoir d'arrêt des protons dans le cuivre comparés à ceux donnés expérimentalement, la déviation maximale est égales à 2,7%.

3.4.3. Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{107}_{47}Ag$:

Dans le tableau 3.27 (voir annexe 3) et la figure 3.11, sont représentés les résultats du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{107}_{47}Ag$ pour des énergies allant de 1 à 13 MeV/n, en utilisant la présente expression (2-19) du pouvoir d'arrêt.

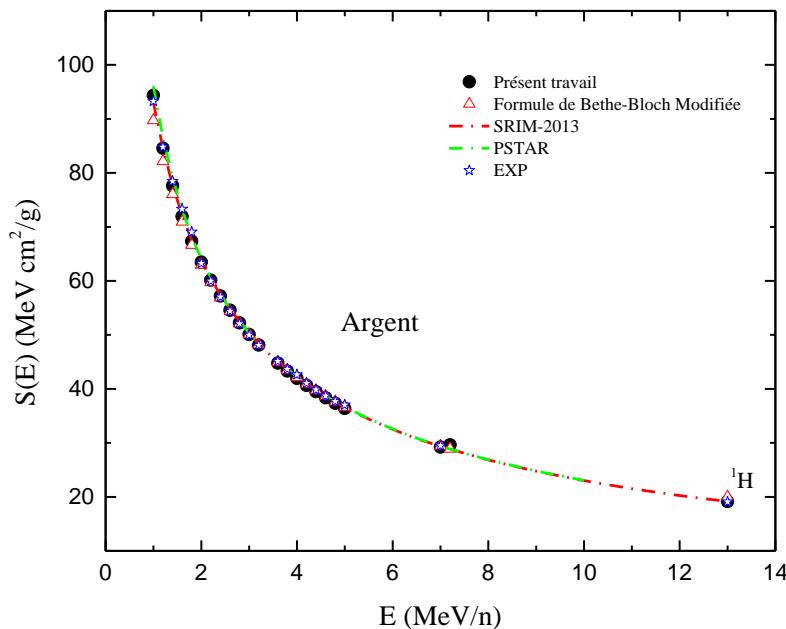


Figure 3.11 : Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{107}_{47}Ag$ calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement, et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.

D'après le tableau 3.27 (voir annexe 3) et la figure 3.11, on constate qu'une bonne concordance existe entre les résultats du pouvoir d'arrêt calculés par l'expression (2-19) et ceux déterminés à l'aide de la formule de Bethe-Bloch modifiée, la plupart des écarts sont inférieurs à 5%. Par ailleurs, un assez bon accord a été obtenu avec les codes de calcul, on note que les déviations maximales sont trouvées égales à 2,8% par rapport à SRIM-2013 et PSTAR. Les présentes valeurs sont en très bon agrément avec celles données expérimentalement, dont les écarts ne dépassent pas 2,5%.

3.4.4. Le pouvoir d'arrêt des protons dans la cible $^{197}_{79}Au$:

La même procédure a été appliquée afin de déterminer le pouvoir d'arrêt des protons à travers la cible $^{197}_{79}Au$ dans la gamme d'énergie 1-13 MeV/n. les résultats sont mentionnés dans le tableau 3.28 (voir annexe 3) et la figure 3.12.

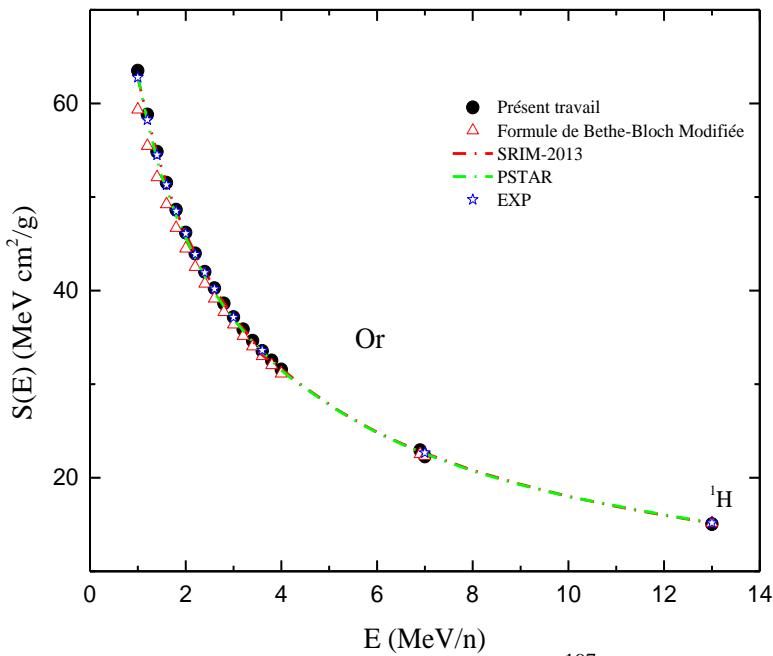


Figure 3.12 : Pouvoir d'arrêt des protons dans la cible ^{197}Au calculé avec la présente expression (2-19), déterminé par à la formule de Bethe-Bloch modifiée, donné expérimentalement, et généré à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR.

Nos valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible d'or pour les énergies comprises entre 1-13 MeV/n sont jugées acceptables comparées à celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, l'écart maximum est de 6,9%. Un accord remarquable a été trouvé entre nos résultats et ceux compilés à travers les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR, les déviations sont respectivement inférieures à 2,9% et 1,5%. Enfin, on remarque qu'un excellent accord existe entre nos valeurs et celles trouvées expérimentalement, où $Er(S(E)) \leq 1,1\%$.

3.5. Le pouvoir d'arrêt des protons dans les polymères:

Nous avons calculé le pouvoir d'arrêt des protons dans les polymères à savoir le mylar [1,1-7,1] MeV/n et le polycarbonate [1,1-6] MeV/n, en utilisant l'expression (2-19). Les valeurs obtenues par cette expression sont présentées dans les tableaux 3.13 et 3.14 ainsi que les figures 3.13 et 3.14. Nous avons appliqué la règle de Bragg-Kleeman pour la détermination du pouvoir d'arrêt dans ces cibles composées (38).

Tableau 3.13 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le mylar, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)
1,1	880,54	966,52	927,65	888,96
1,2	832,55	904,98	874,01	838,15
1,3	790,56	851,62	826,16	791,68
1,4	738,58	804,90	783,43	752,80
1,8	611,66	664,16	652,82	628,43
7,1	230,17	226,98	227,62	222,12

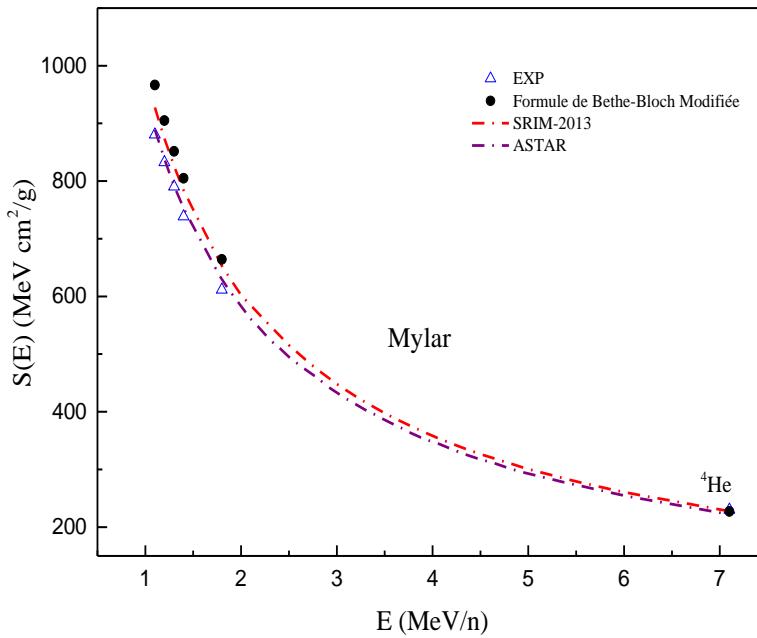


Figure 3.13 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le mylar, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.

Tableau 3.14 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le polycarbonate, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)
1,1	936,03	1000,69	960,68	920,54
1,3	854,05	880,70	854,39	819,69
1,7	713,06	716,22	701,96	677,07
1,9	644,99	657,16	646,82	625,12
2,1	593,02	608,11	602,28	581,55
2,3	551,05	566,65	566,15	542,95
2,5	507,05	531,08	530,83	510,5
2,7	471,02	500,18	500,61	485,39
3	446,01	460,70	460,88	448,68
3,8	355,04	382,76	383,32	371,37
6	265,01	266,39	267,25	261,20

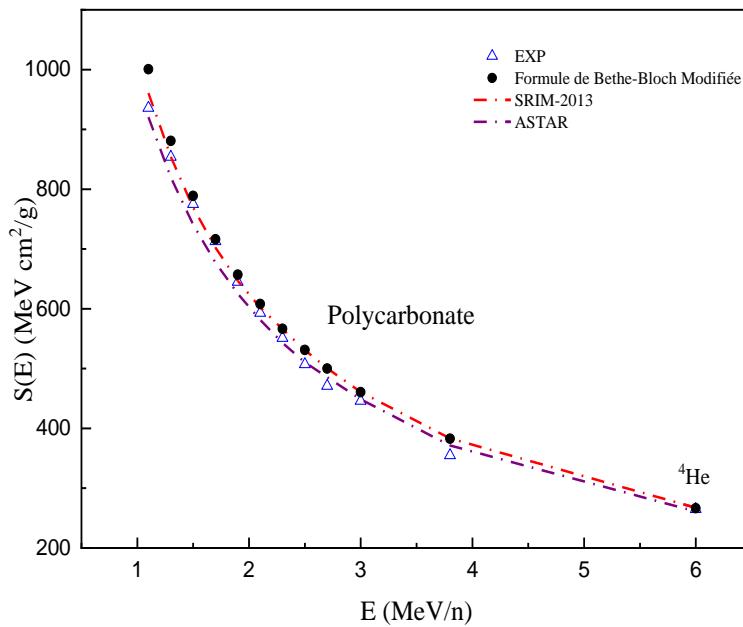


Figure 3.14 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans le polycarbonate, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.

3.5.1. Le pouvoir d'arrêt des protons dans le mylar:

Les résultats du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible du mylar pour des énergies comprises entre 1,1 MeV/n et 7,1 MeV/n sont représentés dans le tableau 3.29 (voir annexe 3) et la figure 3.15.

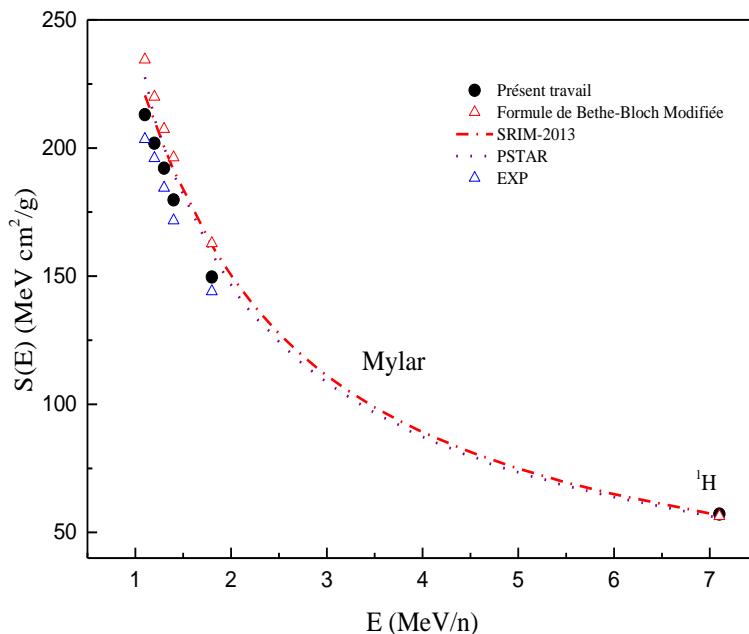


Figure 3.15 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans le mylar, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.

D'après les résultats cités dans le tableau 3.28 (voir annexe 3) et la figure 3.15, on constate qu'un accord moyen existe entre les valeurs du pouvoir d'arrêt calculées par la présente expression (2-19) et la formule de Bethe-Bloch modifiée, où le maximum des écarts est égal à 9,2%. Cette expression reproduit d'une manière acceptable le pouvoir d'arrêt des protons dans le mylar comparé aux codes de calcul, la plupart des déviations sont inférieures à 6% par rapport à SRIM-2013 et PSTAR. D'une autre part, on remarque que nos valeurs sont en bon agrément avec les données expérimentales dont la différence maximale est de 4,6%.

3.5.2. Le pouvoir d'arrêt des protons dans le polycarbonate:

Pour la détermination du pouvoir d'arrêt des protons dans la cible de polycarbonate pour des énergies comprises entre [1,1-6] MeV/n, nous adoptons l'expression (2-19). Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 3.30 (voir annexe 3) et la figure 3.16.

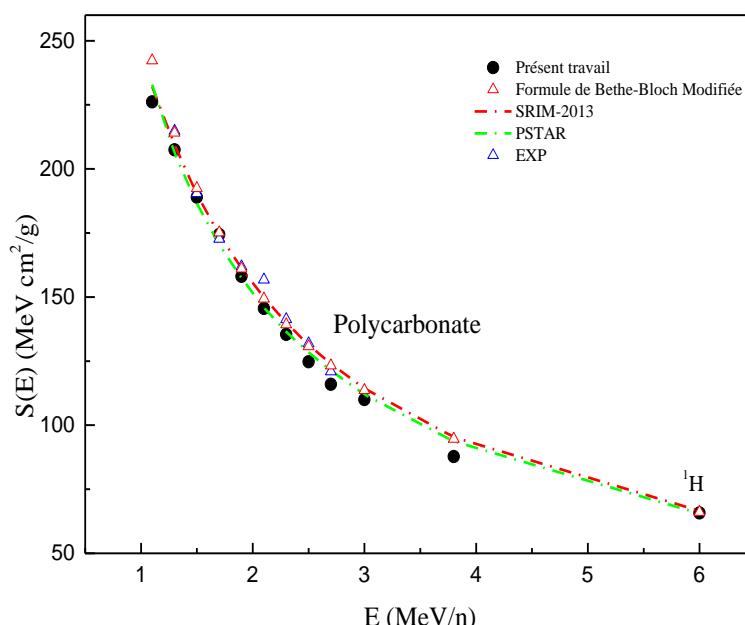


Figure 3.16 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons dans le polycarbonate, données expérimentalement, calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées à travers les codes SRIM-2013 et ASTAR.

Nous notons qu'un accord juste acceptable existe entre les présents résultats et ceux calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, les écarts sont inférieurs ou égaux à 7,8% sur toute la gamme d'énergie. Un bon agrément est observé avec les codes de calcul notamment SRIM-2013 ($Er(S(E)) \leq 5\%$), par ailleurs, on remarque que tous les écarts sont inférieurs à 6,8% par rapport à PSTAR. Enfin, cette expression (2-19) est en bon accord avec les résultats expérimentaux on constate que la plupart des écarts sont inférieurs à 5%.

3.6. Ecart sur le pouvoir d'arrêt de quelques ions par rapport aux expressions (2-16) et (2-19):

Afin d'étudier l'ajustement entre les valeurs du pouvoir d'arrêt, données expérimentalement, déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et compilées par le code SRIM-2013, par rapport à celles calculées par nos expressions qui sont prises comme références. Nous avons déterminé les écarts sur les pouvoirs d'arrêts des ions ^1H , ^4He , ^7Li , ^{12}C et ^{16}O dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{197}Au , polypropylène et polycarbonate.

L'expression de l'écart s'écrit :

$$Er(S(E)) = \left[\frac{S(E)_{\text{calculé/donné}}}{S(E)_{\text{référence}}} - 1 \right] \quad (3-2)$$

$$S(E)_{\text{référence}} \equiv S(E)_{\text{expression (2-16 ou 2-19)}}$$

$$S(E)_{\text{calculé/donné}} \equiv S(E)_{\text{Bethe}}, S(E)_{\text{SRIM-2013}}, S(E)_{\text{Experimental}}$$

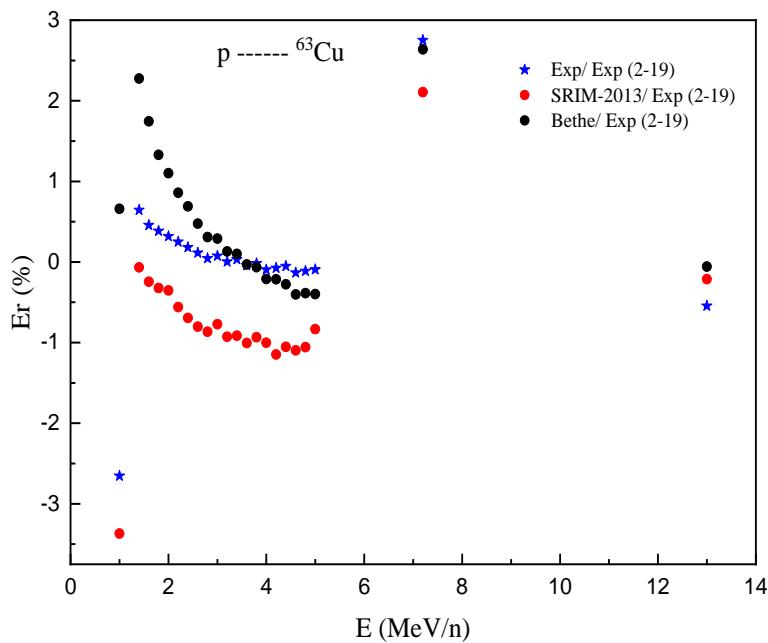


Figure 3.17 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts des protons dans la cible ^{63}Cu , donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013 par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-19).

On constate d'après la figure (3.17), qu'un très bon accord existe entre les écarts sur les pouvoirs d'arrêts des protons, donnés expérimentalement, générés par le code SRIM-2013 et calculés à travers la formule de Bethe-Bloch modifiée (ces écarts sont calculés par rapport aux valeurs de l'expression (2-19) qui sont prises comme références) dans la cible ^{63}Cu . Les

écart (en valeurs absolues) sont trouvés respectivement inférieurs ou égaux à 1%, 1,2% et 2,5%.

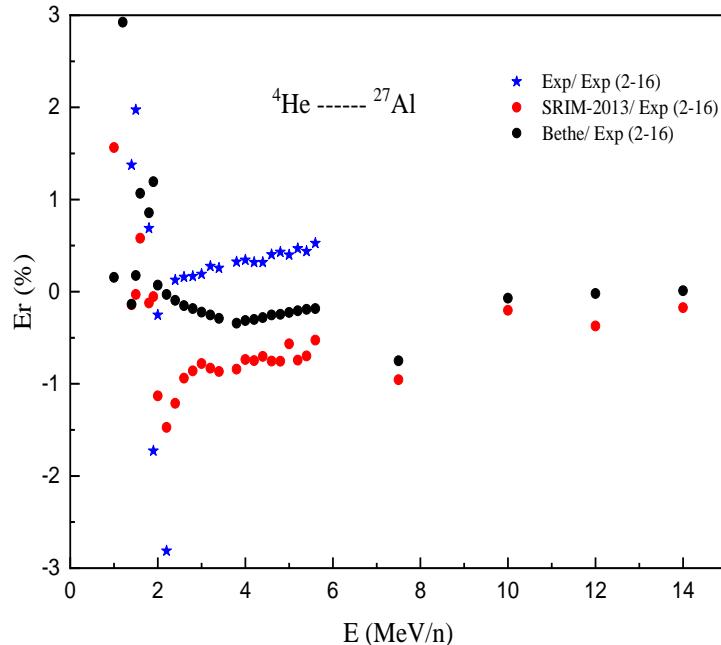


Figure 3.18 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^4He dans la cible ^{27}Al , donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013 par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-16).

Sur la figure 3.18, on a représenté les écarts sur les pouvoirs d'arrêts des ions ^4He dans la cible ^{27}Al , on remarque qu'un excellent accord est obtenu entre les différents écarts pour les pouvoirs d'arrêts donnés expérimentalement, compilés par le code SRIM-2013 et calculés à travers la formule de Bethe-Bloch modifiée (ces écarts sont calculés par rapport aux valeurs de l'expression (2-16) qui sont prises comme références). Pour des énergies $E > 2 \text{ MeV/n}$, les écarts maximums ($|Er|$) sont respectivement 1%, 1,6% et 0,50%.

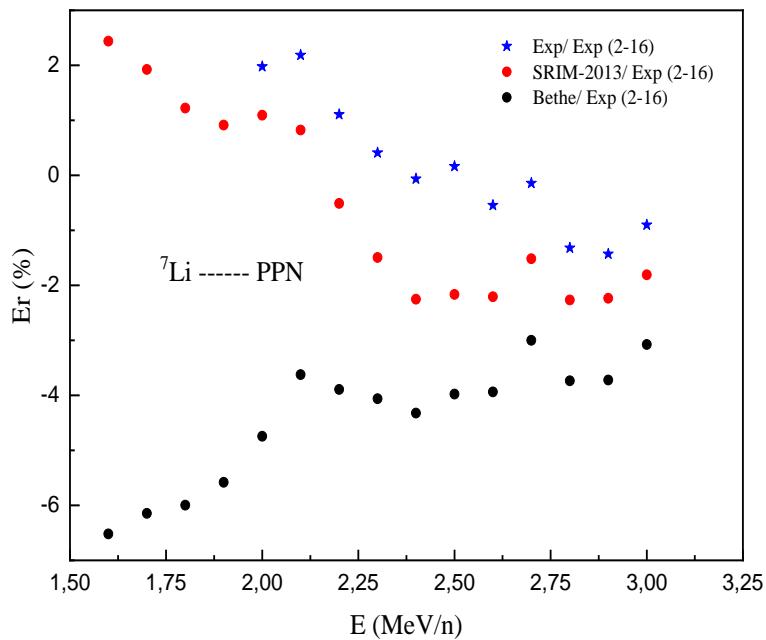


Figure 3.19 : Les écarts sur les pouvoirs d’arrêts de l’ion ^7Li dans le polypropylène, donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013 par rapport aux valeurs déterminées par l’expression (2-16).

Un accord acceptable est trouvé entre les écarts sur les pouvoirs d’arrêts des ions ^7Li dans la cible de polypropylène donnés expérimentalement, générés par le code SRIM-2013 et calculés à travers la formule de Bethe-Bloch modifiée, par rapport à nos valeurs de l’expression (2-16). Les écarts sont trouvés respectivement inférieurs ou égaux à 2%, 2,5% et 6,5%.

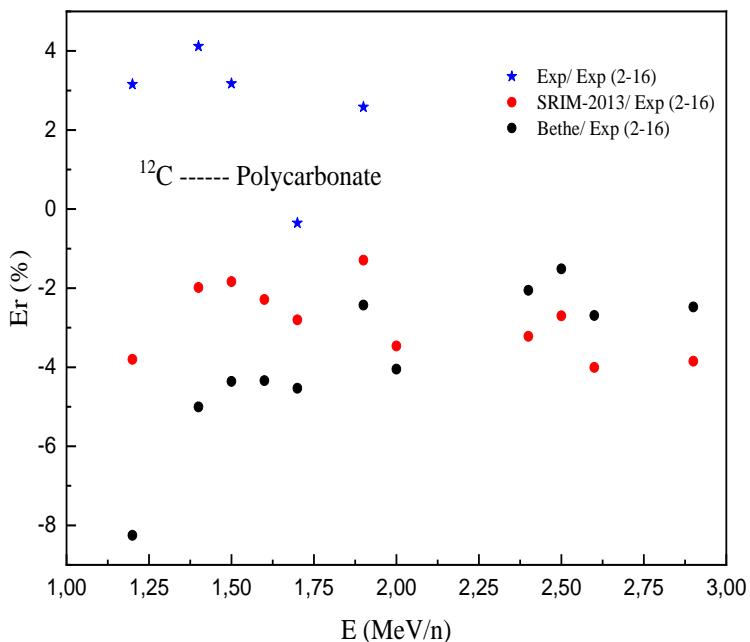


Figure 3.20 : Les écarts sur les pouvoirs d’arrêts de l’ion ^{12}C dans le polycarbonate, donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013, par rapport aux valeurs déterminées par l’expression (2-16).

La figure 3.20 illustre les écarts sur les pouvoirs d'arrêts des ions ^{12}C (S_c) dans la cible de polycarbonate donnés expérimentalement, générés par le code SRIM-2013 et calculés à travers la formule de Bethe-Bloch modifiée, par rapport à nos valeurs de l'expression (2-16). Les écarts sont trouvés respectivement inférieurs ou égaux à 2%, 2,5% et 6,5%.

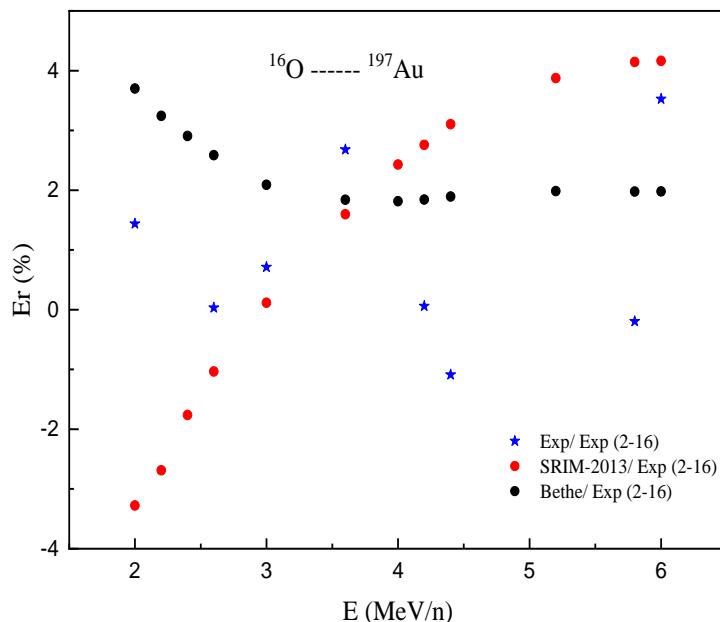


Figure 3.21 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^{16}O dans la cible ^{197}Au , donnés expérimentalement, calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générés par le code SRIM-2013, par rapport aux valeurs déterminées par l'expression (2-16).

Un bon accord existe entre les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ^{16}O dans la cible ^{197}Au , donnés expérimentalement, compilés par le code SRIM-2013 et calculés par la formule de Bethe-Bloch modifiée, par rapport aux valeurs de l'expression (2-16) (figure 3.21). Les écarts maximums obtenus sont respectivement 3,5%, 4% et 4%.

3.7. Comparaison entre les deux expressions (2-16) et (2-18) par rapport au code SRIM-2013 (application à l'ion 7Li dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polycarbonate)

Dans cette partie du travail, une comparaison a été faite entre le pouvoir d'arrêt calculé par les expressions (2-16) et (2-18) de l'ion 7Li dans les cibles d'aluminium, de cuivre, d'argent, d'or et de polycarbonate (figure. 3.22).

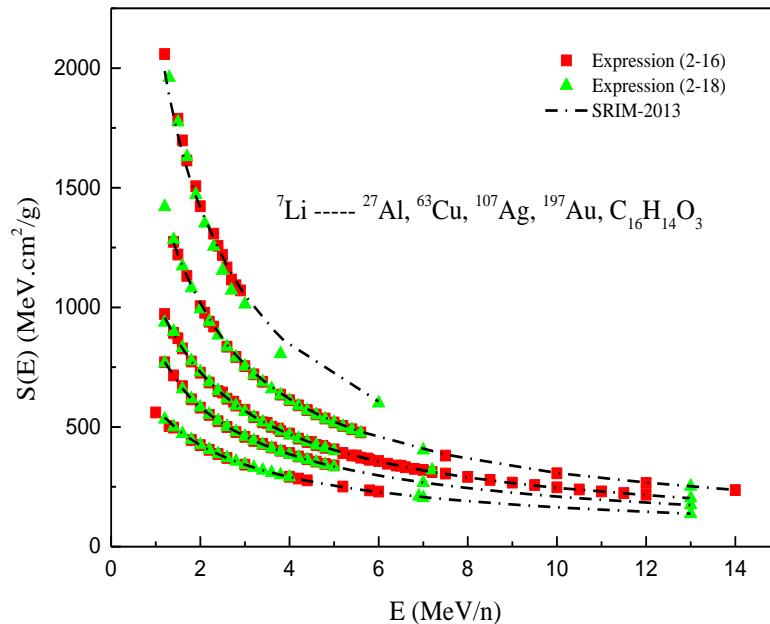


Figure 3.22 : Comparaison entre les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans les cibles ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{63}\text{Cu}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{197}\text{Au}$ et polycarbonate calculées par les expressions (2-16, 2-18), et compilées par le code SRIM-2013.

Sur la figure 3.22, nous avons représenté les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans les cibles ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{63}\text{Cu}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{197}\text{Au}$ et polycarbonate calculées par les expressions (2-16, 2-18), et compilées par le code SRIM-2013. Nous remarquons que la majorité de nos points coïncident correctement avec ceux donnés par le code SRIM-2013 qui est pris comme référence.

Sur les figures 3.23-3.26, nous avons sélectionné quelques paires ${}^7\text{Li}$ -cible, pour évaluer les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans les différentes cibles, par rapport au code de calcul SRIM-2013.

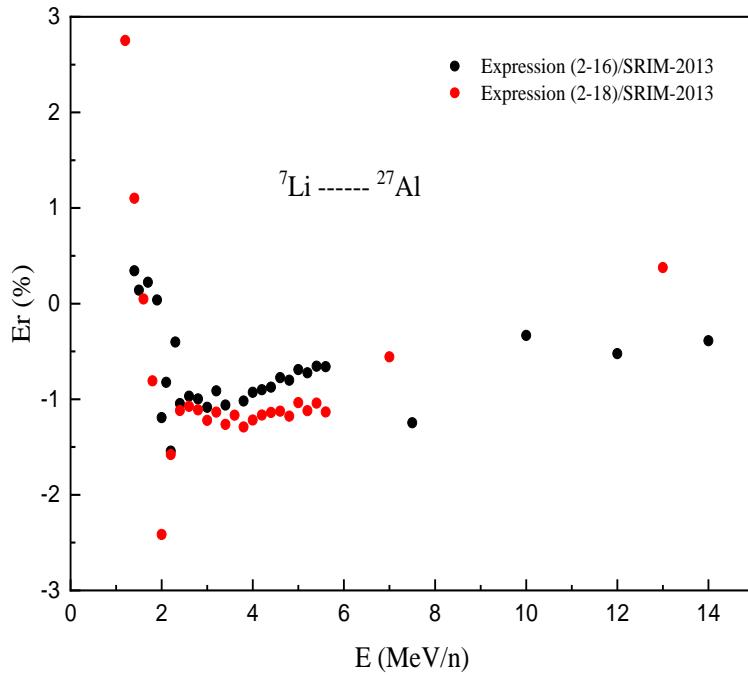


Figure 3.23 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans la cible ${}^{27}\text{Al}$, calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.

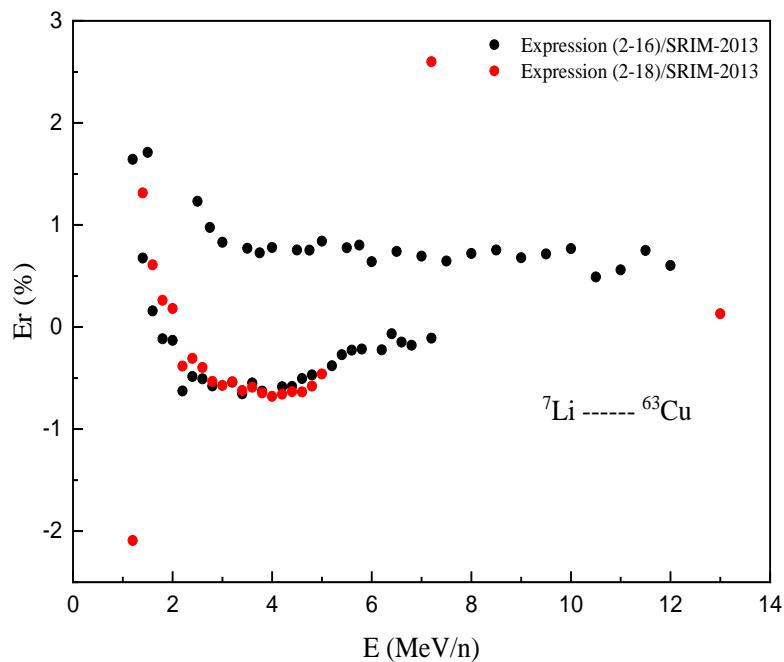


Figure 3.24 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans la cible ${}^{63}\text{Cu}$, calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.

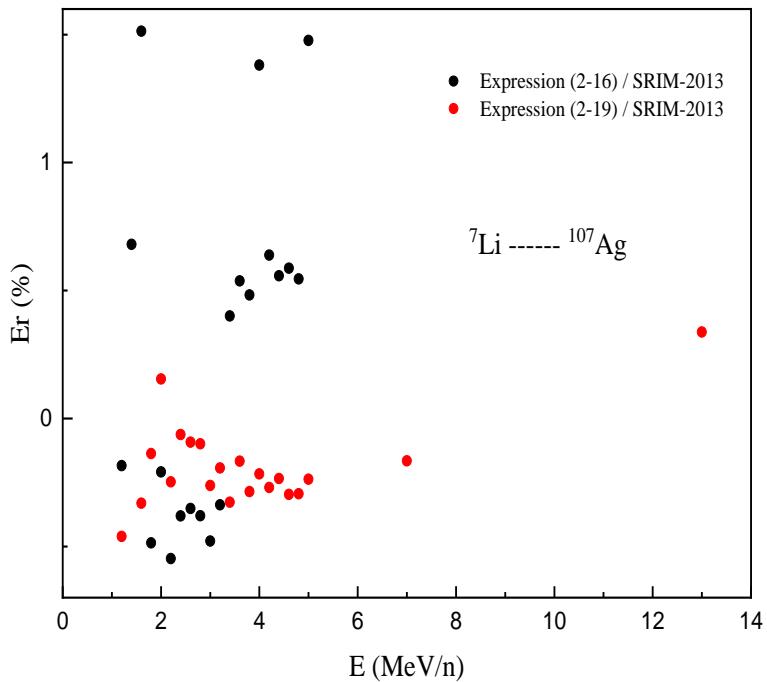


Figure 3.25 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans la cible ${}^{107}\text{Ag}$, calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.

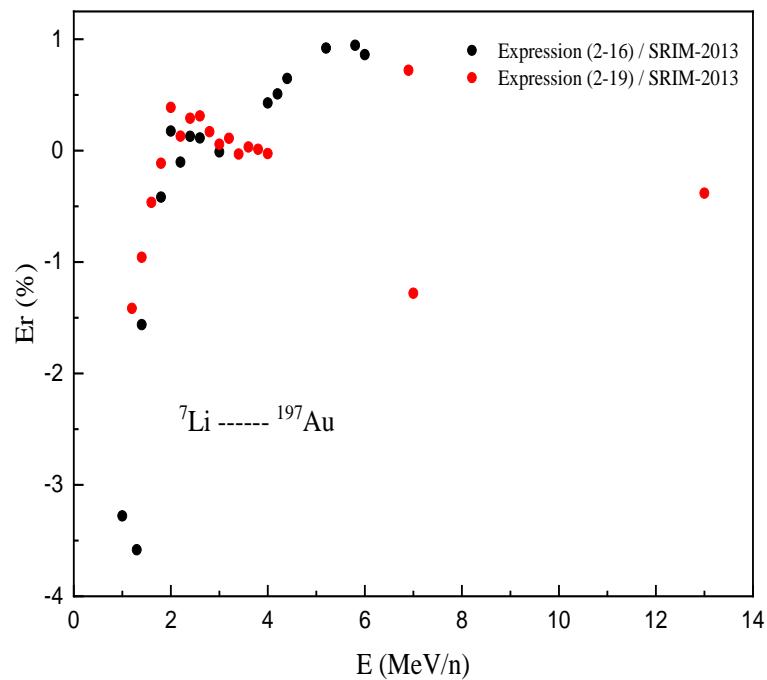


Figure 3.26 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans la cible ${}^{197}\text{Au}$, calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.

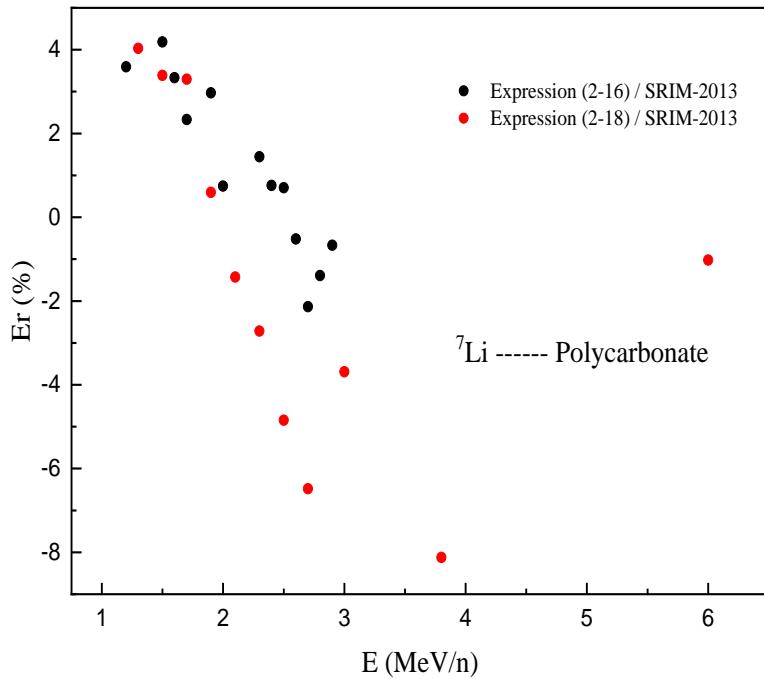


Figure 3.27 : Les écarts sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans le polycarbonate, calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.

D'après les figures 3.23-3.27, nous constatons qu'un accord très acceptable est obtenu entre les écarts des pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans les cibles ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{63}\text{Cu}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{197}\text{Au}$, polycarbonate calculés par les deux expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013. Les écarts sont respectivement inférieurs ou égaux à (le maximum d'écart est pris parmi les deux expressions) 2,75%, 2,6%, 1,5%, 3,6% et 6,5% (Excepté l'énergie 3,8 MeV/n pour le polycarbonate).

Dans le tableau 3.15, on va mentionner les écarts maximums obtenus de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans les cinq cibles pour les deux expressions par rapport au code de calcul SRIM-2013.

Tableau 3.15 : Les valeurs des écarts maximums sur les pouvoirs d'arrêts de l'ion ${}^7\text{Li}$ dans les cibles ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{63}\text{Cu}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{197}\text{Au}$ et polycarbonate pour les expressions (2-16, 2-18), par rapport au code de calcul SRIM-2013.

${}^7\text{Li}$ --- Cible	E_r (Expression (2-16) / SRIM-2013) (%)	E_r (Expression (2-18) / SRIM-2013) (%)
${}^7\text{Li}$ --- ${}^{27}\text{Al}$	1,5	2,75
${}^7\text{Li}$ --- ${}^{63}\text{Cu}$	1,7	2,6
${}^7\text{Li}$ --- ${}^{107}\text{Ag}$	1,5	0,4
${}^7\text{Li}$ --- ${}^{197}\text{Au}$	3,6	1,4
${}^7\text{Li}$ --- polycarbonate	4,2	6,5 (E \neq 3,8 MeV/n)

3.8. Extension de la gamme d'énergie à 120 MeV/n pour les ions ^4He , ^{16}O traversant les cibles ^{27}Al et ^{107}Ag en utilisant l'expression (2-16):

En raison du manque de valeurs expérimentales pour les énergies élevées, nous avons élargi la gamme d'énergie jusqu'à 120 MeV/n en utilisant les valeurs compilées par les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR pour le calcul du pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^{16}O traversant les cibles ^{27}Al , ^{107}Ag en appliquant l'expression (2-16).

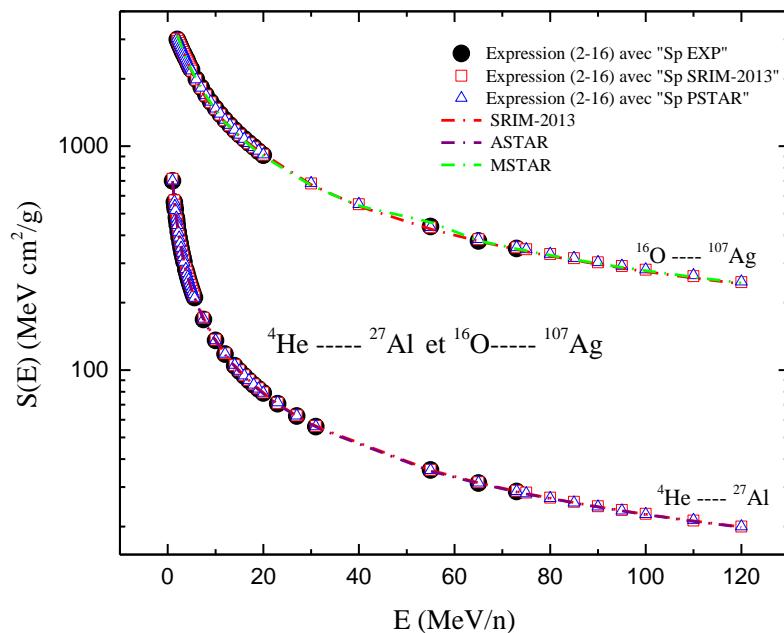


Figure 3.28 : Pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^{16}O respectivement dans les cibles ^{27}Al et ^{107}Ag dans la gamme d'énergie 1-120 MeV/n en utilisant les valeurs générées par les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR dans l'expression (2-16).

D'après la figure 3.28, nous remarquons que les valeurs du pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^{16}O dans les cibles ^{27}Al , ^{107}Ag calculées par l'expression (2-16) coïncident avec celles générées par SRIM-2013, ASTAR, MSTAR dans la gamme d'énergie 1-120 MeV/n. L'accord est particulièrement meilleur entre nos valeurs et celles données par les codes ASTAR et SRIM-2013 aux énergies $E \geq 3$ MeV/n. La majorité des écarts sont trouvés inférieurs à 3%.

3.9. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons calculé le pouvoir d'arrêt des ions ^1H , ^4He , ^7Li , ^{12}C , ^{16}O à travers les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , polypropylène, mylar et polycarbonate, dans la gamme d'énergie 1-14 MeV/n. Un bon accord est trouvé entre nos valeurs et celles générées

par les différents codes de calcul, données expérimentalement et calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée. L'écart maximum obtenu est inférieur ou égal à 5%, par rapport aux valeurs expérimentales. Une comparaison a été faite entre les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au et polycarbonate calculées par les expressions (2-16) et (2-18) avec celles compilées par le code de calcul SRIM-2013. La déviation maximale trouvée pour les cinq cibles est de 6,5%. Enfin, nous avons élargi la gamme d'énergie jusqu'à 120 MeV/n en utilisant les valeurs du pouvoir d'arrêt générées par les codes SRIM-2013 et PSTAR dans l'expression (2-16). Aux énergies $E \geq 3$ MeV/n, la majorité des écarts sont trouvés inférieurs à 3% (entre nos valeurs et celles données par les codes ASTAR et SRIM-2013).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, nous avons proposé deux expressions pour le calcul du pouvoir d'arrêt des particules chargées. Ces expressions sont déduites de la formule de Bethe-Bloch modifiée et sont basées sur les valeurs précises des protons ainsi que des particules α . Ces dernières sont indépendantes des corrections des couches, de l'effet de densité et du potentiel d'ionisation.

Nous avons utilisé l'expression (2-16) pour le calcul du pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C , et ^{16}O à travers les cibles ^{27}Al [1-14] MeV/n, ^{63}Cu [1-12] MeV/n, ^{107}Ag [1-5] MeV/n, ^{197}Au [1-6] MeV/n, polypropylène [1-3] MeV/n et polycarbonate [1,2-2,9] MeV/n. Nous avons aussi appliqué l'expression (2-19) pour la détermination du pouvoir d'arrêt des protons traversant les mêmes cibles monoatomiques citées ci-dessus dans la gamme d'énergie [1-13] MeV/n ainsi que le mylar [1,1-7,1] MeV/n et le polycarbonate [1,1-6] MeV/n.

Dans le but de comparer nos valeurs du pouvoir d'arrêt obtenues par les deux expressions (2-16 et 2-19) avec celles données par la formule de Bethe-Bloch modifiée avec ses différents termes correctifs intervenant dans le calcul (corrections de couches, de Barkas, de Bloch,.....). Enfin, la charge effective (Z_1^*) a été introduite dans nos calculs pour les ions ^7Li , ^{12}C et ^{16}O aux vitesses intermédiaires $2Z_1V_0 \geq V \geq V_0Z_1^{2/3}$.

L'accord est remarquable entre nos valeurs du pouvoir d'arrêt des ions légers ^4He , ^7Li dans les quatre cibles monoatomiques calculées par l'expression (2-16) avec celles déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées par les codes de calcul SRIM-2013, MSTAR, ASTAR. Les écarts trouvés sont respectivement inférieurs à 5%, 2,8 % et 2,9% (l'écart maximum est pris parmi les trois codes). Pour les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans ces mêmes cibles, un bon accord est obtenu avec des différences maximales de 4,5%, 6,9% et 5%.

En général, l'accord est acceptable entre nos valeurs du pouvoir d'arrêt des ions ^4He , ^7Li , ^{12}C et ^{16}O dans les cibles polypropylène, polycarbonate avec celles calculées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR, MSTAR. Pour les ions légers ^4He et ^7Li dans les cibles polypropylène, polycarbonate, les écarts sont inférieurs à 4,8%, 4,7% et 6%. Par contre pour

les ions lourds ^{12}C et ^{16}O dans ces deux films polymères, les différences maximales sont respectivement de 5%, 4,6%, 5% (SRIM-2013) et 10% (MSTAR).

L'expression (2-19) qui dépend principalement des valeurs expérimentales précises du pouvoir d'arrêt des particules α a été utilisée pour la détermination du pouvoir d'arrêt des protons traversant les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , mylar et polycarbonate. Un bon accord a été trouvé (particulièrement pour les cibles monoatomiques) entre nos valeurs, celles obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées par les codes de calcul SRIM-2013, PSTAR. Les écarts trouvés sont en général inférieurs à 5% (Bethe-Bloch), 2,7 % (expérimentales), 5% (SRIM) et 3 % (PSTAR).

Les deux expressions du pouvoir d'arrêt (2-16) et (2-19) reproduisent correctement le pouvoir d'arrêt des ions ^1H , ^4He , ^7Li , ^{12}C et ^{16}O dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , mylar, polycarbonate et polypropylène. Leurs utilisations permettent de déterminer le pouvoir d'arrêt avec une meilleure précision (où les termes de la correction de couches (C/Z_2), potentiel d'ionisation (I) et l'effet de densité ($\delta/2$) n'interviennent pas dans les calculs). Contrairement à la formule de Bethe-Bloch modifiée et à l'expression de Ziegler dans son programme TRIM (voir formule de Bethe-Bloch modifiée et annexe 1), où ces termes sont déterminants pour le calcul du pouvoir d'arrêt.

Une comparaison a été faite entre les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^7Li dans les cibles ^{27}Al , ^{63}Cu , ^{107}Ag , ^{197}Au , et polycarbonate obtenues à travers ces deux expressions dans la gamme d'énergie de 1 à 14 MeV/n. Nous avons remarqué que la majorité des points coïncident avec le code de calcul SRIM-2013.

Au manque de valeurs expérimentales du pouvoir d'arrêt pour les énergies élevées, nous avons appliqué l'expression (2-16) pour déterminer les valeurs du pouvoir d'arrêt aux énergies de 1 à 120 MeV/n des ions ^4He , ^{16}O respectivement, dans les cibles ^{27}Al , ^{107}Ag en utilisant celles (S_P) données par les codes de calcul SRIM-2013 et PSTAR. Un accord remarquable est trouvé particulièrement entre nos valeurs et celles générées par les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR. Pour des énergies $E \geq 3$ MeV/n, la plupart des écarts sont trouvés inférieurs à 3%.

Ces deux expressions sont complémentaires et peuvent être utilisées dans les applications en physique médicale (radiothérapie des protons et des ions lourds ^{12}C et ^{16}O).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. S. Damache, Thèse de doctorat, USTHB-Alger, 2007.
2. Chekirine, M., Ammi, H., Choudhury, R.K., Biswasand, D.C., Tobbeche, S., Nucl.Instr and Methds. B 269, 3046 (2011).
3. N. Bohr, Philos. Mag. 25, 10 (1913).
4. N. Bohr, K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys.Medd.18, (8) (1948).
5. H. A. Bethe, Ann. Physik 5 325 (1930).
6. F. Bloch, Ann. Phys. 16, 285 (1933).
7. J. Lindhard, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selesk, 28 N° 8 (1954).
8. J. Lindhard, M. Scharff and Schiott, Mat. Fys.Medd. Dan. Vid. Selesk, 33 N° 14 (1963).
9. P. Sigmund, A. Schinner, Nucl. Instr. and Meth.B 195, 64 (2002).
10. P.L. Grande and G. Schiwietz, "Impact-Parameter Dependence of the Electronic Energy Loss of Fast Ions", Phys. Rev. A58, 3796 (1998).
11. G. Schiwietz and P.L. Grande, "A Unitary Convolution Approximation for the Impact-Parameter Dependent Electronic Energy Loss", Nucl. Instr. and Meth. B153, 1 (1999).
12. G.M de Azevedo, P.L. Grande, and G. Schiwietz, "Impact-Parameter Dependent Energy Loss of Screened Ions", Nucl. Instr. and Meth. B164-165, 203-211 (2000).
13. P. Sigmund, Private communication.
14. Grande, P.L. and Schiwietz, G., program CasP, version 6.0 (2021), available from <http://www.casp-program.org/>.

15. J. F. Ziegler, M. D. Ziegler J.P. Biersack, SRIM-2013 – the Stopping and Range of Ions in Matter, Version 2013.00, code, (2013), available from <http://www.srim.org>.
16. Berger, M.J., Coursey, J.S., Zucker, M.A., Chang, J. ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (2005), available from: <https://physics.nist.gov/>.
17. Paul, H. and Schinner, A., program MSTAR, version 3.12 (2004), available from: <https://www-nds.iaea.org/>.
18. J. F. Ziegler, Journal of Applied Physics 85, 3 (1999).
19. H. Paul, Stopping power of matter for ions- IAEA-NDS (1990), available from: <https://www-nds.iaea.org/stopping/tuples>.
20. O.B. Firsov, Zh. Eksp. Teor. Fis. 36, 1517-1523 [English Translation: Sov. Phys. JETP 9, 1076-1080 (1959)].
21. W. Moller, Short resume of a lecture held at the Technical University of Dresden, Fundamentals of Ion-Surface Interaction, (2001/2002).
22. M. Born, Z. Phys., 38, 803 (1926).
23. E. Rutherford, E. Phil. Mag. 21, 669, (1911).
24. S.P. Ahlen, Rev Mod Phys 52, 121–173(1980).
25. F. Bloch, Z. Phys. 81 363 (1933).
26. M.C. Walske, Phys. Rev. 88, 1283 (1952).
27. M.C. Walske, Phys. Rev. 101, 940 (1956).
28. G.S. Khandelwal, Nucl. Phys.A 116, 97 (1968).
29. G.S. Khandelwal, E. Merzbacher. Phys. Rev.144, (1966).
30. H. Bichsel, University of California Report No. USC-136-120 (1967).

31. E. Bonderup, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 35, No. 17 (1967).
32. C.C. Rousseau, W.K. Chu, and D. Powers, Phys. Rev. A 4, 1066 (1970).
33. J.F. Ziegler, Appl. Phys. Lett, 31, 544 (1977).
34. ICRU report 37, Stopping Powers and Ranges for Electrons and Positrons, International Commission on Radiation Units and Measurements, (1984).
35. R.M. Sternheimer, S.M. Seltzer and M.J. Berger, Phys. Rev. B26, 6067 (1982).
36. W.H. Barkas, W. Birnbaum and F. M. Smith, Phys. Rev. 101, 778 (1956).
37. H. Bichsel, Phys. Rev. A 41 N° 7, 3642 (1990).
38. W. H. Bragg. and R. Kleeman, Philos. Mag. 10, 318 (1905).
39. H.H. Andersen, J.F. Ziegler, "Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements". in: The Stopping and Ranges of Ions in Matter, edited by J.F. Ziegler, Pergamon press, New York, vol. 3, (1977).
40. W. Brandt and M. Kitagawa, Phys. Rev, B 25, 5631 (1982).
41. J.F. Ziegler, J.P. Biersack and U. Littmark, The Stopping and Range of Ions in Solids, vol. 1 Pergamon Press. New York. (1984).
42. E. Clementi, D.L. Raimondi, J.Chem.Phys.38, 2686 (1963).
43. E. Clementi, D.L. Raimondi, W.P. Reinhardt, J.Chem.Phys.47, 1300 (1967).
44. ICRU Report No. 49, Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles. International Commission on Radiation Units and Measurements, (1993).
45. J.F. Janni, At. Data Nucl. Data Tables 27, 147 (1982).
46. S. Foul, M. Chekirine, R. Khelifi, Radiation Physics and Chemistry 230, 112592 (2025).
47. N. Bohr, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk **24**, No. 19 (1948).
48. L.C. Northcliffe, Ann. Rev. Nucl. Sci. 13, 67 (1963).

49. W. Booth and I.S. Grant. Nucl. Phys, 63, 481 (1965).
50. Barkas. Walter.H: Nuclear Research Emulsions-I. Techniques and Theory. Academic Press. Inc. (1963).
51. Antony, J.M., Lanford, W.A., 1982. Phys. Rev. A25, (1868).
52. Schwietz, G., Grande, P.L, Nucl.Instr and Methds. B 175-177, 125-131 (2001).
53. M. Chekirine, Thèse de doctorat, Université Batna1-Batna (2017).
54. R.C. Fadanelli et al Eur. Phys, J.D 70, 178 (2016).
55. S. Ourabah, M. Chekirine, R. Khelifi, B. Bouzid, Radiation Physics and Chemistry 182, 109352 (2021).
56. S. Ourabah, Thèse de doctorat, USTHB-Alger (2022).
57. M.D. Brown et C.D. Moak, Phys. Rev. B6, 90 (1972).
58. H.D. Betz, Rev. Mod. Phys. 44, 465 (1972).
59. J.S. Forster, D. Ward. H.R. Andrews. G.C, Ball, GJ. Costa, W.G. Davies et I.V. Mitchel, Nucl. Inst. Meth, 136, 349 (1976).
60. J.F. Ziegler, Appl. Phys. Lett, 31, 544 (1977).
61. Barkas. Walter. H: Nuclear Research Emulsions-I. Techniques and Theory. Academic Press. Inc (1963).
62. T. E. Pierce and Marshall Blann Phys. Rev, 173, 390 (1970).
63. F. Hubert, R. Bimbot, H. Gauvin, Nucl. Inst and meth in Physics Research B 36 (1989).
64. H.H. Andersen, J.F. Bak, H. Knudsen and B.R. Nielsen, Phys. Rev. A16, 1929 (1977).
65. M. Luomajaravi, Radiat. Eff. 40, 173 (1979).
66. H. Sorensen and H.H. Andersen, Phys. Rev. B8, 1854 (1973).

67. H.H. Andersen, C.C. Hanke, H. Sorensen and P. Vajda, Phys. Rev. 153,338 (1967).
68. H.H. Andersen and B.R. Nielsen Nucl.Instr and Methds Phys. Res. 191,475 (1981).
69. T. Takahashi, Y. Awaya, T. Tonuma, H. Kumagai, K. Izumo, M. Nishida, A. Hitachi, A. Hashizume, S. Uchiyama and T. Doke Phys.Rev. A27, 1360 (1983).
70. R. Ishiware, N. Shiomi, T. Ghata and Y. Uemura, Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ.49, 403 (1971).
71. N. Sakamoto, H. Ogawa, M. Mannami, K. Kimura, Y. Susuki, M. Hasegawa, I. Hatayama, T. Noro, and H. Ilkegami, Rad. Effects Defects in Solids 117 193 (and pers. Comm. From N. Sakamoto, 2003) (1991).

Articles publiés et communications présentées:

S. Foul, M. Chekirine, R. Khelifi, Radiation Physics and Chemistry 230, 112592 (2025).

15th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART'15), September 8th to 12th, 2025, in Zurich, Switzerland.

04th International Conference on Radiations And Applications (ICRAA'4), April 13th to 15th, 2025, in Algiers, Algeria.

1st International Conference on Physico-chemistry, Materials Sciences and Applied Mathematics (ICPMSAM'23), November 27th to 28th, 2023, in Skikda, Algeria.

1st International Conference on Water, Energy, Environment and Materials Engineering (ICWEEME-2024), December, 10th to 11th 2024, in Ouargla. Algeria.

3rd International Conference on Materials, Energy and Environment (MEE'2025), April 21st to 22nd, 2025, in El Oued, Algeria.

2^{ème} Séminaire National Sur Les Sciences Exactes Mathématiques Et Informatiques, Sciences De La Matière, 03 Mai 2025. (**Webinaire Telemcen**), Algérie.

APPENDICE

APPENDICE 1

Le logiciel SRIM:

Dans ce qui suit, nous allons donner un aperçu des expressions utilisées dans le code SRIM, pour le calcul du pouvoir d'arrêt des particules chargées.

Le modèle semi-empirique ZBL, développé par Ziegler et al à travers le code TRIM pour le calcul du pouvoir d'arrêt, consiste à la compilation des données expérimentales obtenues du pouvoir d'arrêt électronique des particules chargées (protons, α) dans des cibles solides aux différents domaines d'énergies.

Voici les expressions utilisées par Ziegler pour le calcul du pouvoir d'arrêt dans le code SRIM.

- **Pouvoir d'arrêt électronique des protons:**

$$S_p = \begin{cases} a_1 \sqrt{E} & (0 \leq E \leq 10 \text{ KeV}) \\ \frac{S_L S_H}{(S_L + S_H)} & (10 \text{ KeV} \leq E \leq 999 \text{ KeV}) \\ \frac{a_6}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{a_7 \beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 - C - \frac{\delta}{2} \right] & (1000 \text{ KeV} \leq E) \end{cases}$$

Avec :

$$S_L = a_2 E^{0.45}, \quad [E] = \text{KeV}$$

$$S_H = \frac{a_3}{E} \ln \left(1 + \frac{a_4}{E} + a_5 E \right)$$

$$C = \sum_{i=1}^5 a_{7+i} [\ln(E)]^{i-1}$$

Les coefficients a_i sont ajustés expérimentalement à partir des données expérimentales récentes.

- Pouvoir d'arrêt électronique des particules α :

$$S_\alpha = \begin{cases} a_1 E^{a_2} & (E \leq 1 \text{ KeV}) \\ \frac{S_L S_H}{(S_L + S_H)} & (1 \text{ KeV} \leq E \leq 10^4 \text{ KeV}) \\ 4S_p & (4 \times 10^4 \text{ KeV} \leq E) \end{cases}$$

$$S_L = a_1 E^{a_2}$$

$$S_H = \frac{10^3 a_3}{E} \ln \left(1 + \frac{10^3 a_4}{E} + a_5 \frac{E}{10^3} \right)$$

Le programme TRIM, dans sa version SRIM-2013, intègre la totalité des pouvoirs d'arrêt mesurés des particules chargées dans les matériaux pour la gamme d'énergie de 10 eV à 10 GeV/u, jusqu'à 2013.

Les coefficients a_i sont donnés dans ICRU Report 49.

APPENDICE 2

Le logiciel MSTAR:

MSTAR est basé sur le rapport du pouvoir d'arrêt normalisé :

$$S_{\text{rel}} = \frac{S_{\text{Proj}}^{\text{ex}}/Z_1^2}{S_{\text{He}}/2^2} \quad (1)$$

Le code décrit ci-dessous a été écrit sous la forme d'un paquet de sous-programmes FORTRAN 77 qui peut être inclus dans tout autre programme nécessitant des pouvoirs d'arrêt ; un exemple de programme principal est également fourni.

Pour les composés et les mélanges, MSTAR calcule le pouvoir d'arrêt de 26 cibles élémentaires. Ces dernières sont celles qui ont été le plus fréquemment mesurées expérimentalement; l'ajout de cibles supplémentaires est dangereux s'il n'y a pas suffisamment de données disponibles pour la comparaison.

Matériaux condensés (solides) : modes c et d

Pour les cibles condensées, il est constaté empiriquement que :

$$y_{\text{CW}}^{\text{s}}[a,b,c] = \{a + (1.01-a) \times \{1 - \exp[-(\frac{x+c(\ln 2)^{\frac{1}{d}}-b}{c})^d]\}\} \times (0.9959 - 0.00101e^{-x}) \quad (2)$$

Fournit un bon ajustement à S_{rel} pour les ions ($3 \leq Z_1 \leq 18$).

Avec: $d = 17.19 - 0.657Z_1$, $x = \log_{10}(E_1/A_1)$ quand $[E_1] = \text{MeV}$.

Les coefficients a, b et c sont déterminés par l'ajustement des moindres carrés pour chaque ion séparément. La fonction (2) à la limite d'énergie élevée correcte légèrement au-dessus de l'unité.

a: C'est (approximativement) la limite d'énergie basse. La transition de la région de haute énergie à la région de basse énergie a une largeur proportionnelle à c et est centrée en b; le coefficient contrôle l'écart par rapport à l'antisymétrie. Nous constatons que les coefficients a, b et c présentent une dépendance de Z_1 et peuvent donc être ajustés par les fonctions appropriées a_f , b_f et c_f de Z_1 . Les oscillations Z_1 qui produisent un minimum de pouvoir d'arrêt à environ $Z_1 = 12$, apparaissent en coefficient $a_f(Z_1)$ mais pour obtenir un ajustement APPENDICE

raisonnable, nous devons omettre les données pour les ions Mg mesurées par la méthode d'atténuation par décalage Doppler inversé (IDSA).

$$S_{Proj}^{calc}(Z_1, Z_2 (\text{cond.})) = Z_1^2 \times y_{CW}^s [a_f(Z_1), b_f(Z_1), c_f(Z_1)] \times \frac{S_{He}(Z_2)}{Z^2} \quad (3)$$

Pour le pouvoir d'arrêt d'une cible condensée particulière (Z_2) pour le projectile (Z_1). Cette valeur empirique peut être calculée par le programme MSTAR, mode c, il est basé sur toutes les données de leurs fichiers. En passant d'une énergie élevée à une énergie faible, les fluctuations de S_{rel} augmentent. Cela a au moins deux raisons : la diminution nécessaire de la précision des mesures, mais aussi une possible dépendance résiduelle de S_{rel} vis-à-vis de Z_2 . Comme cette dépendance est bien cachée dans la dispersion statistique des données, elle n'est pas facile à être déterminée empiriquement. Dans les versions 1 et 2 de MSTAR, ils ont également ajusté S_{rel} pour un seul ion et pour diverses cibles séparément, obtenant ainsi une certaine dépendance Z_2 ; le S_{Proj} résultant a pu être calculé à l'aide de MSTAR, mode d. Mais en raison du manque de données, cela n'a pas été possible pour tous les ions. Maintenant, dans la version 3 de MSTAR, le mode d est calculé à l'aide d'un facteur de correction du mode c, déterminé par ajustement $S_{Proj}^{ex}/S_{Proj}^{calc}$ dans certaines régions de Z_2 par une fonction commode de x . Enfin, le mode d, basé principalement sur les données d'un projectile particulier, est défini pour tous les ions et cibles, et il est constaté qu'il s'adapte mieux aux données que le mode c dans presque tous les cas.

APPENDICE 3

Tableau 3.1 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible de $^{27}_{13}Al$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	699,41	698,33	688,63	699,1	675,90
1,5	539,11	538,16	539,27	536,1	528,67
2	443,67	443,36	448,69	440,1	444,80
2,6	368,87	369,42	372,33	365,76	368,28
3	333,00	333,74	335,60	331,56	332,37
3,4	304,15	305,03	306,78	302,47	303,37
4	270,16	271,01	272,16	268,26	269,24
4,4	251,97	252,68	253,74	249,39	251,17
5	229,33	229,85	230,63	227,2	228,42
5,4	216,61	217,02	218,12	216,96	215,66
5,6	210,81	211,19	211,91	210,38	209,70
7,5	168,08	169,34	169,69	167,45	--
10	135,69	135,79	135,97	134,22	--
12	117,82	117,84	118,26	117,14	--
14	104,47	104,46	104,65	103,77	--

Tableau 3.2 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion 7Li calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de $^{27}_{13}Al$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,4	1273,26	1274,98	1268,90	1253,21	1280
2	1004,68	1003,97	1016,66	991,84	1030
2,6	835,33	836,58	843,42	826,34	831,52
3	754,09	755,75	762,26	746,17	750,52
3,4	688,70	690,69	696,01	681,76	685,24
4	611,68	613,59	617,36	605,60	--
4,6	552,14	553,53	556,41	546,45	--
5	519,11	520,27	522,69	513,70	--
5,6	477,11	477,98	480,26	472,11	--
7,5	380,26	383,10	385,00	378,85	--
10	306,84	307,05	307,85	304,03	--
12	266,34	266,39	267,73	264,08	--
14	236,10	236,07	237,01	234,26	--

Tableau 3.3 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de $^{27}_{13}Al$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	4321,79	4315,12	4330,61	4454,77	--
1,4	3846,13	3851,36	3987,45	3968,93	--
1,6	3693,44	3654,57	3830,08	3764,21	3720
2	3319,79	3317,43	3542,53	3412,25	3410
2,3	3132,46	3104,26	3328,24	3188,66	3130
2,4	3036,60	3039,44	3255,16	3120,41	3000
2,6	2913,62	2917,99	3121,02	2992,13	2968
3	2697,36	2703,30	2892,78	2764,96	--
3,4	2512,21	2519,43	2693,59	2570,15	--
4	2281,14	2288,23	2436,38	2325,1	--
4,6	2092,59	2097,83	2219,22	2123,73	--
5	1984,06	1988,49	2094,13	2008,22	--
5,6	1842,09	1845,43	1932,02	1857,67	--
7,5	1497,39	1508,47	1545,79	1506,24	--
10	1222,74	1223,60	1227,61	1213,92	--
12	1066,36	1066,57	1059,52	1055,57	--
14	947,83	947,74	934,55	936,76	--

Tableau 3.4 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de $^{27}_{13}Al$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	6714,41	6704,04	6412,05	6706,71	6600
1,2	6548,94	6362,27	6224,89	6385,38	6320
1,5	5936,30	5925,83	5952,68	5959,20	6050
1,6	5857,39	5795,36	5863,38	5829,78	6040
1,9	5504,47	5439,46	5604,63	5474,49	5740
2	5334,95	5331,14	5522,43	5365,98	5330
2,2	5126,27	5127,78	5351,08	5162,01	5380
2,8	4597,55	4606,00	4818,31	4635,24	4740
3	4446,35	4456,17	4670,11	4483,90	4390
3,4	4173,45	4185,49	4391,79	4209,75	--
3,8	3934,10	3947,47	4141,53	3968,20	--
4	3826,95	3838,88	4025,42	3857,92	--
4,4	3629,52	3639,63	3809,22	3655,53	3810
4,6	3539,09	3547,98	3714,14	3562,19	--
4,8	3452,70	3461,10	3618,06	3473,60	--
5	3371,07	3378,61	3521,99	3389,48	--
5,4	3219,39	3225,53	3356,86	3233,33	--
5,6	3148,67	3154,37	3274,80	3160,75	--
7,5	2594,73	2613,92	2674,39	2609,06	--
10	2141,51	2143,01	2164,07	2129,32	--
12	1877,46	1877,83	1891,91	1861,46	--
14	1674,73	1674,58	1683,79	1657,10	--

Tableau 3.5 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible de $^{63}_{29}\text{Cu}$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	484,37	464,19	476,22	483,8	467,21
1,5	386,32	375,81	383,60	388,01	378,02
2	321,56	319,10	323,63	326	322,57
2,4	287,21	285,79	289,10	289,78	287,73
2,8	260,33	259,65	261,47	263,82	260,44
3	252,75	248,51	249,96	252,12	249,22
3,6	220,95	220,92	222,04	222,73	220,86
4	208,80	206,20	206,82	206,28	205,77
4,4	193,14	193,57	194,01	193,70	193,04
4,6	187,45	187,95	188,31	188,45	187,20
4,8	182,20	182,69	183,01	182,80	181,99
5	179,40	177,77	177,70	177,4	177,07
5,5	167,89	166,47	166,49	166,55	--
6	157,99	156,70	156,79	157,21	--
6,5	149,30	148,09	148,08	147,58	--
7	141,64	140,56	140,47	139,72	--
7,2	137,64	137,79	137,67	137,33	141,39
7,5	134,82	133,87	133,57	133,2	--
8	128,70	127,86	127,67	126,99	--
8,5	123,19	122,43	122,16	122,05	--
9	118,17	117,55	117,26	117,48	--
9,5	113,64	113,03	112,66	112,56	--
10	109,43	108,94	108,45	108,2	--
10,5	105,58	105,08	104,85	104,86	--
11	102,06	101,54	101,25	100,65	--
11,5	98,78	98,27	97,99	97,72	--
12	95,71	95,21	95,00	95,41	--

Tableau 3.6 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion 7Li calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de $^{63}_{29}\text{Cu}$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,2	972,34	951,30	956,63	976,29	946,81
2	726,89	721,35	727,83	734,49	725,21
2,6	617,88	615,70	621,02	622,21	614,41
3	572,29	562,74	567,57	566,63	--
3,5	516,99	509,69	513,03	511,38	--
4	472,95	467,09	469,29	467,44	--
4,5	436,73	432,01	433,46	431,27	--
5	406,32	402,67	402,94	401,00	--
5,5	380,25	377,05	377,32	375,24	--
6	357,78	354,88	355,50	353,00	--
6,5	338,07	335,36	335,59	333,59	--
7	320,69	318,27	318,48	316,46	--

7,5	305,23	303,08	303,26	301,22	--
8	291,34	289,45	289,26	287,56	--
9	267,44	266,04	265,64	264,08	--
10	247,61	246,52	245,73	244,57	--
10,5	238,89	237,77	237,72	235,99	--
11	230,90	229,74	229,62	228,06	--
11,5	223,48	222,31	221,81	220,72	--
12	216,50	215,37	215,21	213,89	--

Tableau 3.7 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de $^{63}_{29}Cu$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,5	2639,24	2566,23	2810,63	2798,32	--
2,5	2216,84	2169,81	2295,70	2294,06	2343,4
3	2038,69	2004,61	2098,45	2099,67	2146,4
3,4	1890,22	1888,96	1962,30	1965,49	1949,2
4	1760,61	1738,85	1786,13	1794,64	--
4,75	1598,79	1583,64	1603,97	1618,63	1620
5	1552,05	1538,16	1549,93	1567,66	--
5,5	1465,56	1453,31	1454,86	1475,15	--
6	1388,96	1377,79	1371,79	1393,46	--
6,5	1320,21	1309,69	1297,74	1320,89	--
7	1258,40	1249,01	1230,69	1255,99	--
8	1151,71	1144,33	1117,61	1144,81	--
8,5	1105,40	1098,69	1068,58	1096,92	--
9	1062,77	1057,26	1024,55	1053,27	--
10	987,68	983,36	947,20	976,54	--
10,5	954,29	949,87	914,68	942,62	--
11	923,57	918,96	883,46	911,21	--
12	867,77	863,25	828,83	854,94	--

Tableau 3.8 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), obtenues par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et générées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible de $^{63}_{29}Cu$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)
1	4401,45	4207,64	4586,52	4640,99
1,5	4124,50	4008,43	4281,63	4315,83
2	3793,62	3763,98	3960,62	3973,70
2,5	3593,77	3516,74	3648,99	3667,67
3	3347,53	3291,11	3388,56	3405,01
3,5	3133,70	3089,22	3156,24	3176,39
4	2946,78	2910,19	2949,99	2977,76
4,5	2781,01	2750,97	2769,80	2801,82
5	2633,15	2609,51	2606,64	2645,91
5,4	2498,75	2503,65	2493,53	2533,39
6	2380,12	2360,96	2337,40	2381,94
6,6	2232,76	2233,92	2200,29	2248,17
7	2172,81	2156,59	2118,22	2167,36
7,5	2082,87	2068,33	2023,15	2074,46
8	2000,31	1987,49	1940,09	1989,52

8,5	1924,58	1912,91	1864,03	1911,72
9	1854,41	1844,80	1793,98	1840,16
9,5	1790,21	1780,86	1728,93	1774,09
10	1729,77	1722,22	1669,89	1712,94
10,5	1673,92	1666,18	1616,85	1656,11
11	1622,32	1614,25	1566,82	1603,19
12	1528,03	1520,09	1479,76	1507,65

Tableau 3.9 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible d' $^{107}_{47}Ag$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	377,63	363,58	386,45	376,3	377,42
1,2	344,06	333,56	350,30	341,76	346,85
1,4	318,54	308,94	320,56	313,56	317,58
1,6	297,72	288,36	296,24	291,54	296,42
2	256,98	255,81	258,19	256,38	261,12
2,2	243,51	242,65	245,08	242,68	246,26
2,4	231,50	231,04	232,67	230,44	234,16
2,6	220,83	220,70	221,55	220,57	223,24
2,8	211,27	211,42	211,84	211,59	213,67
3	202,60	203,03	203,14	202,52	203,65
3,2	194,83	195,40	195,33	194,39	196,73
3,4	189,29	188,42	188,22	187,95	189,47
3,6	182,78	182,01	181,72	181,12	182,99
3,8	176,77	176,10	175,61	174,85	176,86
4	172,62	170,63	170,01	169,57	171,29
4,2	166,14	165,54	164,90	164,29	165,99
4,4	161,17	160,79	160,10	159,55	161,21
4,6	156,64	156,36	155,69	155,26	156,54
4,8	152,40	152,20	151,49	151,00	152,37
5	149,70	148,29	147,39	146,71	148,38

Tableau 3.10 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion 7Li calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible d' $^{107}_{47}Ag$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,2	770,18	746,56	771,60	755,83	765
1,4	715,75	694,14	710,91	700,73	706,4
1,6	670,64	649,59	660,65	653,83	657
1,8	615,40	611,29	618,39	613,35	617
2	580,64	578,01	581,85	578,42	582,7
2,2	550,70	548,77	553,72	547,85	552,9
2,4	523,89	522,85	525,89	520,95	526,3
2,6	500,00	499,70	501,76	497,03	502,2
2,8	478,52	478,86	480,34	475,61	480,2
3	459,02	459,98	461,22	456,33	460,1
3,2	441,51	442,78	443,00	438,84	--

3,4	429,00	427,04	427,28	422,87	--
3,6	414,29	412,56	412,07	408,23	--
3,8	400,68	399,19	398,76	394,77	--
4	391,28	386,79	385,95	382,33	--
4,4	365,35	364,52	363,33	360,08	--
4,6	355,09	354,46	353,02	350,04	--
4,8	345,48	345,03	343,61	340,64	--
5	339,34	336,16	334,40	331,82	--

Tableau 3.11 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible d' $^{107}_{47}Ag$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
2	1888,86	1880,14	2056,75	1989,95	2077
2,2	1834,12	1827,60	1978,61	1922,5	1988
2,4	1780,10	1776,54	1902,50	1859,24	--
2,6	1728,40	1727,34	1832,40	1799,74	--
2,8	1678,97	1680,17	1769,31	1743,67	1831
3	1631,64	1635,06	1709,24	1690,97	1761
3,2	1587,45	1592,02	1654,17	1641,24	1697
3,4	1558,12	1550,99	1602,11	1594,17	--
3,6	1518,21	1511,88	1554,06	1549,71	--
3,8	1480,13	1474,60	1507,01	1507,68	1581
4	1455,73	1439,08	1463,96	1467,90	1529
4,2	1410,26	1405,19	1422,93	1430,22	1480
4,4	1376,00	1372,86	1384,89	1394,46	--
4,6	1344,37	1341,99	1347,85	1360,42	--
4,8	1314,22	1312,50	1313,82	1328,03	1392
5	1296,39	1284,30	1279,80	1297,19	1351

Tableau 3.12 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, MSTAR dans la cible d' $^{107}_{47}Ag$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
2	2997,37	2983,28	3203,08	3129,32	3345
2,2	2932,78	2922,17	3111,84	3044,22	3209
2,4	2865,95	2860,13	3012,64	2963,27	--
2,6	2799,98	2798,25	2922,47	2886,05	--
2,8	2735,26	2737,23	2838,31	2812,34	2966
3	2671,86	2677,53	2760,18	2742,21	2859
3,2	2611,80	2619,41	2685,07	2675,27	2758
3,4	2574,91	2563,03	2612,96	2611,16	--
3,6	2519,07	2508,47	2545,87	2549,95	--
3,8	2465,05	2455,77	2480,78	2491,50	2577
4	2432,93	2404,93	2418,71	2435,62	2496
4,2	2364,44	2355,89	2360,63	2382,20	2419
4,4	2313,94	2308,63	2304,57	2331,02	--
4,8	2222,14	2219,21	2203,46	2234,69	2279

5	2197,48	2176,92	2153,41	2189,40	2214
---	---------	---------	---------	---------	------

Tableau 3.13 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013, ASTAR dans la cible d' $^{197}_{79}Au$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	254,15	240,47	261,47	258,7	259,20
1,2	236,67	225,58	240,53	238,09	234,96
1,3	225,38	218,74	231,51	229,32	224,13
1,4	221,85	212,33	223,30	221,40	218,97
1,5	212,19	206,32	215,69	214,2	212,24
1,6	208,97	200,68	208,98	207,50	204,97
1,8	197,56	190,44	197,06	195,75	192,97
2	187,76	181,36	186,45	185,6	--
2,2	178,68	173,27	178,34	176,33	--
2,4	170,69	166,00	170,43	168,73	--
2,6	163,47	159,44	163,22	162,47	--
3	151,06	148,01	150,80	149,95	--
3,6	136,55	134,10	136,09	135,44	--
4	128,71	126,41	127,98	127,20	--
4,2	125,22	122,94	124,38	123,56	--
4,4	121,97	119,69	121,07	120,27	--
5,2	110,65	108,48	109,66	109,06	--
5,8	103,57	101,54	102,56	102,44	--
6	101,44	99,45	100,46	100,14	--

Tableau 3.14 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion 7Li calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013 et MSTAR dans la cible d' $^{197}_{79}Au$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	560,74	529,94	579,12	564,83	--
1,3	503,66	488,71	521,70	510,01	--
1,4	497,11	475,68	504,87	494,14	493
1,8	445,52	429,49	447,38	440,37	457
2	424,20	409,79	423,45	418,19	--
2,2	404,21	392,03	404,62	398,50	406,71
2,4	386,49	375,95	386,00	380,92	388,24
2,6	370,40	361,33	369,98	365,12	371,18
3	342,61	335,74	342,65	337,86	346,39
4	292,14	286,97	290,89	287,18	--
4,2	284,22	279,11	282,78	279,16	--
4,4	276,86	271,73	275,08	271,66	--
5,2	251,15	246,25	248,85	245,96	--
5,8	235,04	230,46	232,84	230,20	--
6	230,20	225,71	228,23	225,46	--

Tableau 3.15 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013 et MSTAR dans la cible d' $^{197}_{79}Au$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
2	1369,98	1322,30	1431,35	1438,73	1388,7
2,2	1338,41	1297,28	1389,25	1398,41	--
2,4	1307,13	1270,92	1346,16	1359,50	1312,7
2,6	1275,61	1244,01	1304,09	1322,09	--
3	1214,99	1190,46	1226,96	1251,95	1210
3,6	1134,55	1114,28	1127,82	1158,13	1130
4	1086,49	1067,30	1070,75	1102,58	--
4,2	1064,12	1045,03	1044,72	1076,72	--
4,4	1042,80	1023,55	1019,69	1052,06	--
5,2	963,93	945,26	933,40	963,91	--
5,8	911,36	893,76	878,75	907,32	--
6	895,14	877,82	863,13	890,01	--

Tableau 3.16 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et compilées à travers les codes de calculs SRIM-2013 et MSTAR dans la cible d' $^{197}_{79}Au$.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
2	2159,62	2082,55	2230,39	2262,49	2129
2,2	2128,01	2061,15	2185,21	2214,35	--
2,4	2094,16	2035,00	2131,05	2166,78	--
2,6	2057,65	2005,77	2078,92	2120,10	2057
3	1983,00	1942,39	1980,70	2030,27	1969
3,6	1878,00	1844,08	1848,46	1905,52	1829
4	1812,29	1780,00	1769,33	1829,46	--
4,2	1781,07	1748,87	1733,28	1793,41	1780
4,4	1750,96	1718,42	1698,23	1758,66	1770
5,2	1636,11	1604,28	1575,07	1631,54	--
5,8	1556,96	1526,80	1494,97	1547,47	1560
6	1532,19	1502,47	1470,94	1521,36	1480

Tableau 3.17 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	1210,03	1320,78	1193,93	1151	1271,99
1,2	1051,65	1141,23	1049,79	1016,34	1039,99
1,5	899,43	951,40	888,95	864,05	--
1,6	845,93	902,36	847,11	823,86	885,56
1,7	807,81	858,54	808,88	789,64	837,26
1,8	771,92	819,16	774,85	753,82	--

1,9	741,37	783,56	743,63	725,95	--
2	716,59	751,22	712,50	695,7	--
2,1	696,05	721,70	692,68	670,76	--
2,2	668,21	694,64	672,96	646,80	--
2,3	643,20	669,74	653,14	626,49	--
2,4	619,55	646,74	633,23	607,08	--
2,5	601,17	625,43	613,31	587,9	--
2,6	582,37	605,62	595,30	572,92	--
2,7	569,83	587,15	577,28	557,27	--
2,8	549,12	569,90	560,67	543,40	--
2,9	533,62	553,73	545,36	528,65	--
3	522,29	538,54	530,05	513,79	--

Tableau 3.18 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion 7Li dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, MSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,6	1947,71	2074,67	1901,36	1840,99	--
1,8	1772,64	1878,94	1751,22	1692,65	--
1,9	1700,53	1795,45	1685,17	1627,54	--
2	1641,85	1719,76	1624,12	1567,55	1610
2,2	1528,22	1587,70	1536,02	1460,88	1511,5
2,3	1470,00	1529,72	1491,98	1413,20	1464
2,4	1415,09	1476,26	1446,95	1368,84	1416
2,5	1372,21	1426,79	1401,91	1327,42	1370
2,6	1328,56	1380,87	1357,88	1288,59	1335,8
2,7	1299,14	1338,12	1318,85	1252,15	1301
2,8	1251,46	1298,21	1279,83	1217,91	1268
2,9	1215,62	1260,87	1242,80	1185,70	1233
3	1189,26	1225,83	1210,78	1155,34	1200

Tableau 3.19 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, MSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
2,2	5635,73	5507,51	5694,84	5126,42	5552
2,3	5463,43	5347,03	5561,69	5002,85	5403
2,4	5297,55	5196,78	5416,56	4885,29	5258
2,5	5171,11	5055,78	5270,43	4773,19	5110
2,6	5037,82	4923,15	5130,31	4665,90	4988
2,7	4954,15	4798,12	4991,20	4563,23	4871
2,8	4799,00	4680,03	4866,10	4465,05	4762
2,9	4685,38	4568,27	4743,01	4371,12	4644
3	4605,31	4462,32	4629,92	4281,16	4530

Tableau 3.20 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la cible de polypropylène, calculées par l'expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée et générées à travers les codes SRIM-2013, MSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,8	9699,99	10251,96	9845,91	8881,29	9718
1,9	9420,95	9921,63	9560,54	8676,01	9487
2	9198,58	9615,46	9312,21	8480,64	9240
2,1	9017,88	9330,88	9121,91	8294,91	9040
2,2	8739,07	9065,60	8956,64	8117,56	8854
2,3	8485,99	8817,64	8775,38	7948,07	8652
2,4	8241,89	8585,27	8581,15	7786,20	8465
2,5	8057,50	8366,96	8374,93	7631,21	8270
2,6	7861,97	8161,38	8184,73	7482,23	8103
2,7	7742,30	7967,37	7994,54	7339,05	7946
3	7228,91	7445,01	7478,05	6942,69	7490

Tableau 3.21 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des particules α dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, ASTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) ASTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,2	895,47	973,40	904,43	865,64	893,23
1,6	742,45	775,96	734,19	709,73	743,17
1,7	706,30	739,55	701,96	677,07	713,08
2	623,86	649,94	620,40	601,9	619,84
2,2	575,19	602,43	584,07	561,46	571,93
2,3	554,49	581,45	566,15	542,95	551,07
2,4	550,41	562,04	548,44	526,08	528,40
2,5	535,70	544,02	530,83	510,5	--
2,6	513,08	527,23	515,72	498,64	489,32
2,7	491,06	511,57	500,61	485,39	471,04
2,8	480,64	496,90	486,60	472,92	--
2,9	471,20	483,14	473,69	459,86	--

Tableau 3.22 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion 7Li dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, MSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,2	2058,77	2234,10	1987,41	1919,57	1940
1,5	1787,98	1867,91	1716,16	1658,43	1730
1,6	1697,84	1773,26	1643,10	1586,96	1590
1,7	1613,83	1688,65	1577,04	1521,73	1533
1,9	1506,39	1543,70	1462,94	1407,03	1420
2	1422,42	1481,10	1411,90	1356,32	1360
2,3	1307,43	1323,11	1288,79	1225,53	--
2,4	1257,23	1278,43	1247,76	1187,86	--
2,5	1218,27	1236,99	1209,74	1152,65	--
2,6	1166,60	1198,44	1172,71	1119,61	--

2,7	1116,33	1162,48	1140,69	1088,57	--
2,8	1092,25	1128,84	1107,67	1059,39	--
2,9	1070,44	1097,30	1077,64	1031,91	--

Tableau 3.23 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{12}C dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, MSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,2	6168,76	6677,76	6403,30	5853,77	5980
1,5	5664,34	5911,25	5768,36	5340,92	5490
1,6	5460,30	5697,17	5585,13	5190,28	--
1,7	5261,39	5499,95	5408,91	5048,26	5280
1,9	5026,55	5148,65	5091,55	4786,93	4900
2	4797,22	4991,45	4963,39	4666,17	--
2,4	4368,20	4458,05	4508,89	4239,39	--
2,5	4279,30	4344,10	4394,79	4144,75	--
2,6	4125,51	4236,50	4290,69	4054,04	--
2,9	3851,23	3946,61	3999,44	3804,15	--

Tableau 3.24 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt de l'ion ^{16}O dans la de polycarbonate, calculées par la présente expression (2-16), déterminées par la formule de Bethe-Bloch modifiée, données expérimentalement et à travers les codes de calcul SRIM-2013, MSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) MSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,4	9393,41	9857,24	9045,02	8446,70	--
1,5	9115,23	9507,78	8792,56	8237,26	--
1,6	8808,88	9186,86	8550,14	8038,39	8502
1,7	8509,08	8891,08	8319,78	7849,92	8343
1,9	8166,78	8363,58	7902,15	7500,50	7914
2,2	7738,03	7699,39	7441,41	7034,50	7393
2,3	7417,97	7505,06	7292,20	6892,57	7277
2,4	7203,05	7322,07	7140,01	6756,75	7156
2,5	7043,21	7149,34	6983,83	6626,48	6936
2,6	6803,75	6985,96	6844,67	6501,05	6834
2,7	6564,66	6831,10	6704,52	6380,33	6730
2,8	6471,07	6684,04	6565,38	6264,24	6633
2,9	6386,56	6544,15	6441,24	6152,61	6537

Tableau 3.25 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculé par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée dans la cible de ^{27}Al par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	166,83	171,18	175,02	172	171,45
1,4	139,36	138,49	140,89	139,10	138,30
1,8	117,64	117,38	119,17	117,97	118,40
2,4	96,32	96,49	97,81	96,34	96,39
2,8	86,37	86,63	87,67	86,74	86,47
3	82,21	82,51	83,40	82,5	82,33

3,6	72,02	72,42	73,19	72,50	72,24
4	66,69	67,10	67,74	67,07	66,89
4,6	60,21	60,58	61,20	60,28	60,42
5	56,64	56,96	57,47	56,95	56,83
5,6	52,02	52,36	52,85	52,13	52,27
7	44,25	44,29	44,64	44,28	44,75
13	27,72	27,52	27,72	27,65	27,81

Tableau 3.26 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur la cible $^{63}_{29}Cu$ par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	115,11	114,36	118,99	118,4	118,17
1,4	98,29	96,11	98,36	98,46	97,66
1,6	90,85	89,29	91,07	91,19	90,43
1,8	84,71	83,60	84,98	84,93	84,39
2	79,52	78,65	79,80	80,05	79,27
2,4	70,98	70,49	71,47	71,35	70,85
2,6	67,44	67,12	67,98	67,79	67,36
3	61,54	61,36	62,01	61,99	61,49
3,4	56,71	56,65	57,23	57,17	56,69
3,8	52,68	52,72	53,18	53,21	52,69
4	50,88	50,98	51,39	51,57	50,92
4,2	49,26	49,36	49,82	49,74	49,29
4,4	47,75	47,88	48,25	48,15	47,77
4,6	46,31	46,50	46,82	46,80	46,37
4,8	45,03	45,21	45,51	45,42	45,09
5	43,82	44,00	44,19	44,18	43,87
7,2	35,06	34,16	34,33	34,300	34,12
13	22,27	22,28	22,32	22,28	22,39

Tableau 3.27 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur la cible $^{107}_{47}Ag$ par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	94,34	89,75	93,03	96,06	93,26
1,4	77,60	76,04	77,70	79,14	78,44
1,8	67,35	66,66	67,60	68,06	69,06
2	63,49	62,96	63,69	64,09	63,25
2,6	54,55	54,37	54,81	54,82	54,40
3	50,05	50,05	50,29	50,41	49,94
3,6	44,78	44,91	45,03	45,07	45,10
3,8	43,29	43,47	43,54	43,68	43,63
4	41,94	42,13	42,13	42,24	42,62
4,2	40,65	40,88	40,95	40,89	41,03
4,4	39,49	39,72	39,75	39,67	39,81
4,6	38,36	38,63	38,63	38,63	38,70
4,8	37,34	37,61	37,62	37,57	37,66
5	36,37	36,65	36,57	36,68	37,01
7	29,20	29,44	29,32	29,39	29,47

7,2	29,65	28,89	28,83	28,83	--
13	19,14	19,97	19,13	19,22	19,08

Tableau 3.28 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur la cible $^{197}_{79}\text{Au}$ par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1	63,49	59,36	62,76	62,97	62,78
1,2	58,81	55,46	58,47	58,01	58,24
1,4	54,83	52,12	54,71	54,05	54,50
1,6	51,52	49,23	51,44	50,89	51,30
1,8	48,64	46,71	48,55	47,97	48,49
2	46,19	44,49	46,07	45,62	46,09
2,2	43,98	42,52	43,95	43,49	43,87
2,4	41,99	40,75	42,00	41,49	41,92
2,6	40,24	39,15	40,24	39,78	40,16
2,8	38,62	37,70	38,66	38,31	--
3	37,17	36,38	37,18	36,94	37,14
3,2	35,85	35,16	35,92	35,74	--
3,4	34,64	34,04	34,73	34,51	--
3,6	33,54	33,00	32,61	33,48	33,61
3,8	32,53	32,03	32,61	32,45	--
4	31,55	31,13	31,64	31,48	--
6,9	22,94	22,53	22,83	22,75	--
7	22,27	22,32	22,60	22,56	22,66
13	15,04	15,14	15,15	15,18	15,17

Tableau 3.29 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur le mylar par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,1	212,98	234,48	220,55	227,63	203,46
1,2	201,88	219,99	210,64	211,65	196,05
1,3	192,13	207,39	200,43	200,31	184,44
1,4	179,75	196,33	191,32	189,68	171,71
1,8	149,68	162,81	161,90	158,80	144,03
7,1	57,15	56,35	56,83	55,80	--

Tableau 3.30 : Les valeurs du pouvoir d'arrêt des protons calculées par la présente expression (2-19), et la formule de Bethe-Bloch modifiée sur le polycarbonate par rapport aux valeurs expérimentales et aux codes de calculs SRIM-2013 et PSTAR.

E (MeV/n)	S(E) Présent travail (MeV.cm ² /g)	S(E) Bethe (MeV.cm ² /g)	S(E) SRIM-2013 (MeV.cm ² /g)	S(E) PSTAR (MeV.cm ² /g)	S(E) EXP (MeV.cm ² /g)
1,1	226,14	242,30	232,06	232,89	--
1,3	207,46	214,12	209,44	206,16	214,80
1,5	188,97	192,43	190,12	186,5	190,49
1,7	174,39	175,17	174,31	170,46	172,69
1,9	158,03	161,08	161,20	157,44	161,89

2,1	145,54	149,31	149,89	145,85	156,77
2,3	135,43	139,33	139,98	136,39	141,29
2,5	124,74	130,74	131,28	128,4	131,90
2,7	115,97	123,26	123,97	121,29	120,98
3	110,00	113,67	114,36	112	--
3,8	87,73	94,66	95,32	93,72	--
6	65,73	66,07	66,55	65,52	--