

DONALD A. PEYROT

**FLUORESCENCE INDUITE PAR
RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en physique
pour l'obtention du grade de philosophiæ doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE, DE GÉNIE PHYSIQUE ET D'OPTIQUE
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2006

© Donald A. Peyrot, 2006

Résumé

Les processus de radioluminescence, phénomène aussi appelé scintillation, sont plutôt bien décrits théoriquement, que ce soit pour les matériaux organiques que pour les matériaux inorganiques. Cependant, le cas des structures non-cristallines dopées d'ions de lanthanides présente des particularités surprenantes. On présente l'étude des spectres d'émission par radioluminescence qui montrent des raies spectrales dues à une propagation d'exciton, ce qui devrait correspondre à des structures cristallines.

Après avoir exposé les différentes théories liées à l'excitation des matériaux et à leur production de lumière, l'hypothèse d'un procédé de fluorescence induite par radioluminescence est proposée comme une excitation optique des ions trivalents de lanthanides par la radioluminescence émise par le matériau irradié.

Différents calculs et simulations numériques ont permis de prédire le comportement des matériaux soumis à des particules ionisantes, telles que des γ ou des ions accélérés. Plusieurs matériaux, comme l'ED2 dopé de néodyme (NdIV:ED2) ou le verre poreux dopé d'erbium (ErIV:VP), sont aussi étudiés expérimentalement. Un échantillon de titane saphir (Ti:Sa) a été utilisé comme référence en raison de sa structure cristalline.

L'étude expérimentale de ces matériaux exposés à des ions de H_2^+ , de $^4He^{++}$ et de $^{12}C^{++}$ permet d'observer la fluorescence induite par radioluminescence, ainsi que d'évaluer son intensité relative par rapport aux faisceaux incidents. Une étude de temps de vie de certaines des transitions atomiques concernées, ainsi que de leur dépendance à l'intensité de l'exposition permet d'envisager quelques applications, que ce soit pour des détecteurs à particules ionisantes émettant dans l'infrarouge, ou que ce soit pour de l'excitation ionisante pour le pompage laser.

Abstract

Two processes explain radioluminescence of organic and inorganic materials. Exposition of organic materials to ionising particles leads to the excitation of the molecules of the matrix. The relaxation leads to photon emission. In the case of the inorganic materials a self-trapped exciton (STE) propagates in the crystal until it reaches and excites an impurity; the relaxation of this impurity may be radiative.

We observed that lanthanides (ErIV or NdIV) doped materials (porous or ED2 glasses) show some characteristic emission rays. The spectra are quite similar to the expected ones for inorganic materials, although these materials are organic. We developed a model describing how the radioluminescence of the organic materials excites the lanthanide ions, and then the observed radioluminescence emission spectra can be explained by the Judd-Ofelt theory.

Several materials have been studied: erbium doped porous glass (ErIV:PG), neodymium doped ED2 glass (NdIV:ED2), and also a sample of titan sapphire (Ti:Sa) as a comparison sample for inorganic materials. These samples have been exposed to H_2^+ , $^4He^{++}$, $^{12}C^{++}$ ions accelerated up to 4.1MeV with a Van de Graaff accelerator.

The emission spectra have been measured and a study of the luminescence lifetime of the material has been made. Luminescence lifetime of the characteristic rays is dependent of the radiation dose. These observations allow us to conclude that the lanthanide ions are well excited by the standard radioluminescence of the undoped material. Also, studies have been made as a function of the deposited energy to investigate the potential applications.

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>II</i>
<i>Abstract</i>	<i>III</i>
<i>Table des matières</i>	<i>IV</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>VIII</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>IX</i>
<i>Remerciements</i>	<i>XV</i>
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
Le concept	1
Synopsis	4
Références	5
<i>Chapitre 1 : Les interactions des particules ionisantes avec la matière</i>	<i>7</i>
1.1. Les particules lourdes chargées	7
1.1.1. Le calcul de Bohr – cas classique	8
1.1.2. La formule de Bethe-Bloch	10
1.1.3. Approfondissement de l'équation de Bethe-Bloch	13
1.2. Les électrons et les positrons	17
1.2.1. Pertes par collision	17
1.2.2. <i>Bremsstrahlung</i>	18
1.3. L'interaction des photons	22
1.3.1. L'effet photoélectrique	23
1.3.2. La diffusion Compton	24
1.3.3. La production de paires	26
1.4. Références	27

Chapitre 2 : Émission de lumière	29
2.1. La scintillation (radioluminescence)	29
2.1.1. Les scintillateurs organiques	31
2.1.2. Les scintillateurs inorganiques	32
2.2. La fluorescence des matériaux dopés de lanthanides	33
2.2.1. Généralités sur les lanthanides	33
2.2.2. Les matériaux dopés de lanthanides	34
2.2.3. La théorie de Judd-Ofelt	36
2.2.4. Remarques complémentaires sur la théorie de Judd-Ofelt	39
2.3. La radioluminofluorescence (fluorescence induite par radioluminescence)	41
2.3.1. Hypothèse	41
2.3.2. Interactions des lanthanides dans les scintillateurs	42
2.4. Références	43
Chapitre 3 : Les matériaux	46
3.1. Introduction	46
3.2. Les verres dopés	46
3.2.1. Le verre ED2 dopé de néodyme	46
3.2.2. Le verre poreux dopé d'erbium	53
3.2. Les matériaux références	59
3.2.1. Le ZBLAN	59
3.2.2. Le titane saphir	61
3.4. Synthèse de chapitre	63
3.5. Références	64
Chapitre 4 : Simulations numériques	66
4.1. Introduction	66
4.2. Les simulations Geant4	66
4.2.1. Les interactions	66
4.2.2. Les spectres de dépôt d'énergie	69
4.2.3. Profondeur de pénétration des gammas	72

4.3. Les simulations SRIM2003	75
4.3.1. Profondeur de pénétration des ions	76
4.3.2. Dépôt d'énergie	77
4.3.3. Comparaison avec les autres matériaux	81
4.4. Synthèse de chapitre	86
4.5. Références	86
Chapitre 5 : Étude de la fluorescence induite par radioluminescence	88
5.1. Introduction	88
5.2. Mesures des spectres d'émission	88
5.2.1. Spectre d'émission du NdIV:VP excité par radiation ionisante, dépendance en dose et comparaison avec le spectre d'émission par excitation optique.	89
5.2.2. Spectre d'émission du ErIV:VP excité par radiation ionisante, dépendance en dose et comparaison avec le spectre d'émission par excitation optique	98
5.2.3. Spectre d'émission du Ti:Sa excité par radiation ionisante, et comparaison avec le spectre d'émission par excitation optique.	105
5.3. Temps de vie	107
5.3.1. NdIV:ED2	108
5.3.2. ErIV:VP	112
5.3.3. Ti:Sa	114
5.4. Synthèse de chapitre	116
5.5. Références.	117
Chapitre 6 : Applications potentielles	119
6.1. Introduction	119
6.2. Les lasers pompés par radiations ionisantes	119
6.2.1. Concepts de base sur les lasers	119
6.2.2. Modèle du laser pompé par radiation ionisante	121
6.2.3. Étude pour un laser pompé par radiation ionisante	123
6.3. Détecteurs de particules ionisantes à émission infrarouge	127
6.4. Références	133

<i>Conclusions</i>	135
<i>Annexe 1 : Simulation Geant4 des différentes interactions produites par une particule gamma de 1.25 MeV dans le VP</i>	<i>A</i>
<i>Annexe 2 : Calculs SRIM2003</i>	<i>GG</i>
<i>Annexe 2.1. : ErIV:VP</i>	<i>GG</i>
<i>Annexe 2.2. : Ti:Sa</i>	<i>JJ</i>
<i>Annexe 3 : Simulations Casino dans un échantillon de NdIV:ED2</i>	<i>NN</i>
<i>Annexe 3.1. : Électrons à 1 keV</i>	<i>NN</i>
<i>Annexe 3.2. : Électrons à 250 keV</i>	<i>PP</i>
<i>Annexe 3.3. : Électrons à 500 keV</i>	<i>SS</i>

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Quelques exemples de scintillateurs.	29
Tableau 2.2 : Configurations électroniques des lanthanides.....	33
Tableau 2.3 : Exemple des paramètres Ω_k de l'Er ³⁺ pour différents types de verres.....	38
Tableau 2.4 : Les paramètres que l'on peut obtenir à partir de S.	39
Tableau 3.1 : Composition des échantillons de ED2.	47
Tableau 3.2 : Compositions du verre poreux (VP) dopé d'erbium, et non dopé.....	54
Tableau 3.3 : Compositions des échantillons de ZBLAN.....	60
Tableau 3.4 : Composition du Ti:Sa.	61
Tableau 6.1 : Caractéristiques dépendantes des matériaux pour l'étude comparative de pompage laser et irradiation H ₂ ⁺	125
Tableau 6.2 : Rendement de photons par particule ionisante à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.	130
Tableau 6.3 : Taux de conversion d'énergie à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.	131

Liste des figures

Figure 1.1: Collision d'une particule lourde chargée avec un électron atomique.	8
Figure 1.2 : La diffusion Compton.	24
Figure 2.1 : Spectre d'émission du BaF ₂	29
Figure 2.2 : Spectre d'émission du CdWO ₄	30
Figure 2.3 : Spectre d'émission du CsI non-dopé, dopé de Na, et dopé de Tl.	30
Figure 2.4 : Spectre d'émission du NaI(Tl), comparé au CsI(Na) et au CsI(Tl).	30
Figure 2.5 : Diagramme des niveaux d'énergie d'un scintillateur organique.	31
Figure 2.6 : Structure électronique d'un cristal inorganique.	32
Figure 3.1 : Niveaux d'énergie du NdIV (Holgate <i>et al.</i> , J. Phys. : Condens. Matter 6, 9255 (1994)).	48
Figure 3.2 : Spectre d'absorption du NdIV:ED2.	49
Figure 3.3 : Spectre d'absorption du NdIV:ED2 de 250 à 1000 nm.	49
Figure 3.4 : Montage expérimental de mesure du spectre d'émission sous exposition optique.	50
Figure 3.5 : Spectres d'émission du NdIV:ED2 exposé à la lampe UV et à une diode laser à 808 nm.	51
Figure 3.6 : Spectre d'émission de la lampe UV utilisée.	51
Figure 3.7 : Spectre d'émission de la lampe UV utilisée (échelle semi-logarithmique). ..	52
Figure 3.8 : Niveaux d'énergie de l'ErIV (H. Inoue et al., J. Non-Cryst. Solids 298, 270– 286 (2002)).	55
Figure 3.9 : Spectre d'absorption du ErIV:VP.	56
Figure 3.10 : Spectre d'absorption du ErIV:VP de 200 à 600 nm.	57
Figure 3.11 : Spectres d'émission du ErIV:VP pompé par lampe UV et par diode laser à 980 nm.	58
Figure 3.12 : Radioluminescence et thermoluminescence du ErIV:ZBLAN (B. Yang, P.D. Townsend, <i>et al.</i> , Phys. Rev B 56, 5876 (1997)).	60
Figure 3.13 : Spectre d'absorption du Ti:Sa.	62

Figure 3.14 : Spectre d'émission du Ti:Sa excité par une pompe optique (Verdi à 532 nm).....	63
Figure 4.1: Spectre de dépôt d'énergie, dans le spectre visible, de divers matériaux exposés à des gammas de 1.2 MeV.	69
Figure 4.2 : Spectre de dépôt d'énergie, dans le spectre d'énergie, de divers matériaux exposés à des gammas de 1.2 MeV.	70
Figure 4.3 : Comparaison des spectres de dépôt d'énergie entre le verre poreux (VP) et le verre poreux dopé (ErIV:VP).....	71
Figure 4.4 : Profondeur de pénétration des interactions dues au gamma à 1.2 MeV dans le NdIV:ED2.....	72
Figure 4.5 : Profondeur de pénétration des interactions dues au gamma à 1.2 MeV dans le ErIV:VP.	73
Figure 4.6 : Profondeur de pénétration des interactions dues au gamma à 1.2 MeV dans le ErIV:YbIV:ZBLAN.....	73
Figure 4.7 : Étude du spectre de dépôt d'énergie en fonction de la position dans l'échantillon de ErIV:VP.....	75
Figure 4.8 : profondeur de pénétration dans le NdIV:ED2 irradié par des ions H, He et C.....	76
Figure 4.9 : mesure du dE/dx du NdIV:ED2, irradié par des ions de H, He et C.....	77
Figure 4.10: Propagation d'ions de a) H, b) He et c) C dans du NdIV:ED2.	78
Figure 4.11 : Portée d'ions de a) H, b) He et c) C dans du NdIV:ED2.	79
Figure 4.12 : Ionisations et créations de phonons provoquées par des ions de H_2^+ à 2.1 MeV dans le NdIV:ED2.....	79
Figure 4.13 : Ionisations et créations de phonons provoquées par des ions de $^4He^{++}$ à 8.4 MeV dans le NdIV:ED2.....	80
Figure 4.14 : Ionisations et créations de phonons provoquées par des ions de $^{12}C^{++}$ à 8.4 MeV dans le NdIV:ED2.....	80
Figure 4.15 : dE/dx des H, He et C dans le ErIV:VP.....	82
Figure 4.16 : dE/dx des ions de H, He et C dans le Ti:Sa.....	82
Figure 4.17 : Profondeur de pénétration des ions de H, He, et C dans l'ErIV:VP.....	83

Figure 4.18 : Profondeur de pénétration des ions de H, He, et C dans le Ti:Sa.	83
Figure 4.19 : Profondeur de pénétration en fonction du nombre de masse.	84
Figure 4.20 : Parcours des ions H en fonction de la densité des matériaux.....	85
Figure 4.21 : Parcours des ions He et C en fonction de la densité des matériaux.	85
Figure 5.1 : Montage expérimental de mesure de spectre d'émission sous excitation ionisante.	89
Figure 5.2 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 exposé à une irradiation d'ions H_2^+ à 4.2 MeV.	90
Figure 5.3 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 exposé à une irradiation d'ions H_2^+ à 4.2 MeV pris au spectromètre UV-visible.	90
Figure 5.4 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 irradié par des ions $^4He^{++}$ à 8.4 MeV.....	91
Figure 5.5 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 irradié par des ions $^{12}C^{++}$ à 8.4 MeV.....	91
Figure 5.6 : Intensité d'émission du NdIV:ED2 dans l'infrarouge en fonction de la dose de radiation absorbée.	94
Figure 5.7 : Mesure d'intensité d'émission dans l'infrarouge.	94
Figure 5.8 : Comparaison des spectres d'émission du NdIV:ED2 exposé à une excitation UV et à une excitation ionisante (He).	95
Figure 5.9 : Fatigue du NdIV:ED2 irradié au $^{12}C^{++}$ à 4.2 MeV, à une intensité de 0.5 μA ou $1.6 \cdot 10^{12}$ ions/s.	96
Figure 5.10 : Image AFM de la surface de l'échantillon de NdIV:ED2 avant exposition au $^{12}C^{++}$	97
Figure 5.11 : Image AFM de l'échantillon de NdIV:ED2 après exposition au $^{12}C^{++}$ à 4.2 MeV et 0.15 μA , pour une dose absorbée de $3 \cdot 10^{11}$ rad.	97
Figure 5.12 : Spectre d'émission du ErIV:VP irradié par des ions de H_2^+ à 4.2 MeV.....	98
Figure 5.13 : Spectre d'émission du ErIV:VP irradié par des ions de H_2^+ à 4.2 MeV prise au spectromètre UV-visible.....	99
Figure 5.14 : Spectre d'émission du ErIV:VP irradié par des ions de $^4He^{++}$ à 8.4 MeV...	99
Figure 5.15 : Spectre d'émission du ErIV:VP irradié par des ions de $^{12}C^{++}$ à 8.4 MeV.	100
Figure 5.16 : Intensité d'émission du NdIV:ED2 dans l'infrarouge en fonction de la dose de radiation absorbée dans l'ErIV:VP.....	101

Figure 5.17 : Comparaison des spectres d'émission du ErIV:VP exposé à une excitation UV et à une excitation ionisante (He).	102
Figure 5.18 : Fatigue du ErIV:VP irradié au $^{12}\text{C}^{++}$ à 4.2 MeV, à une intensité de 0.5 μA ou 1.6×10^{12} ions/s.	104
Figure 5.19 : Spectre d'émission du Ti:Sa irradié au H_2^+ à 4.2 MeV.	105
Figure 5.20 : Comparaison des spectres d'émission du Ti:Sa exposé à une excitation verdi (532 nm) et à une excitation ionisante (H).	106
Figure 5.21 : Montage expérimental de mesures de temps de vie.	107
Figure 5.22 : Signal à l'oscilloscope de la fluorescence à 1064 nm du NdIV:ED2.	108
Figure 5.23 : Lissage exponentiel décroissant pour mesurer le temps de vie de la fluorescence IR du NdIV:ED2.	109
Figure 5.24 : Dépendance en intensité d'irradiation du temps de vie de la fluorescence à 1064 nm du NdIV:ED2.	110
Figure 5.25 : Temps de vie de la radioluminescence UV-bleue (350 - 450 nm) du NdIV:ED2.	111
Figure 5.26 : Vue de l'oscilloscope de la mesure de temps de vie de la fluorescence à 1550 nm du ErIV:VP irradié par des H_2^+ à 4.2 MeV et 10 nA.	112
Figure 5.27 : Lissage exponentiel décroissant pour évaluer le temps de vie de la fluorescence à 1550 nm du ErIV:VP.	112
Figure 5.28 : Dépendance en intensité d'irradiation du temps de vie de la fluorescence à 1550 nm du ErIV :VP.	113
Figure 5.29 : Vue de l'oscilloscope de la mesure de temps de vie de la fluorescence IR du Ti :Sa irradié par des H_2^+ à 4.2 MeV et 12.5 nA.	114
Figure 5.30 : Lissage exponentiel décroissant pour évaluer le temps de vie de la fluorescence en infrarouge du Ti:Sa.	115
Figure 5.31 : Dépendance en intensité d'irradiation du temps de vie de la fluorescence en infrarouge du Ti:Sa.	116
Figure 6.1 : Principe de fonctionnement du laser.	120
Figure 6.2 : Schéma du laser co-pompé optiquement et par radiation ionisante.	122

Figure 6.3 : Intensité d'émission IR du NdIV:ED2 exposé à une pompe laser à 808 nm et à une irradiation H_2^+ à 4.2 MeV.....	124
Figure 6.4 : Intensité d'émission IR du ErIV:VP exposé à une pompe laser à 980 nm et à une irradiation H_2^+ à 4.2 MeV.	124
Figure 6.5 : Intensité d'émission du NdIV:ED2 en fonction de la puissance laser, pour différentes intensités d'irradiation.	125
Figure 6.6 : Intensité d'émission du ErIV:VP en fonction de la puissance laser, pour différentes intensités d'irradiation.	126
Figure 6.7 : Courbe du pic à 1550 nm du ErIV:VP exposé à $^4He^{++}$ à 4.2 MeV et 50 nA.....	129
Figure 6.8 : Évaluation de l'aire sous la courbe de la figure 6.7.....	129
Figure 6.9 : Rendement en particules à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.	131
Figure 6.10 : Rendement énergétique à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.	131
Figure A.2.1 : Propagation d'ions de a) H, b) He et c) C dans du ErIV:VP.	GG
Figure A.2.2 : Portée d'ions de a) H, b) He et c) C dans du ErIV:VP.....	HH
Figure A.2.3 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de H dans le ErIV:VP.	II
Figure A.2.4 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de He dans le ErIV:VP.	II
Figure A.2.5 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de C dans le ErIV:VP.	JJ
Figure A.2.6 : Propagation d'ions de a) H, b) He et c) C dans du Ti:Sa.	JJ
Figure A.2.7 : Portée d'ions de a) H, b) He et c) C dans du Ti :Sa.	KK
Figure A.2.8: Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de H dans le Ti:Sa.	LL
Figure A.2.9 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de He dans le Ti:Sa.....	LL

Figure A.2.10 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de C
dans le Ti:Sa..... MM

Figure A.3.1 : Distribution d'électrons à 1 kev dans le NdIV:ED2.NN

Figure A.3.2 : Énergie par position d'électrons incidents à 1 keV sur du NdIV:ED2.OO

Figure A.3.3 : Rayons-X issus d'électrons à 1 keV sur du NdIV:ED2 (haut) et
distribution radial (bas).OO

Figure A.3.4 : Distribution d'électrons à 250 kev dans le NdIV:ED2. PP

Figure A.3.5 : Énergie par position d'électrons incidents à 250 keV sur du NdIV:ED2. QQ

Figure A.3.6 : Rayons X issus d'électrons incidents à 250 keV sur le NdIV:ED2. RR

Figure A.3.7 : Distribution radiale de rayons X issus d'électrons incidents à 250 keV
sur le NdIV:ED2. RR

Figure A.3.8 : Distribution d'électrons à 500 keV dans le NdIV:ED2. SS

Figure A.3.9 : Énergie par position d'électrons incidents à 500 keV sur le NdIV:ED2. ..TT

Figure A.3.10 : Rayons X issus d'électrons incidents à 500 keV sur le NdIV:ED2.UU

Figure A.3.11 : Distribution radiale de rayons X issus d'électrons incidents à 500 keV
sur le NdIV:ED2.UU

Remerciements

Je tiens à remercier le Professeur Roger A. Lessard, qui fut mon directeur de thèse, ainsi que mon co-directeur lors de ma maîtrise. Je n'oublierai jamais de quel trouble il m'a sorti en 2002 en acceptant de me prendre au doctorat. Je lui suis des plus reconnaissants pour m'avoir permis de faire cette thèse sur un sujet aussi original. Je n'oublierai jamais ces longues conversations sur la science que nous avons eues, et surtout celles portant sur l'holographie. J'ai eu cette chance extraordinaire d'avoir pour directeur de recherche un spécialiste mondial de l'holographie, bien que le sujet puisse paraître bien éloigné du sujet de cette thèse cela m'a donné l'opportunité d'avoir un directeur de thèse visionnaire qui contribue par sa recherche à faire un monde plus beau. Quand la science et l'art se retrouvent en un seul homme cela force le respect. Je remercie également le Professeur Lessard pour les bières qu'il offrit à mes collègues et moi-même à quelques occasions –comme les cabanes à sucre- mais surtout pour une bière qu'il m'offrit un jour que je venais de perdre un procès. Je remercie aussi le Professeur Lessard pour m'avoir fait partagé ses connaissances du « monde extérieur », autant de points de vue scientifique, industriel, économique, philosophique ou juridique; ses conseils avisés me servent et me serviront encore longtemps, très longtemps.

Je tiens à remercier le Professeur René Roy qui fut mon co-directeur de recherche. En fait, au baccalauréat déjà j'allais voir le Professeur Roy pour dans l'espoir de faire une maîtrise en physique médicale, finalement ma destinée fut différente, mais j'ai pu avoir le privilège d'avoir ce professeur comme co-directeur de thèse. Je tiens à le remercier tout particulièrement pour son sens de l'humour, bien qu'il m'arrive encore parfois de me demander s'il s'agissait vraiment toujours d'humour! Je dois reconnaître aussi que sans le Professeur Roy la partie nucléaire de cette thèse aurait été bien maltraitée, et que ses

idées et son expérience m'auront permis de pouvoir faire mes expériences avec l'accélérateur van de Graaff en un temps record, compte tenu de la sévère contrainte temporelle que nous avions.

Je tiens à remercier maintenant les Professeurs Lessard et Roy pour leur soutien financier. Je les remercie aussi pour l'amitié qui les lie, et qui aura rendu ces trois années de recherche particulièrement agréables. J'ai vraiment apprécié le fait de pouvoir travailler avec ces deux professeurs, l'un spécialiste en optique, l'autre en physique nucléaire, il ne me restait pas beaucoup de place pour mes bizarreries lors de nos réunions et tout s'est toujours superbement passé. Il y eu autant de rires que de plissements de fronts, c'est à mon sens la manière dont doit être menée la recherche fondamentale.

Je remercie aussi le Dr. Luc Beaulieu, ainsi que Jean-François Carrier et Louis Archambault à l'hôpital Hôtel-Dieu de Québec, pour m'avoir permis d'utiliser leurs compétences de physique médicale, ainsi que du matériel scientifique.

Un remerciement aussi à Sylvain Massey et au Professeur Denis Roy du Laboratoire de physique atomique et moléculaire dont j'ai pu utiliser un montage expérimental pour une vérification avec les faisceaux d'électrons.

Je tiens à remercier Richard Piché, alors technicien à l'Université Laval, qui activait le van de Graaff. Je le remercie particulièrement pour les heures supplémentaires qu'il faisait avec moi tard le soir pour finir des expériences. Ce n'était pas toujours drôle, ni facile, mais avoir la possibilité de travailler avec un technicien aussi dévoué et serviable est honnêtement un avantage. Je remercie aussi Richard pour les bières que nous avons pu boire au Pub, au Star Bar ou au Liquor Store après les expériences. Nous avions une

moyenne d'âge de 30ans, et nous travaillions dans un accélérateur de particules, c'était assez particulier.

Je tiens à remercier tous les techniciens et secrétaires du département de physique, de génie physique et d'optique. Sans eux, il serait simplement impossible de faire la recherche universitaire. Les techniciens sont le lien absolument nécessaire entre le matériel de recherche et les étudiants gradués qui manquent –logiquement- d'expérience. Les secrétaires règlent tous nos problèmes à tout niveau administratif, ça a l'air de rien mais dans un département de physique cela représente du travail!

Je remercie aussi le Professeur Claude Saint-Pierre et le Professeur Michel Piché pour les conversations fructueuses que j'ai pu avoir avec eux. Ces petites conversations m'ont souvent permis d'avancer alors que je ne voyais même pas encore que j'étais bloqué!

Je remercie mes collègues étudiants des Professeurs Lessard et Roy : Mélanie, Ève, Josiane, Ansgar, Seydou, Mamadou, Daniel, Mathias, Frédéric, Dany, Jérôme, Alexandre et tous les autres.

Je remercie tous les professeurs du département de physique, de génie physique et d'optique qui m'ont enseigné à un moment ou à un autre.

À titre personnel maintenant :

Je tiens encore une fois à remercier mes directeurs de recherche : les Professeurs Roger A. Lessard et René Roy.

Je tiens aussi à remercier mes parents, Marie-Rose et Henri Peyrot, pour tout ce qu'ils ont fait pour moi dans ma vie, il est évident que sans leur soutien constant, et ce malgré toutes les épreuves qu'ils ont connues, je ne me serais jamais rendu là où j'en suis aujourd'hui.

Je remercie ma sœur, Sophie Peyrot, pour son amour et sa gentillesse.

Je remercie Sandra Côté et Benoît Ouziel pour leur indéfectible amitié.

Je remercie le Québec, ainsi que le très saint royaume de Norvège, pour tout ce que ces deux pays représentent à mes yeux.

*« Ceux qui soutiennent que la science n'explique rien,
l'on voudrait qu'ils nous expliquassent une bonne fois
ce que serait pour eux que d'expliquer. »
(Rostand, Jean 1894-1977)*

*Je dédie cette thèse
au premier hominidé qui produisit le feu.*

Introduction

Le concept

L'idée initiale de ce doctorat était de réaliser un laser pompé par radiations ionisantes. En effet, l'apparition des lasers à fibre optique [1-5] a permis de régler les problèmes thermodynamiques dans les milieux de gain¹. Puisque le diamètre d'une fibre optique est très petit, inférieur au millimètre, le seul contact de l'air permet son refroidissement. En l'absence de ces problèmes thermodynamiques, il n'est plus nécessaire d'utiliser une source de refroidissement, ce qui est un grand gain autant en espace, qu'en coût et en énergie.

S'il était possible de pomper un laser avec des radiations ionisantes, alors c'est la source même d'énergie pour le pompage qui serait remplacée. Il serait envisageable de remplacer les systèmes de pompage actuel - tels que les lampes, les lasers, les différences de potentiel, etc.- par une source radioactive. L'avantage ici, serait encore un gain en espace, en coût et en énergie. Que les sources radioactives soient naturelles ou non elles demeurent des sources de pollution, dont l'on néglige le potentiel comme source d'énergie. Il y aurait un intérêt écologique de pouvoir utiliser une source d'énergie souvent considérée comme une source polluante. D'ailleurs, l'idée d'un laser pompée par radiation a déjà évoquée [6], mais dans le cadre de l'astrophysique, il s'agit alors d'un laser dans un milieu naturel.

On peut ainsi facilement imaginer l'intérêt d'un tel laser dans les applications en des lieux où l'accessibilité en énergie n'est pas garantie. Dans les sciences de l'espace, l'accès à une source énergétique est le problème majeur des vaisseaux spatiaux, des robots, des sondes ou des satellites contemporains. L'usage de grands panneaux solaires ou de petites batteries est nécessaire, mais l'énergie produite demeure faible, et le

¹ C'est-à-dire dans les matériaux dans lesquels l'inversion de population se produit, donc que l'émission stimulée domine l'émission spontanée, et finalement où se produit l'effet laser.

matériel embarqué est plus limité par sa consommation d'énergie que par son encombrement.

L'utilisation d'un laser pompé par des radiations ionisantes serait un avantage autant pour les applications des lasers, que comme source d'énergie, puisqu'il s'agirait ultimement d'une conversion d'énergie nucléaire en énergie optique. Aussi, si le milieu actif de ce laser était une fibre optique, l'absence de source électrique pour le refroidissement, tout comme pour l'excitation, soulèverait un intérêt certain.

De nombreuses technologies ont été développées ces dernières années dans des domaines très différents de la physique.

La physique optique a vu l'avènement des lasers à état solide, dont certains ont des ions trivalents de lanthanides excités dans un matériau afin de produire certaines raies spectrales. C'est le cas, entre autre, des technologies de télécommunication qui utilisent les transitions de l'erbium trivalent pour produire des longueurs d'onde à 1550 nm, l'avantage étant que cette longueur d'onde se propage très facilement dans les fibres optiques. Ainsi l'utilisation de cette longueur d'onde permet des communications très rapides entre différents points de notre globe. Donc, pour répondre à ses besoins spécifiques, la physique optique a pu développer de nombreux matériaux qui ne demeurent utilisés que dans ces cadres particuliers.

D'un autre côté, la physique nucléaire a développé sur presque un siècle des matériaux scintillateurs [7-11], qui sont des matériaux qui produisent de la lumière lorsqu'ils sont exposés aux radiations ionisantes. De nombreux grands noms – Einstein, Oppenheimer, Pauli, Bambynek – de la physique moderne se sont penchés sur ces processus de production de lumière dans les matériaux, autant au niveau expérimental que théorique [12-15]. De nombreux processus ont été trouvés aux niveaux atomique et moléculaire, et s'expliquent pour beaucoup par la physique quantique.

Malheureusement, nombre de ces processus liés à des matériaux spécifiques ne demeurent connus qu'au stade empirique aujourd'hui, de par l'extrême complexité des interactions de la matière qui y sont impliquées. Quoiqu'il en soit le fait que ces processus soient décrits – théoriquement ou semi-empiriquement – permet de développer des technologies novatrices.

C'est ainsi que les matériaux scintillants sont particulièrement utilisés aujourd'hui comme détecteur en physique médicale ainsi qu'en physique nucléaire [16-18]. Il s'agit d'ailleurs de domaines d'étude particulièrement explorés à l'Université Laval grâce aux chercheurs de l'hôpital Hôtel-Dieu à Québec. D'ailleurs, c'est aussi sur des fibres optiques que travaillent ces collègues. En effet, l'utilisation de détecteurs composés de fibres scintillantes permet une meilleure maniabilité des matériaux, ainsi qu'éventuellement une meilleure résolution spatiale.

Parmi toutes ces différences concernant la physique optique et la physique nucléaire, il y a bien plus de points convergents que l'on pourrait le penser. Il faut d'abord se rappeler que le développement de ces deux domaines est issu du même courant de pensée scientifique. En effet, c'est la révolution scientifique du début du XX^e siècle qui amène le développement de la physique quantique qui demeure la base commune des technologies contemporaines utilisées en optique et en nucléaire.

En effet, le fonctionnement d'un laser est bel et bien basé sur les interactions atome-atome dans les milieux de gain. Les niveaux excités qui permettent les transitions radiatives sont décrits par des théories quantiques, et les émissions spontanée et stimulée, décrites par Einstein [12], sont la clef du processus d'émission laser.

Les différences marquantes entre ces deux domaines de la physique sont finalement plus dues aux utilisations, donc aux besoins, qu'à la connaissance sous-jacente.

Le physicien développant un laser a besoin d'une durée de vie d'un niveau radiatif longue, c'est ainsi qu'il pourra atteindre plus facilement l'inversion de population

nécessaire pour rendre dominante l'émission stimulée sur l'émission spontanée. Aussi, il aura besoin d'un matériau qu'il puisse exciter avec les outils qui sont à sa disposition. Si le laser est pompé par un autre laser, il faut que le milieu puisse absorber à la longueur d'onde d'émission de la pompe.

De son côté, le physicien en physique nucléaire qui développe des scintillateurs pour les utiliser comme détecteurs à particules ionisantes aura besoin d'une durée de vie de la luminescence courte afin d'optimiser la résolution temporelle de son instrument. Aussi, le scintillateur devra être transparent à la longueur d'onde d'émission.

On voit donc que si les connaissances initiales sont les mêmes, les contraintes liées aux domaines d'étude font que les deux chercheurs finissent par travailler dans des directions opposées.

Pour la réalisation de cette thèse, il était nécessaire de travailler dans ces deux domaines de la physique, et de leur trouver un point de convergence. Il s'agit des matériaux utilisés. Bien qu'ils aient des applications différentes, ils peuvent se rejoindre dans leur structure et dans certains effets. Si rare que soit la littérature combinant les deux domaines, elle existe [19] et cherche des applications souvent très originales.

C'est pourquoi cette thèse, qui partait d'une idée sur un laser pompé par radiations ionisantes, porte finalement sur la fluorescence induite par radioluminescence. Ce procédé étudié au laboratoire permet de percevoir de nouvelles applications autant dans le domaine de l'optique que de la physique nucléaire.

Synopsis

Après cette introduction, les deux premiers chapitres de cette thèse seront des rappels théoriques. Le premier chapitre traitera des interactions des particules ionisantes avec la matière, ou ce qu'il se passe quand la radiation traverse la matière. Le deuxième chapitre

traitera des processus amenant à la production de la lumière dans ces matériaux. Ces processus seront décrits autant au niveau moléculaire et atomique, que concernant le type de matériau.

Un troisième chapitre décrira les différents matériaux utilisés lors de cette recherche. Il s'agit des matériaux utilisés lors d'expériences, ainsi que d'autres matériaux décrits théoriquement, à partir de la littérature, pour fin de simulation numérique.

Le quatrième chapitre portera justement sur ces simulations numériques qui auront été effectuées avec différents logiciels tels que Geant4 ou SRIM2003, afin de vérifier les différents paramètres utiles pour prévoir les expériences, ainsi que pour comprendre les résultats de celles-ci.

Le cinquième chapitre sera totalement expérimental et portera sur l'étude effective de la fluorescence induite par radioluminescence.

Le sixième chapitre, fort des chapitres précédents, s'efforcera de démontrer le potentiel d'application dans les différents domaines de la physique moderne.

Finalement, je conclurai par un rapide résumé des expériences menées, par une auto-critique du travail réalisé et par une ouverture sur d'autres sujets qui pourraient potentiellement émerger des réalisations présentées dans cette thèse.

Références

1. A.E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Sausalito, 1986).
2. O.S. Wenger, C. Wickleder, K.W. Krämer et H.U. Güdel, *J. Lumin.* **94-95**, 101 (2001).
3. R.I. Laming, S.B. Poole et E.J. Tarbox, *Opt. Lett.* **13**, 1084 (1988).

4. P. Laporta, S. Longhi, S. Taccheo et O. Svelto, *Opt. Comm.* **100**, 311 (1993).
5. P. Laporta, S. Taccheo, S. Longhi et O. Svelto., *Opt. Lett.* **18**, 1232 (1993).
6. S. Johansson et V.S. Letokhov, *Publ. Astron. Soc. Pac.* **115**, 1375 (2003).
7. A.P. Vink, E. van der Kolk, P. Dorenbos et C.W.E. van Eijk, *Opt. Comm.* **210**, 277 (2002).
8. R. Visser, P. Dorenbos, C.W.E. van Eijk, A. Meijerink, G. Blasse et H.W. den Hartog, *J. Phys.: Condens. Matter* **5**, 1659 (1993).
9. A.J. Wojtowicz, *Nucl. Instrum. Meth. A* **486**, 201 (2002).
10. B. Yang, P.D. Townsend, N. Can, A. Janke, P. Daniel, O. Blanc et J. Granier, *Phys. Rev. B* **56**, 5876 (1997).
11. W.W. Moses, M.J. Weber, S.E. Derenzo, D. Perry, P. Berdahl et L.A. Boatner, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-45**, 462 (1998).
12. A. Einstein, *Phys. Z.* **18**, 121 (1917).
13. J.R. Oppenheimer, *Phys. Z.* **55**, 725 (1929).
14. H.C. Pauli, *Tables of Internal Conversion Coefficients and Particle Parameters* (Purdue Univ. Rep. COO-1420-137, 1967).
15. W. Bambynek, B. Craseman, R.W. Fink, H.-U. Freund, H. Mark, C.D. Swift, R.E. Price et P. Venugopala Rao, *Rev. Mod. Phys.* **44**, 716 (1972).
16. A.J. Wojtowicz, W. Drozdowski, D. Wisniewski, *et al.*, *Opt. Mat.* **28**, 85 (2006).
17. M.J. Weber, M. Bliss, R.A. Craig, *et al.*, *Radiat. Eff. Defect. S.* **134**, 23 (1995).
18. C.W.E. Vancijk, *Nucl. Tracks Rad. Meas.* **21**, 5 (1993).
19. J.A. Levitt et W.H. Weber, *Appl. Opt.* **16**, 2684 (1977).

Chapitre 1 : Les interactions des particules ionisantes avec la matière

La présente thèse porte entre autres sur l'émission des raies spectrales des lanthanides lorsque le matériau hôte est exposé à des radiations ionisantes. Deux phénomènes vont amener à la production de ces photons, l'un est décrit par la physique nucléaire et l'autre par la physique optique – le lien se faisant par la physique atomique et moléculaire. Ce chapitre va donc décrire la partie nucléaire, et portera sur les interactions des particules ionisantes avec la matière. Ces phénomènes sont responsables de l'émission de lumière des matériaux exposés à des particules ionisantes, il s'agit de la scintillation – aussi connue comme radioluminescence – qui sera décrite dans le chapitre 2.

Les particules ionisantes traversent le matériau et y déposent de l'énergie par perte d'énergie cinétique, ou par absorption. Suivant le type de particules incidentes les processus de dépôt d'énergie peuvent être très différents, ceci en raison de la masse des particules, ou de leur charge. On peut donc distinguer quatre types de particules : les particules lourdes chargées (protons, α , ions), les électrons et les positrons, les photons X et γ , et les neutrons. Dans la mesure où cette recherche aura particulièrement porté sur les particules lourdes chargées, l'emphasis sera donc mise sur ces particules dans une première section, avant de présenter plus rapidement les interactions des autres particules dans les sections qui suivront. Le cas des neutrons ne sera pas considéré.

Ce chapitre théorique est en très grande partie inspiré de manuels de physiques nucléaire et quantique [1-3].

1.1. Les particules lourdes chargées

Étudions dans un premier temps le modèle de Bohr. Bien qu'ayant de nombreuses limites, ce modèle demeure essentiel pour cerner le problème de dépôt d'énergie dans la

matrice hôte. J'exposerai ensuite le modèle de Bethe-Bloch qui est plus couramment utilisé.

1.1.1. Le calcul de Bohr – cas classique

Considérons une particule de charge ze , de masse M et de vitesse V , traversant un matériau, et supposons la présence d'un électron atomique à une distance b de la trajectoire de la particule. L'électron est considéré statique. Aussi, après la collision la particule n'est pas déviée, ce qui est une approximation acceptable en regard des différences de masse ($M \gg M_e$).

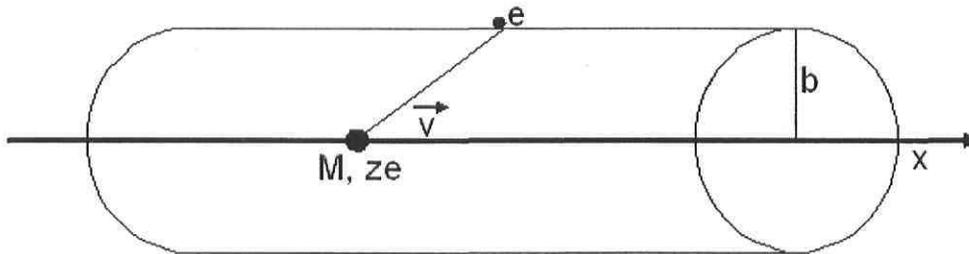


Figure 1.1: Collision d'une particule lourde chargée avec un électron atomique.

Évaluons maintenant l'énergie gagnée par l'électron, en trouvant le moment reçu lors de la collision avec la particule lourde.

$$I = \int F dt = e \int E_{\perp} dt = e \int E_{\perp} \frac{dt}{dx} dx = e \int E_{\perp} \frac{dx}{v} . \quad (1.1)$$

Seule la composante du champ électrique perpendiculaire à la trajectoire est prise en compte, et cela pour des raisons de symétrie. L'intégrale est évaluée par la loi de Gauss, sur un parcours cylindrique de longueur infinie. Ce cylindre est centré sur l'axe de la trajectoire et sa surface passe par la position de l'électron.

$$\int E_{\perp} 2\pi b dx = 4\pi ze \Rightarrow \int E_{\perp} dx = \frac{2ze}{b} . \quad (1.2)$$

D'où on peut déduire I , ainsi que l'énergie gagnée par l'électron $\Delta E(b)$:

$$I = \frac{2ze^2}{bV}, \quad (1.3)$$

$$\Delta E(b) = \frac{I^2}{2m_e} = \frac{2z^2e^4}{m_eV^2b^2}. \quad (1.4)$$

Si nous considérons la densité électronique N_e , alors on peut évaluer la quantité d'énergie perdue au profit des électrons, situés entre des distances b et $b+db$ pour une épaisseur dx .

$$-dE(b) = \Delta E(b)N_e dV = \frac{4\pi z^2e^4}{m_eV^2} N_e \frac{db}{b} dx. \quad (1.5)$$

Nous avons ici l'élément de volume $dV = 2\pi b db dx$. Il reste ici à déterminer les bornes d'intégration de db . Donc, en résolvant l'intégrale 1.5, nous obtenons :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2e^4}{m_eV^2} N_e \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}. \quad (1.6)$$

Il reste encore à évaluer b_{\min} et b_{\max} . En considérant les équations relativistes, l'énergie transférable dans une collision frontale est : $2\gamma^2 m_e V^2$, avec le facteur de Lorentz

$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}$. Nous obtenons donc :

$$\frac{2z^2e^4}{m_eV^2b_{\min}^2} = 2\gamma^2 m_e V^2 \Rightarrow b_{\min} = \frac{ze^2}{\gamma m_e V^2}. \quad (1.7)$$

Pour évaluer b_{\max} , il faut considérer que l'électron est lié à un atome avec une fréquence orbitale ν . Afin que l'électron puisse absorber l'énergie, la perturbation causée par la particule incidente doit se produire dans un temps court en comparaison de la période de l'électron $\tau = 1/\nu$. Sinon la perturbation sera adiabatique et aucune énergie ne sera transférée. Toujours en utilisant la relativité, le temps d'interaction typique est $t = t/\gamma = b/(\gamma\mathcal{W})$.

$$\frac{b}{\gamma\mathcal{W}} \leq \tau = \frac{1}{\nu}, \quad (1.8)$$

avec ici $\bar{\nu}$ qui est la fréquence moyennée de toutes les fréquences des énergies de liaison. D'où l'on déduit b_{\max} :

$$b_{\max} = \frac{\mathcal{W}}{\bar{\nu}}. \quad (1.9)$$

En substituant (1.7) et (1.9) dans (1.6) on trouve l'énergie déposée dans le matériau, i.e. l'énergie perdue par la particule lourde au profit des électrons, en fonction de la pénétration dans l'échantillon :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e V^2} N_e \ln \frac{\gamma^2 m V^3}{ze^2 \bar{\nu}}. \quad (1.10)$$

Cette dernière équation est pour l'essentiel la formule du modèle classique de Bohr. Ce modèle s'applique très bien aux particules lourdes, telles que les α , ou les particules plus lourdes. La limite de ce modèle arrive avec les particules plus légères, telles que les protons; alors des effets de mécanique quantique viendront à se produire, et la formule de Bethe-Bloch ne sera plus adéquate.

1.1.2. La formule de Bethe-Bloch

Le modèle quantique fut pour la première fois dérivé par Hans Bethe en 1930, et est décrit par l'équation

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 p \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 V^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right]. \quad (1.11)$$

Cette équation est connue comme l'équation de Bethe-Bloch, et est l'expression de base utilisée pour les calculs de perte d'énergie. En pratique deux corrections sont ajoutées : la correction d'effet de densité δ , et la correction de couche C, de sorte que l'on obtienne

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 p \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 V^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right], \quad (1.12)$$

avec :

$$2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2 / \text{g},$$

r_e : rayon classique de l'électron = 2.817×10^{-13} cm,

m_e : masse de l'électron,

N_a : nombre d'Avogadro = 6.022×10^{23} mol⁻¹,

I : potentiel d'excitation moyen,

Z : nombre atomique du matériau absorbant,

A : masse atomique du matériau absorbant,

ρ : densité du matériau absorbant,

z : charge de la particule incidente, en unité de e ,

β : v/c de la particule incidente,

γ : facteur de Lorentz,

δ : correction de densité,

C : correction de couche,

W_{\max} : maximum d'énergie transférable en une seule collision.

Le maximum d'énergie se transfère par une collision frontale, soit pour une particule incidente de masse M :

$$W_{\max} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2s\sqrt{1 + \eta^2} + s^2}. \quad (1.13)$$

Avec $s = m_e/M$ et $\eta = \beta\gamma$. Si $M \gg m_e$, alors nous obtenons :

$$W_{\max} \approx 2m_e c^2 \eta^2. \quad (1.14)$$

Le potentiel d'excitation moyen I est le paramètre principal de l'équation de Bethe-Bloch, et est essentiellement la fréquence orbitale moyenne $\bar{\nu}$ utilisée dans le modèle de Bohr multipliée à la constante de Planck : $h\bar{\nu}$. En pratique, cette quantité est difficile à évaluer en raison des forces d'oscillation qui sont inconnues pour la plupart des matériaux. Cependant, ce paramètre a pu être évalué de façon expérimentale par les mesures de dE/dx . Une équation semi-empirique est donc utilisable :

$$\begin{aligned} \frac{I}{Z} &= 12 + \frac{7}{Z} & [eV] \quad Z < 13 \\ \frac{I}{Z} &= 9.76 + 58.8Z^{-1.19} & [eV] \quad Z \geq 13 \end{aligned} \quad (1.15)$$

Le paramètre I varie de façon beaucoup plus compliquée avec Z , cependant ces approximations demeurent acceptables. On peut trouver des listes plus complètes dans la littérature [4-5].

Les termes de corrections δ et C deviennent importants respectivement aux hautes et basses énergies.

La correction d'effet de densité δ vient du fait que le champ électrique de la particule peut tendre à polariser les atomes présents le long du trajet. Ainsi, en raison de cette polarisation, les électrons éloignés du trajet de la particule seront « protégés » de l'intensité totale du champ électrique. Les collisions avec ces électrons éloignés contribueront moins à la perte d'énergie de la particule que ne le prévoirait l'équation de Bethe-Bloch. Cet effet augmente avec l'énergie de la particule. L'équation 1.9 de b_{max} du modèle de Bohr montre que plus l'énergie est élevée, plus le rayon du cylindre augmente. Donc, le nombre d'électrons externes augmente, et leur contribution aussi. Le terme de « effet de densité » vient du fait que plus un matériau est dense plus cet effet sera important; un matériau dense présente plus d'électrons dans un volume donné qu'un matériau moins dense (comme un gaz).

Les valeurs de δ viennent des formules de Sternheimer [5]:

$$\delta = \begin{cases} 0 & X < X_0 \\ 4.6052X + C_0 + a(X_1 - X)^m & X_0 < X < X_1 \\ 4.6052X + C_0 & X_1 < X \end{cases}, \quad (1.16)$$

avec $X = \log_{10}(\beta\gamma)$. Les quantités X_0 , X_1 , C_0 , a et m dépendent du matériau absorbant, dont pour C_0 :

$$C_0 = - \left(2 \ln \frac{I}{h\nu_p} + 1 \right). \quad (1.17)$$

Et $h\nu_p$ est appelée la fréquence de plasma du matériau :

$$\nu_p \sqrt{\frac{N_e e^2}{\pi m_e}} = \sqrt{80.617 \times 10^6 \text{ cm}^3 N_e} \text{ [Hz]}, \quad (1.18)$$

avec $N_e = N_a \rho Z/A$ la densité d'électrons. Les autres constantes sont déterminées avec un lissage des données expérimentales sur les équations (1.16).

La correction de couche C devient importante lorsque la vitesse de la particule incidente est inférieure ou égale à la vitesse orbitale des électrons concernés. À ces énergies, l'approximation que l'électron est statique n'est plus valide pour l'équation de Bethe-Bloch. Cependant, cette correction demeure faible et répond à une équation empirique [6] pour $\eta \geq 0.1$:

$$C(I, \eta) = \left(0.422377\eta^{-2} + 0.0304043\eta^{-4} - 0.00038106\eta^{-6} \right) \times 10^{-6} I^2 + \left(3.850190\eta^{-2} - 0.1667989\eta^{-4} + 0.00157955\eta^{-6} \right) \times 10^{-9} I^3, \quad (1.19)$$

avec $\eta = \beta\gamma$.

D'autres termes de correction peuvent rentrer en considération pour compenser certains effets ultrarelativistes ($V \rightarrow c$), cinétiques, etc. mais ils sont en général négligeables, et plus particulièrement quand les particules incidentes sont des particules élémentaires.

1.1.3. Approfondissement de l'équation de Bethe-Bloch

À des énergies non relativistes, le dE/dx est dominé par le facteur $1/\beta^2$ et décroît avec l'accroissement de la vitesse de la particule jusqu'à environ $V \cong 0.96c$, où le minimum est

atteint. Les particules à cette vitesse sont dites « minimum ionisantes ». La valeur minimum de dE/dx est environ la même pour tous les types de particules de même charge. Alors que l'énergie augmente au-delà de ce point, le terme $1/\beta^2$ demeure constant et le dE/dx augmente en raison de la dépendance logarithmique de (1.12). Cette augmentation « relativiste » est corrigée par le terme de correction de densité δ .

Pour les énergies inférieures à la valeur « minimum ionisante », chaque particule montre une courbe dE/dx différente dans la plupart des cas. Cette particularité est utilisée pour identifier les particules en physique des particules, en physique nucléaire, et dans d'autres domaines.

À des énergies très faibles, de l'ordre de la vitesse orbitale des électrons, le dE/dx atteint un maximum et alors décroît très rapidement. De nombreux effets sont ici en jeu. Le plus important est que la particule va capturer l'électron pour un certain temps. Ainsi la particule voit sa charge diminuer, et donc son potentiel d'arrêt est diminué puisque la particule interagit électromagnétiquement.

Ainsi la particule va déposer son énergie progressivement dans le matériau et l'énergie déposée par unité de longueur va augmenter alors que la vitesse va diminuer. C'est à la fin du parcours que le dépôt d'énergie diminuera quand la vitesse de la particule sera suffisamment basse pour autoriser la capture des électrons. C'est aussi là que peut se produire une contamination de l'échantillon. Cette forme particulière du dépôt d'énergie en fonction de la profondeur de pénétration est entre autre utilisée en physique médicale, en radiothérapie en particulier, ainsi que le font les collègues affiliés à l'Hôtel-Dieu de Québec.

Pour les particules se propageant dans un milieu composé du même matériau, l'équation de Bethe-Bloch peut s'écrire sous la forme

$$-\frac{dE}{dx} = z^2 f(b), \quad (1.20)$$

avec $f(b)$ une fonction de la vitesse de la particule uniquement. Donc, la perte d'énergie dans un matériau donné est seulement dépendante de la charge et de la vitesse de la particule. Comme nous avons une énergie cinétique $T = (\gamma - 1)Mc^2$, la vitesse est fonction de T/M , donc le terme β est fonction de T/M , ce qui nous permet de réécrire (1.20) comme :

$$-\frac{dE}{dx} = z^2 f\left(\frac{T}{M}\right). \quad (1.21)$$

Si nous connaissons le dE/dx d'une particule de masse M_1 et de charge z_1 , alors la perte d'énergie d'une particule de masse M_2 et de charge z_2 peut être déduite des valeurs de la particule 1 en normalisant l'énergie de la particule 2 avec $T=T_2(M_1/M_2)$ et en multipliant par le ratio des charges $(z_2/z_1)^2$, ce qui donne :

$$-\frac{dE_2}{dx}(T_2) = -\frac{z_2^2}{z_1^2} \frac{dE_1}{dx}\left(T_2 \frac{M_1}{M_2}\right). \quad (1.22)$$

Quand le dE/dx est exprimé en terme d'unités de masse surfacique, il change très peu sur un grand nombre de matériaux. Cependant, si nous utilisons la dépendance du type de matériau dans l'expression de Bethe-Bloch, nous trouvons :

$$-\frac{dE}{d\varepsilon} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = z^2 \frac{Z}{A} f(\beta, I), \quad (1.23)$$

avec $d\varepsilon = \rho dx$. Le ratio Z/A ne varie pas pour des matériaux présentant des Z assez semblables, ceci est également vrai pour $I(Z)$ puisqu'il apparaît dans un logarithme. $dE/d\varepsilon$ devient en quelque sorte indépendant du type de matériau. Ainsi cette caractéristique est très utile pour les mesures dans des matériaux composés de plusieurs éléments.

Ainsi, ce que nous avons vu précédemment s'applique pour des matériaux cibles composés d'un seul élément. Cependant, les matériaux radioluminescents sont composés de plusieurs éléments. Dans ce cas, on peut utiliser la règle de Bragg pour trouver une valeur de dE/dx acceptable, en faisant une moyenne des dE/dx de chaque élément pondéré par leur nombre d'électrons, soit :

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{\omega_1}{\rho_1} \left(\frac{dE}{dx} \right)_1 + \frac{\omega_2}{\rho_2} \left(\frac{dE}{dx} \right)_2 + \dots , \quad (1.24)$$

avec ω_i la fraction massique de l'élément i . C'est-à-dire, si a_i est le nombre d'atomes de l'élément i de la molécule M , alors :

$$\omega_i = \frac{a_i A_i}{A_M}, \quad (1.25)$$

avec A_i la masse atomique de l'élément i , et A_M celle de la molécule.

Nous pouvons donc étendre l'équation (1.12) par les valeurs effectives suivantes :

$$Z_{eff} = \sum a_i Z_i , \quad (1.26)$$

$$A_{eff} = \sum a_i Z_i , \quad (1.27)$$

$$\ln I_{eff} = \sum \frac{a_i Z_i \ln I_i}{Z_{eff}} , \quad (1.28)$$

$$\delta_{eff} = \sum \frac{a_i Z_i \delta_i}{Z_{eff}} , \quad (1.29)$$

$$C_{eff} = \sum a_i C_i . \quad (1.30)$$

Il est donc, dans ce cas, plus approprié de travailler avec le $(1/\rho)dE/dx$ plutôt que d'utiliser le dE/dx linéaire.

1.2. Les électrons et les positrons

En raison de la faible masse des électrons et des positrons, un autre mécanisme de perte d'énergie est à considérer : l'émission de radiation électromagnétique provenant de l'interaction avec le champ électrique du noyau (bremsstrahlung). Selon le modèle classique, il s'agit d'une radiation provenant de l'accélération de la particule alors qu'elle est déviée de sa trajectoire par l'attraction électrique du noyau. Pour des énergies faibles, de l'ordre de quelques MeV, ce phénomène demeure relativement faible; cependant, à des énergies plus élevées, de quelques dizaines de MeV, la perte d'énergie par radiation est comparable, si ce n'est supérieure, à celle produite par collision et ionisation (ce qui était décrit dans la section précédente).

La perte d'énergie des électrons et des positrons se décrit donc en deux parties :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll} . \quad (1.31)$$

1.2.1. Pertes par collision

Bien que le mécanisme de base de perte par collision pour les particules lourdes chargées est toujours valide pour les électrons et les positrons, l'équation de Bethe-Bloch doit être modifiée pour deux raisons. La première est donc la faible masse entraînant que la particule est déviée. La seconde est que pour l'électron, la collision se produit entre particules de même type, il faut donc considérer leur caractère indiscernable. Ces considérations entraînent des changements de terme dans l'équation, dont l'énergie de transfert disponible qui devient :

$$W_{max} = T_e / 2 , \quad (1.32)$$

avec T_e l'énergie cinétique de la particule incidente. L'équation de Bethe-Bloch devient donc :

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{\tau^2(\tau+2)}{2 \left(\frac{I}{m_e c^2} \right)^2} + F(\tau) - \delta - 2 \frac{C}{Z} \right], \quad (1.33)$$

avec : τ l'énergie cinétique de la particule incidente en unités de $m_e c^2$,

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\tau^2 - (2r+1)\ln 2}{(\tau+1)^2}, \quad \text{pour } e^- \quad (1.34)$$

et $F(\tau) = 2 \ln 2 - \frac{\beta^2}{12} \left(23 + \frac{14}{\tau+2} + \frac{10}{(\tau+2)^2} + \frac{4}{(\tau+2)^3} \right), \quad \text{pour } e^+ \quad (1.35)$

Les autres paramètres demeurent inchangés par rapport au modèle tel que décrit dans la section 1.1.

1.2.2. Bremsstrahlung

Puisque l'émission *bremsstrahlung* dépend de la force du champ électrique ressenti par la particule, l'effet d'écran des électrons atomiques est important. La section efficace ne dépend donc plus seulement de l'énergie de l'électron incident, mais aussi des paramètres d'impact et du numéro atomique du matériau cible. Cet effet d'écran est paramétrisé par la quantité suivante :

$$\xi = \frac{100 m_e c^2 h \nu}{E_0 E Z^{1/3}}, \quad (1.36)$$

avec : E_0 : énergie initiale totale de la particule incidente,

E : énergie totale finale de la particule incidente,

$h\nu$: énergie du photon émis.

Ce paramètre est lié au rayon de l'atome selon Thomas-Fermi, il est petit ($\xi \cong 0$) pour un écran complet et est grand ($\xi \cong 1$) pour un écran nul.

Pour des énergies relativistes supérieures à quelques MeV, la section efficace du *bremsstrahlung* est donnée par l'équation :

$$d\sigma = 4Z^2 r_e^2 \alpha \frac{dv}{v} \left\{ (1 + \varepsilon^2) \left[\frac{\phi_1(\xi)}{4} - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right] - \frac{2}{3} \varepsilon \left[\frac{\phi_2(\xi)}{4} - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right] \right\}, \quad (1.37)$$

avec $\varepsilon = E/E_0$,

$\alpha = 1/137$,

$f(Z)$: correction de Coulomb,

$\phi_1(\xi)$ et $\phi_2(\xi)$: les fonctions d'écran dépendante de ξ .

Cette expression est le résultat de l'approximation de Born, elle n'est pas valide pour de faibles énergies.

Pour les éléments lourds ($Z \geq 5$), les fonctions écrans sont généralement calculées selon le modèle de Thomas-Fermi de l'atome et les valeurs sont déterminées numériquement. La formule empirique suivante donne une bonne approximation :

$$\phi_1(\xi) = 20.863 - 2 \ln \left[1 + (0.55846\xi)^2 \right] - 4 \left[1 - 0.6e^{-0.9\xi} - 0.4e^{-1.5\xi} \right], \quad (1.38)$$

$$\phi_2(\xi) = \phi_1(\xi) - \frac{2}{3} (1 + 6.5\xi + 6\xi^2)^{-1}, \quad (1.39)$$

avec :

$$\phi_1(0) = \phi_2(0) + \frac{2}{3} = 4 \ln 183 \quad \text{pour } \xi \rightarrow 0, \quad (1.40)$$

$$\phi_1(\infty) = \phi_2(\infty) \rightarrow 19.19 - 4 \ln \xi \quad \text{pour } \xi \rightarrow \infty. \quad (1.41)$$

La fonction $f(Z)$ est une petite correction à l'approximation de Born qui considère l'interaction coulombienne de l'électron émis dans le champ électrique du noyau. La formule suivante est utilisée [7] :

$$f(Z) \approx a^2 \left[(1 + a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369a^2 + 0.0083a^4 - 0.002a^6 \right], \quad (1.42)$$

avec $a=Z/137$.

Nous pouvons donc réécrire l'équation (1.37) pour les cas limites :

Pour $\xi \gg 1$ (pas d'écran) :

$$d\sigma = 4Z^2 r_e^2 \alpha \frac{dv}{v} \left(1 + \varepsilon^2 - \frac{2\varepsilon}{3} \right) \left[\ln \frac{2E_0 E}{m_e c^2 h v} - \frac{1}{2} - f(Z) \right], \quad (1.43)$$

et pour $\xi = 0$ (écran total) :

$$d\sigma = 4Z^2 r_e^2 \alpha \frac{dv}{v} \left\{ \left(1 + \varepsilon^2 - \frac{2\varepsilon}{3} \right) \left[\ln \left(183Z^{-1/3} \right) - f(Z) \right] + \frac{\varepsilon}{9} \right\}. \quad (1.44)$$

Ainsi la perte d'énergie due au rayonnement bremsstrahlung peut maintenant être calculée en intégrant la section efficace multipliée par l'énergie du photon sur l'énergie disponible, soit :

$$-\left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad} = N \int_0^{v_0} h v \frac{d\sigma}{dv} (E_0, v) dv, \quad (1.45)$$

avec N : le nombre d'atomes par cm^3 , $N = \rho N_A / A$, $v_0 = E_0 / h$. Donc :

$$-\left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad} = N E_0 \phi_{rad}, \quad (1.46)$$

avec : $\phi_{rad} = \frac{1}{E_0} \int h v \frac{d\sigma}{dv} (E_0, v) dv$.

Si $d\sigma/dv$ est approximativement proportionnelle à v^{-1} , l'intégrale ϕ_{rad} est alors presque indépendante de v et est donc fonction du matériau uniquement.

Pour $m_e c^2 \ll E_0 \ll 137 m_e c^2 Z^{-1/3}$ et $\xi \gg 1$, l'intégrale devient :

$$\phi_{rad} = 4Z^2 r_e^2 \alpha \left(\ln \frac{2E_0}{m_e c^2} - \frac{1}{3} - f(Z) \right). \quad (1.47)$$

Pour $E_0 \gg 137m_e c^2 Z^{-1/3}$ et $\xi=0$:

$$\phi_{rad} = 4Z^2 r_e^2 \alpha \left[\ln \left(183Z^{-1/3} \right) + \frac{1}{18} - f(Z) \right]. \quad (1.48)$$

Il est intéressant de comparer l'équation (1.46) avec l'équation de perte d'énergie par ionisation (1.33). Les pertes par ionisation varient de façon logarithmique avec l'énergie et linéairement avec Z , les pertes par rayonnement augmentent linéairement avec l'énergie et quadratiquement avec Z . Ces dépendances expliquent l'augmentation rapide des pertes d'énergie par rayonnement.

Aussi, si les pertes par ionisation sont presque continues sur le parcours de la particule incidente, les pertes par rayonnement peuvent être dues par l'émission d'un ou deux photons.

Pour finir sur le *bremsstrahlung*, on peut affirmer que les équations précédentes représentent les pertes par rayonnement dans le champ du noyau; cependant, il y a aussi une contribution due aux interactions avec les électrons atomiques. Cette contribution se traduit par les mêmes équations avec le terme Z^2 remplacé par Z . Ainsi, on peut facilement considérer cette contribution additionnelle en remplaçant les termes en Z^2 par $Z(Z+1)$ dans toutes les équations de cette sous-section.

La perte d'énergie dépend en grande partie du matériau absorbant. Ainsi, nous pouvons définir une énergie critique, E_c au-delà de laquelle les pertes par rayonnement égaleraient les pertes par collision :

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{coll} \quad \text{avec } E = E_c. \quad (1.49)$$

Au-delà de cette énergie, les pertes par rayonnement dominent sur celles par collision/ionisation. E_c est donné par l'équation suivante [8]:

$$E_c \approx \frac{800 MeV}{Z + 1.2}. \quad (1.50)$$

1.3. *L'interaction des photons*

Les photons interagissent de façon radicalement différente avec la matière en raison de l'absence de charge électrique qui rend impossible les collisions inélastiques avec les électrons atomiques. Les rayons X et γ interagissent avec la matière par les procédés suivants :

- l'effet photoélectrique;
- la diffusion Compton;
- la production de paires.

À très haute énergie des réactions nucléaires peuvent se produire, mais ceci ne concerne pas la présente thèse.

Ces réactions relèvent de deux caractéristiques fondamentales des photons :

- Les rayons X et γ pénètrent généralement plus la matière que les particules chargées, parce que les trois processus d'interaction ont une section efficace bien plus faible que celle pour les collisions inélastiques des électrons.
- Un faisceau de photons ne se dégrade pas en énergie, mais il perd en intensité. Donc, les photons qui traversent le matériau ne subissent aucune interaction, alors que les autres sont absorbés, ou déviés. L'interaction d'un faisceau photonique peut être décrite par l'équation suivante :

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1.51)$$

avec I_0 : l'intensité du faisceau incident,

x : épaisseur du matériau,

μ : coefficient d'absorption du matériau.

1.3.1. L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique implique l'absorption d'un photon par un électron atomique. Ce dernier est éjecté avec une énergie :

$$E = h\nu - E_l, \quad (1.52)$$

avec E_l l'énergie de liaison de l'électron.

Un électron libre ne peut pas absorber un photon et conserver l'impulsion, donc seul un électron atomique peut absorber le photon, le noyau absorbant alors l'impulsion résultante.

La section efficace d'absorption par effet photoélectrique sera dépendante de l'énergie du photon incident et doit correspondre aux couches correspondantes aux niveaux d'énergie des électrons atomiques (K, L, M...) [9]. Quand l'énergie du photon passe l'énergie de la couche K, la section efficace diminue drastiquement, en dessous de l'énergie d'ionisation d'un électron des couches externes. Il s'agit d'un phénomène d'excitation optique qui se produit, il en sera à nouveau question dans le chapitre 2 de la présente thèse.

La section efficace peut être évaluée par une approximation de Born :

$$\phi_{photo} = 4\alpha^2 \sqrt{2} Z^5 \phi_0 \left(\frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{7/2} \text{ par atome,} \quad (1.53)$$

avec : $\phi_0 = 8\pi r_e^2 / 3 = 6.651 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ et $\alpha = 1/137$.

Pour des énergies proches de celle de la couche K, un facteur de correction doit être considéré :

$$\phi_{photo} = \phi_0 \frac{2^7 \pi (137)^3}{Z^2} \left[\frac{\nu_k}{\nu} \right]^4 \frac{\exp(-4\xi \cot^{-1} \xi)}{1 - \exp(-2\pi\xi)} \text{ par atome,} \quad (1.54)$$

avec : $h\nu_k = (Z-0.03)^2 m_e c^2 \alpha^2 / 2$ et $\xi = \sqrt{\nu_k / (\nu - \nu_k)}$. Pour une valeur de ν proche de ν_k , nous avons $\xi \gg 1$ et l'équation (1.54) peut s'écrire comme :

$$\phi_{photo} = \frac{6.3 \times 10^{-18}}{Z^2} \left(\frac{\nu_k}{\nu} \right)^{8/3}. \quad (1.55)$$

Les équations pour les couches L et M sont beaucoup plus compliquées, le nombre d'électrons étant plus élevé. La littérature en traite cependant [10].

1.3.2. La diffusion Compton

La diffusion Compton est la diffusion des photons sur des électrons libres. Les électrons ne sont pas libres dans un matériau, mais si l'énergie du photon incident est suffisamment élevée, en comparaison de l'énergie de liaison, l'électron peut être considéré libre. Aux basses énergies, l'électron n'étant pas libre, le photon sera absorbé, et nous serons alors dans le cas de l'effet photoélectrique précédemment décrit.

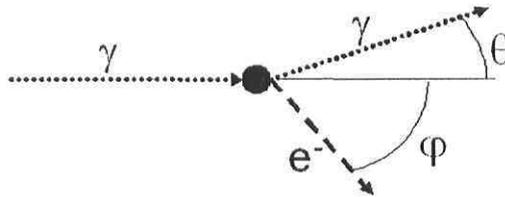


Figure 1.2 : La diffusion Compton.

En considérant la figure 1.2 et en appliquant les règles de conservation d'énergie et d'impulsion, nous obtenons :

$$\left. \begin{aligned} h\nu' &= \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \\ T = h\nu - h\nu' &= h\nu \frac{\gamma(1 - \cos \theta)}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \\ \cos \theta &= 1 - \frac{2}{(1 + \gamma^2)\tan^2 \varphi + 1} \\ \cot \varphi &= (1 + \gamma)\tan \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1.56)$$

avec $\gamma = h\nu/m_e c^2$,

$h\nu$: l'énergie du photon incident,

$h\nu'$: l'énergie du photon diffusé,

et T : l'énergie cinétique de l'électron.

En jouant avec ces dernières équations on peut trouver d'autres variables, telles que les sections efficaces et les probabilités.

L'équation de Klein-Nishina, issue de l'électrodynamique quantique, donne la section efficace de la diffusion Compton :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \gamma(1 - \cos\theta)]^2} \left(1 + \cos^2\theta + \frac{\gamma^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \right), \quad (1.57)$$

avec r_e le rayon classique de l'électron. En intégrant sur $d\Omega$ on obtient la probabilité par électron qu'une diffusion Compton se produise :

$$\sigma_C = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1 + \gamma}{\gamma^2} \left[\frac{2(1 + \gamma)}{1 + 2\gamma} - \frac{1}{\gamma} \ln(1 + 2\gamma) \right] + \frac{1}{2\gamma} \ln(1 + 2\gamma) - \frac{1 + 3\gamma}{(1 + 2\gamma)^2} \right\}. \quad (1.58)$$

Deux quantités utiles peuvent être déterminées par l'équation de Klein-Nishina (1.57) : les sections efficaces de Compton « diffusée » (σ^S) et de Compton « absorption » (σ^A). La section efficace de Compton diffusée (σ^S) est définie comme la fraction moyenne de l'énergie totale contenue dans le photon diffusé, alors que la section efficace d'absorption (σ^A) est l'énergie moyenne transférée à l'électron de recul. Comme l'électron est arrêté par le matériau il s'agit de la fraction d'énergie moyenne absorbée par le matériau lors de la diffusion Compton. La somme doit donc être égale à σ_C .

$$\sigma_C = \sigma^S + \sigma^A, \quad (1.59)$$

$$\sigma^S = \pi r_e^2 \left[\frac{1}{\gamma^3} \ln(1 + 2\gamma) + \frac{2(1 + \gamma)(2\gamma^2 - 2\gamma - 1)}{\gamma^2(1 + 2\gamma)^2} + \frac{8\gamma^2}{3(1 + 2\gamma)^3} \right], \quad (1.60)$$

(1.60) venant de l'évaluation de :

$$\frac{d\sigma^S}{d\Omega} = \frac{h\nu'}{h\nu} \frac{d\sigma}{d\Omega}. \quad (1.61)$$

1.3.3. La production de paires

La production de paires n'est pas un processus impliqué dans cette thèse. Cependant, bien que peu probable aux énergies utilisées il demeure important à décrire.

Dans ce processus, un photon est transformé en une paire d'électron/positron. Afin de conserver l'impulsion, cela se produit à proximité d'une particule tierce, soit généralement un noyau. Pour produire une paire, le photon doit avoir une énergie minimale de 1,022 MeV.

Comme pour le bremsstrahlung, l'écran des électrons atomiques joue un rôle important. Les sections efficaces sont donc dépendantes du paramètre ξ :

$$\xi = \frac{100m_e c^2 h\nu}{E_+ E_- Z^{1/3}}, \quad (1.62)$$

avec : E_+ : l'énergie du positron,
 E_- : l'énergie de l'électron,
 Z : le numéro atomique du noyau,
 $h\nu$: l'énergie du photon incident.

À des énergies relativistes, et pour un écran arbitraire, l'équation suivante découle d'une approximation de Born :

$$d\tau = 4Z^2 r_e^2 \alpha \frac{dE_+}{(h\nu)^3} \left\{ (E_+^2 + E_-^2) \left[\frac{\phi_1(\xi)}{4} - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right] + \frac{2}{3} E_+ E_- \left[\frac{\phi_2(\xi)}{4} - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right] \right\}, \quad (1.63)$$

avec ϕ_1 et ϕ_2 les fonctions écrans définies en (1.38) et (1.39). Encore une fois, cette équation se simplifie aux limites.

Pour $\xi \gg 1$:

$$d\tau = 4Z^2 \alpha_e^2 dE_+ \frac{E_+^2 + E_-^2 + 2E_+E_-/3}{(h\nu^3)} \left[\ln \frac{2E_+E_-}{h\nu m_e c^2} - \frac{1}{2} - f(Z) \right], \quad (1.64)$$

et pour $\xi \rightarrow 0$:

$$d\tau = 4Z^2 \alpha_e^2 \frac{dE_+}{(h\nu^3)} \left\{ \left(E_+^2 + E_-^2 + \frac{2E_+E_-}{3} \right) \left[\ln(183Z^{1/3}) - f(Z) \right] - \frac{E_+E_-}{9} \right\}. \quad (1.65)$$

De ces expressions, on peut déduire les sections efficaces de production de paires. En absence d'écran, avec $m_e c^2 \ll h\nu \ll 137m_e c^2 Z^{-1/3}$, on obtient :

$$\tau_{pair} = 4Z^2 \alpha_e^2 \left[\frac{7}{9} \left(\ln \frac{2h\nu}{m_e c^2} - f(Z) \right) - \frac{109}{54} \right], \quad (1.66)$$

et pour un écran total, avec $h\nu \gg 137m_e c^2 Z^{-1/3}$:

$$\tau_{pair} = 4Z^2 \alpha_e^2 \left\{ \frac{7}{9} \left[\ln(183Z^{-1/3}) - f(Z) \right] - \frac{1}{54} \right\}. \quad (1.67)$$

Comme dans le cas du Bremsstrahlung, la production de paire peut se faire au voisinage d'un électron atomique; on peut donc remplacer le terme en Z^2 des équations précédentes par un terme en $Z(Z+1)$.

1.4. Références

1. W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment*, 2^{ème} édition (Springer-Verlag, Berlin, 1994).
2. K. S. Krane, *Introductory Nuclear Physics* (Wiley, New-York, 1988).
3. R. Eisberg et R. Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles* (Wiley, New-York, 1985).
4. R.M. Sternheimer, S.M. Seltzer et M.J. Berger, Phys. Rev. **B26**, 6067 (1982); erratum **B27**, 6971 (1983).

5. R.M. Sternheimer, S.M. Seltzer et M.J. Berger, *Atom. Data Nucl. Data* **30**, 262 (1984).
6. W.H. Barkas *et al.*, "Tables of Energy Losses and Ranges of Heavy Charged Particles" dans "*Studies in the Penetration of Charged Particles in Matter*", National Academy of Sciences Publication 1133, Nucl. Sc. Series Report **39** (1964).
7. H. Davies, H. A. Bethe, et L. C. Maximon, *Phys. Rev.* **93**, 788 (1954).
8. *Review of Particle Properties* dans *Phys. Rev.* **D45**, partie II (1992).
9. W. Bambynek, B. Crasemann, R.W. Fink, H.-U. Freund, H. Mark, C.D. Swift, R.E. Price, et P. Venugopala Rao, *Rev. Mod. Phys.* **44**, 716 (1972).
10. C.M. Davisson, *Interaction of Gamma Radiation with Matter* dans *Alpha- Beta- and Gamma ray Spectroscopy*, (ed. K. Siegbahn, North-Holland, Amsterdam, 1968).

Chapitre 2 : Émission de lumière

2.1. La scintillation (radioluminescence)

Les matériaux scintillants sont des matériaux émettant de la lumière par radioluminescence, c'est-à-dire que les radiations ionisantes incidentes provoquent certains phénomènes physiques responsables d'une production photonique. Il existe deux théories acceptées pour décrire ces phénomènes. La première concerne les scintillateurs organiques et la deuxième les scintillateurs inorganiques.

Le tableau 2.1 [1] et les figures 2.1 à 2.4 [2-5] montrent quelques exemples de scintillateurs utilisés pour la détection de divers types de particules.

Scintillateur	Type	Indice de réfraction	Longueur d'onde d'émission au maximum de la distribution (nm)	Détections
NE 102A	Plastique	1.581	423	γ , α , β , n rapides
NE 213	Liquide	1.508	425	n rapides
NE 221	Gel	1.442	425	α , β
NE 912,913	Verre	1.55	397	β , n
Anthracène	Cristal	1.62	447	γ , α , β , n rapides
CaF ₂ (Eu)	Cristal	1.443	435	β , X

Tableau 2.1 : Quelques exemples de scintillateurs.

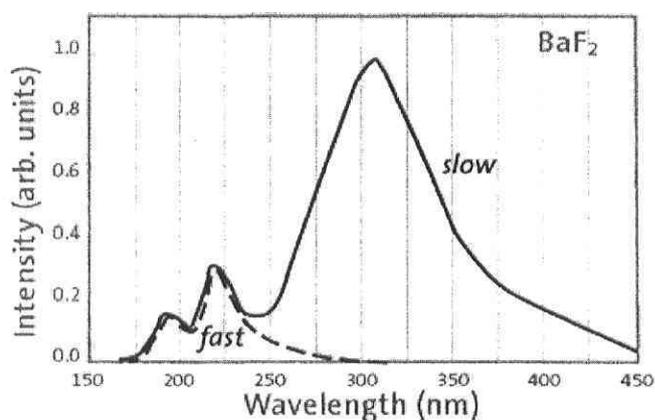


Figure 2.1 : Spectre d'émission du BaF₂.

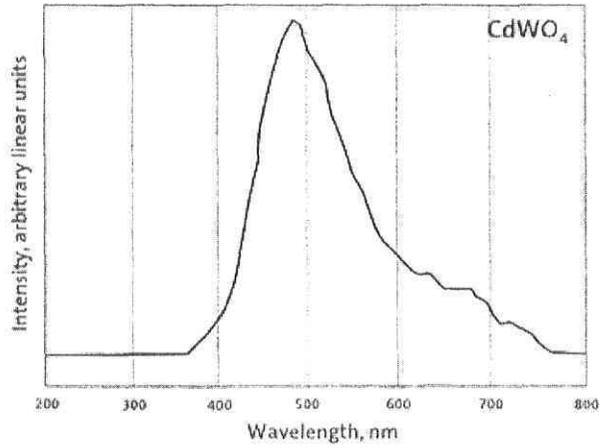


Figure 2.2 : Spectre d'émission du CdWO_4 .

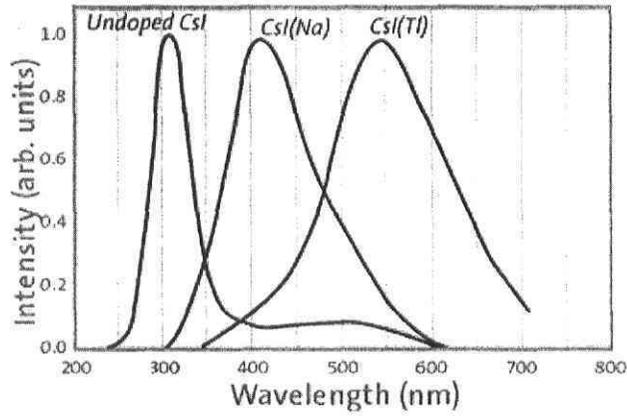


Figure 2.3 : Spectre d'émission du CsI non-dopé, dopé de Na, et dopé de Tl.

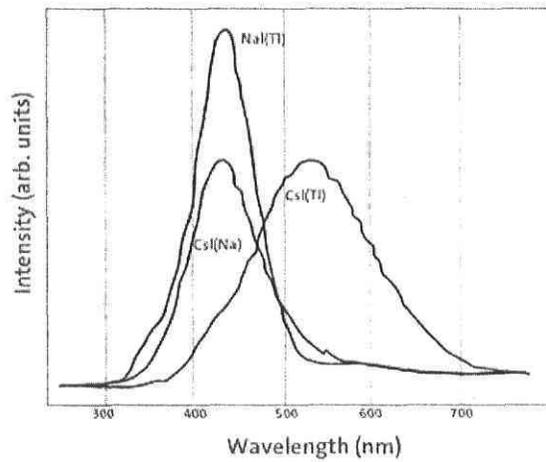


Figure 2.4 : Spectre d'émission du NaI(Tl) , comparé au CsI(Na) et au CsI(Tl) .

2.1.1. Les scintillateurs organiques

La lumière de scintillation dans ces matériaux est produite par des transitions d'électrons libres de valence des molécules. Ces électrons délocalisés ne sont pas associés à un atome particulier de la molécule et ils occupent les orbitales dites moléculaires- π . Comme illustré sur la figure 2.1, l'état fondamental est l'état singulet S_0 . Au-delà de ce niveau se trouvent les états excités singulets S^* , S^{**} , etc. et les niveaux de l'état triplet T_0 et ses niveaux excités T^* , T^{**} , etc. À ces niveaux est associée une structure fine correspondant aux modes vibrationnels d'excitation de la molécule. L'énergie séparant les niveaux est de l'ordre de quelques eV, alors que l'énergie entre ces niveaux vibrationnels est de l'ordre de quelques dixièmes de eV [1, 6].

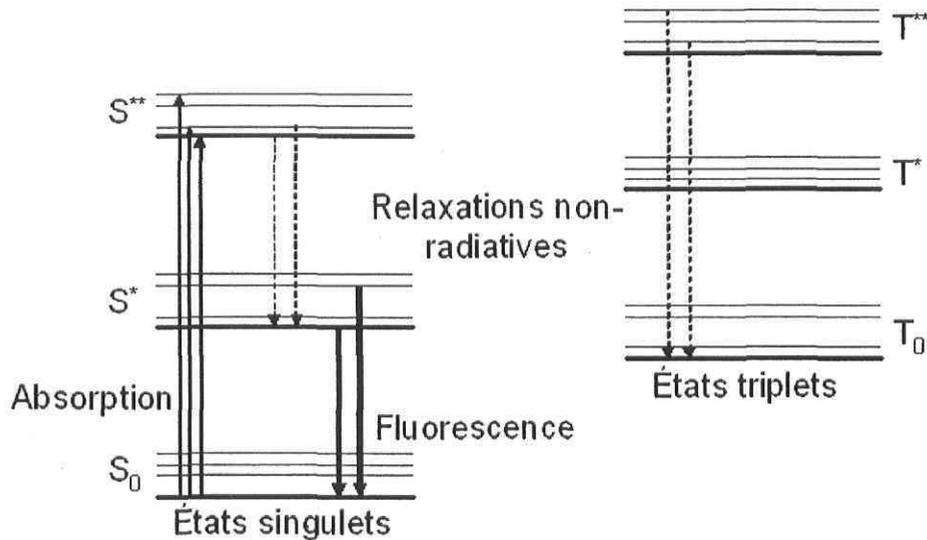


Figure 2.5 : Diagramme des niveaux d'énergie d'un scintillateur organique.

L'énergie ionisante incidente excite les électrons et les niveaux vibrationnels. Les électrons des niveaux S^{**} relaxent très rapidement vers le niveau S^* de façon non radiative, dans ce cas l'énergie est dissipée par la création de phonons. La relaxation des niveaux S^* vers le niveau S_0 est radiative.

De plus, comme cette dernière relaxation se fait vers les sous niveaux vibrationnels de S_0 la largeur spectrale de l'émission sera large. Aussi, comme l'excitation se fait à partir du niveau fondamental, le matériau sera transparent à son spectre d'émission.

Les niveaux triplets subiront eux aussi des relaxations non radiatives. Par contre, la transition $T_0 \rightarrow S_0$ est interdite par les règles de sélection multipolaire, c'est pourquoi la molécule relaxera au niveau fondamentale S^0 via l'équation suivante : $T_0 + T_0 \rightarrow S^* + S^0 + \text{phonons}$. Ici, les phonons transportent l'énergie résiduelle.

La relaxation du niveau S^* se fera alors comme décrite précédemment. Les transitions des niveaux triplets sont plus longues, c'est ce qui amène une discrimination entre composantes lente et rapide de la scintillation.

De par cette nature moléculaire de la luminescence, ces matériaux organiques peuvent être utilisés sous différentes formes : cristaux purs, mélanges, solutions liquides, etc.

2.1.2. Les scintillateurs inorganiques

Alors que le processus d'émission de lumière des matériaux organiques est moléculaire, celui associé aux matériaux inorganiques est caractérisé par les bandes électroniques propres aux cristaux (cf. figure 2.2).

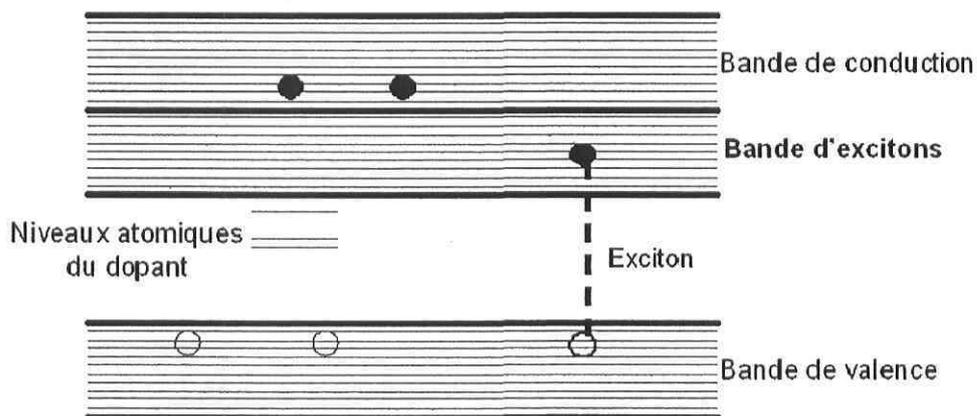


Figure 2.6 : Structure électronique d'un cristal inorganique.

Quand la particule ionisante entre dans le cristal, deux processus peuvent se produire. La particule peut ioniser le cristal en excitant un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi un électron libre et un trou libre. Elle peut aussi créer un exciton en excitant un électron de la bande de valence vers la bande d'excitons, située en dessous de la bande de conduction. Dans ce cas, l'électron et le trou reste liés comme une paire. Cependant cette paire peut se propager dans le cristal [1, 6-7].

Si le cristal est dopé, les atomes dopant peuvent introduire des niveaux d'énergie atomiques dans la bande interdite – entre les bandes d'excitons et de valence. Ainsi, un exciton se propageant dans le cristal qui rencontrerait l'impureté peut relaxer en ionisant l'atome d'impureté. L'impureté ainsi ionisée peut capturer un autre électron et se désexciter par les processus habituels. Si une transition est radiative, alors un photon sera émis, sinon l'exciton est perdu et l'impureté formera une sorte de piège.

2.2. La fluorescence des matériaux dopés de lanthanides

2.2.1. Généralités sur les lanthanides

Les lanthanides sont les éléments de l'avant-dernière ligne du tableau périodique des éléments, soit de la charge $Z = 57$ à $Z = 71$. On peut les résumer selon le tableau 2.3.

Z	Élément	Symbole	Configuration	Configuration de l'ion trivalent
57	Lanthane	La	$4f^0 5d 6s^2$	$4f^0$
58	Cérium	Ce	$4f^1 6s^2$	$4f^1$
59	Praséodyme	Pr	$4f^3 6s^2$	$4f^2$
60	Néodyme	Nd	$4f^4 6s^2$	$4f^3$
61	Prométhium	Pm	$4f^5 6s^2$	$4f^4$
62	Samarium	Sm	$4f^6 6s^2$	$4f^5$
63	Europium	Eu	$4f^7 6s^2$	$4f^6$
64	Gadolinium	Gd	$4f^7 5d 6s^2$	$4f^7$
65	Terbium	Tb	$4f^9 6s^2$	$4f^8$
66	Dysprosium	Dy	$4f^{10} 6s^2$	$4f^9$
67	Holmium	Ho	$4f^{11} 6s^2$	$4f^{10}$
68	Erbium	Er	$4f^{12} 6s^2$	$4f^{11}$
69	Thulium	Tm	$4f^{13} 6s^2$	$4f^{12}$
70	Ytterbium	Yb	$4f^{14} 6s^2$	$4f^{13}$
71	Lutétiun	Lu	$4f^{14} 5d 6s^2$	$4f^{14}$

Tableau 2.2 : Configurations électroniques des lanthanides.

On constate sur ce tableau que les couches $5d$ et $6s$ se remplissent alors que la couche $4f$ n'est pas encore pleine. Cette inversion des niveaux fait que ces éléments ne peuvent pas conserver les électrons externes et se trouvent à l'état trivalent. Aussi, cela a une conséquence très intéressante, puisque l'ion dans un milieu agit comme un ion libre et est très peu affecté par les atomes du matériau hôte. Cette « indépendance » des ions trivalents de lanthanides est grandement utilisée en physique optique – surtout pour des systèmes d'amplification/laser. En effet, les propriétés électroniques des lanthanides permettent une forte fluorescence. Celle-ci est décrite par la théorie de Judd-Ofelt.

2.2.2. Les matériaux dopés de lanthanides

Nous connaissons bien le comportement en énergie des ions libres [8]. Les niveaux d'énergie seront dégénérés :

- 1) par l'interaction électrostatique (coulombienne) qui provoquera une dégénérescence par le *moment angulaire de spin total* (S), et une autre par le *moment angulaire orbitale total* (L),
- 2) Le couplage spin-orbite $J = L+S$ de l'électron conduira à une dégénérescence des niveaux d'énergie de $2J+1$.

Cependant, puisque nous travaillons avec des matériaux dopés, un potentiel supplémentaire relié à la structure même du matériau doit être considéré. Par exemple, si nous considérons un cristal parfait, en plus des interactions 1 et 2, nous aurons à considérer une dégénérescence en d'autres niveaux sous-jacents, appelés niveaux Stark. Le nombre de ces niveaux dépend typiquement des propriétés symétriques du cristal et de la valeur du moment angulaire J . Le cristal, en brisant la symétrie initiale, permettra que des transitions dipolaires électriques aient lieu entre les différents niveaux de Stark de LSJ différents. Ce qui est à retenir pour les cristaux, c'est que tous les ions sont soumis aux mêmes contraintes et ont tous les mêmes niveaux d'énergie. Un dernier phénomène important à considérer pour le cas des matériaux dopés est celui des transitions non radiatives. L'interaction entre les ions et le réseau vibratoire cristallin fait en sorte que

des transitions phononiques peuvent survenir entre les niveaux Stark. Ainsi, avant la transition normalement radiative, plusieurs transitions non radiatives peuvent se produire.

Dans le cas des verres, il y a bien sûr une différence. La structure aléatoire des verres fait en sorte que chaque ion, ayant une vision différente de son environnement électrique, va avoir une configuration différente pour les niveaux Stark. Mentionnons quelques caractéristiques de cette structure aléatoire :

- 1) séparations non homogènes entre les raies dues aux transitions radiatives;
- 2) chaque site ionique ayant des sections efficaces d'absorption différentes, certains groupes d'ions vont être plus excités;
- 3) les courbes de gain et de fluorescence vont dépendre de la longueur d'onde d'excitation;
- 4) la décroissance de l'intensité de la fluorescence après un court pulse ne va pas être purement exponentielle puisque le taux de décroissance va être différent pour chaque site.

Par contre, certaines expériences ont démontré que les courbes de gain obtenues étaient en accord avec celles prévues pour une séparation de raies homogènes. En fait, les verres ont un comportement quasi homogène, c'est-à-dire qu'entre deux niveaux LSJ , il y a superposition d'un grand nombre de niveaux Stark, ce qui forme un quasi continuum homogène. En première approximation, on peut donc affirmer que chaque site ionique est excité de la même façon. Nous pouvons donc faire la même analyse que pour les cristaux parfaits. Par contre, la théorie des perturbations et des champs cristallins utilisée habituellement nous renseigne sur la position des niveaux d'énergie mais non sur les transitions elles-mêmes. Ce sont par ailleurs ces mêmes transitions – dipolaires électriques – qui doivent nous fournir les paramètres importants pour la caractérisation des lasers par exemple. C'est ici que la théorie de Judd-Ofelt entre en ligne de compte.

2.2.3. La théorie de Judd-Ofelt

La théorie de Judd-Ofelt décrit les interactions entre les ions trivalents de terres rares entre eux et avec la matrice hôte. Ces interactions peuvent être radiatives. Cette théorie fut développée par Judd [9] et Ofelt [10] en 1962, depuis la littérature sur le sujet est très abondante [9-25]. Les transitions observées dans les ions trivalents de terres rares sont principalement dipolaires électriques; on peut éventuellement observer des transitions dipolaires magnétiques, mais ces contributions sont de façon générale négligeables, c'est pourquoi je ne traiterai pas de ces dernières dans cette thèse. Il est à noter tout de même que certains chercheurs, tel le professeur Inoue [13-25], font des simulations numériques d'une remarquable précision en considérant tous les processus.

La théorie de Judd-Ofelt est une théorie quantique de type semi-empirique qui évalue la force des transitions dipolaires électriques entre les paires de niveaux LSJ pour des milieux dopés de terres rares. Le principe est d'utiliser l'intensité des raies de toutes les transitions observables du niveau fondamental aux niveaux excités (mesurable avec l'absorption de la lumière blanche par exemple) et en utilisant ces intensités, on évalue les différentes paires de niveaux excités LSJ .

Sans entrer dans les détails mathématiques, mais supposant une certaine connaissance de la théorie quantique, on peut débiter la compréhension de la théorie de Judd-Ofelt en disant que les probabilités d'émission radiative, correspondant aux transitions dipolaires électriques, peuvent être calculées en prenant l'élément de matrice de l'opérateur Hamiltonien de l'interaction ions - cristal entre l'état atomique initial LSJ et l'état atomique final $L'S'J'$.

Mathématiquement, la force d'oscillateur associée à une transition dipolaire électrique qui prend place entre les états $|\Psi_i\rangle$ et $|\Psi_f\rangle$ correspondant aux états LSJ et $L'S'J'$ est donnée par la relation fondamentale suivante :

$$S = \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \left| \langle (S', L') J' | U^{(k)} | (S, L) J \rangle \right|^2 . \quad (2.1)$$

Les paramètres $U^{(k)}$ caractérisent de façon intrinsèque la transition considérée indépendamment de toute action du champ des ligands cristallins. Ce sont des constantes virtuellement indépendantes de l'hôte qui sont déjà tabulées pour plusieurs ions par Carnall et al. [22-25].

Il est important de rappeler que puisque nous étudions les ions trivalents de lanthanides, nous travaillons donc avec la couche 4f. Les autres couches étant remplies, elles sont donc considérées comme inertes – pour un pompage optique – et les couches externes sont vides (cf. tableau 2.1). Ainsi, les niveaux LSJ mentionnés sont tous situés sur la couche 4f.

De plus, l'équation suivante nous permet de relier l'expérience à la théorie :

$$\int_{\text{spectre}} k(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi^3 e^2 \bar{\lambda} \rho}{3ch(2J+1)n} \frac{1}{n} \left[\frac{(n^2+2)^2}{9} \right] \bullet S \quad (2.2)$$

Ici, l'intégrale est effectuée sur le spectre d'absorption désiré, et :

$\bar{\lambda}$: la longueur d'onde moyenne de ce spectre d'absorption,

ρ : la densité d'ions dans l'hôte en cm^{-3} ,

c : la vitesse de la lumière dans le vide,

h : la constante de Plack,

n : l'indice de réfraction moyen du verre,

J : le moment angulaire total du niveau initial de l'ion considéré.

Le terme entre crochets représente la correction du champ local cristallin. Il est donc normal qu'il dépende explicitement de l'indice de réfraction.

Considérons maintenant les paramètres de Judd-Ofelt (Ω_k). C'est dans ces paramètres qu'est codée l'influence du verre hôte. Ils contiennent l'information propre à l'effet du champ cristallin, aux fonctions d'onde électroniques ainsi qu'à la séparation des niveaux d'énergie. Ils sont déterminés empiriquement pour une combinaison donnée du dopant et

de l'hôte. La procédure normalement utilisée est d'effectuer une routine de moindres carrés en utilisant les équations (2.1) et (2.2) de façon à éliminer S . Ainsi, on peut déterminer les Ω_2 , Ω_4 , et Ω_6 en minimisant la somme des différences carrées entre le spectre intégré d'absorption mesuré expérimentalement et l'équation (2.1) calculée théoriquement. C'est pourquoi la théorie de Judd-Ofelt est semi-empirique. Les Ω_k sont des paramètres phénoménologiques, ils n'ont donc pas de réelle importance au point de vue physique, excepté que Ω_2 caractérise le degré de covalence.

Le tableau 2.3 donne quelques exemples de paramètres Ω_{pairs} , issus de la littérature.

Hôte	$\Omega_2(10^{-20}\text{cm}^2)$	$\Omega_4(10^{-20}\text{cm}^2)$	$\Omega_6(10^{-20}\text{cm}^2)$
Phosphate	9.92	3.74	7.36
Borate	11.36	3.66	2.24
Germanate	6.40	0.75	0.34
Tellurite	7.84	1.37	1.14
ZBLA	3.26	1.85	1.14
ZBLA	2.54	1.39	0.97
Verre fluoré	1.54	1.13	1.19
ZBLAN	2.3	0.9	1.7
LaF ₃	1.1	0.3	0.6
Y ₂ SiO ₅	2.84	1.42	0.81

Tableau 2.3 : Exemple des paramètres Ω_k de l'Er³⁺ pour différents types de verres.

Les étapes suivantes sont suivies :

- 1) On enregistre le spectre d'absorption pour un certain verre dopé dans les régions d'intérêt.
- 2) Connaissant les $U^{(k)}$ et l'équivalence (2.1) et (2.2), on détermine avec une routine de moindres carrés la valeur des paramètres Ω_k .
- 3) On connaît donc S , ce qui nous permet de déterminer tous les autres paramètres importants.

Le tableau 2.4 donne les paramètres que l'on peut obtenir à partir de S.

Probabilité d'émission spontanée	$A_{L'S'J';LSJ}$	$\frac{64\pi^2 e^2 n}{3h\bar{\lambda}^3 (2J'+1)} \left[\frac{(n^2+2)^2}{9} \right] \cdot S$
Ratio de branchement	$B_{L'S'J';LSJ}$	$\frac{A_{L'S'J';LSJ}}{\sum_{L'S'J'} A_{L'S'J';LSJ}} = \frac{A_{L'S'J';LSJ}}{A_{total}}$
Temps de vie radiatif	τ_{rad}^c	$(A_{total})^{-1}$
Efficacité quantique radiative	η_c	$\frac{\tau_f^m}{\tau_{rad}^c}$

Tableau 2.4 : Les paramètres que l'on peut obtenir à partir de S.

Le ratio de branchement est la probabilité relative d'une désexcitation spontanée pour une transition $L'S'J' \rightarrow LSJ$ et τ_f^m est le temps de vie de fluorescence mesuré expérimentalement.

Ces paramètres réussissent à caractériser les matériaux par la théorie de Judd-Ofelt.

2.2.4. Remarques complémentaires sur la théorie de Judd-Ofelt

Au fondement même de la théorie de Judd-Ofelt, nous utilisons le couplage intermédiaire pour simplifier le développement analytique. C'est en d'autres mots l'approximation de l'ion libre. Cette approximation stipule que les configurations $4f^n$ sont la combinaison linéaire des états de Russell-Saunders $|4f^n S, L\rangle$:

$$|4f^n [S, L], J\rangle = \sum_{S, L} A(S, L, J) |4f^n S, L\rangle \quad (2.3)$$

avec les coefficients A qui représentent une probabilité. Dans cette approximation, les états initial et final ont la même parité (le même J), ce qui fait que le crochet de Dirac est nul. Les seuls termes non nuls s'obtiennent en comptant les parités inverses. Pour cela, on utilise les parités impaires de la partie statique du champ de Stark. De plus, mais de

moindre importance, un mécanisme contribuant à la matrice dipolaire électrique est l'interaction des phonons du réseau qui ont la symétrie appropriée avec les états électroniques. En fait, tout dépend de notre connaissance de la symétrie du réseau cristallin en question (ou du verre). Quand on place nos ions dans un réseau où les sites cristallins ont une symétrie inverse, c'est ce dernier processus qui contribue le plus car la contribution du champ statique cristallin devient nulle. Ainsi, Judd et Ofelt, avec ces dernières suppositions, en sont venus à écrire cette équation :

$$\int k(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi^3 e^2 \rho}{3ch(2J+1)} \left[\frac{(n^2+2)}{9n} \right]_{k=2,4,6} \sum (\Omega_k + \Omega_{k'}) \times \left\langle 4f^n [S, L] J \parallel U^{(k)} \parallel 4f^n [S', L'] J' \right\rangle^2. \quad (2.4)$$

Cette équation est en fait la même, lorsque développée, que l'équation (2.2).

D'autres auteurs, au lieu d'utiliser les paramètres de Judd-Ofelt habituels Ω_k , utilisent ce que l'on appelle les paramètres d'intensité τ_k qui sont définis comme :

$$\tau_k = \left(\frac{8\pi^2 mc \chi}{3hn^2} \right) \Omega_k = \tau_{k'} + \tau_{k''} \quad (2.5)$$

= (contribution statique de l'hôte) + (contribution vibrationnelle de l'hôte)

Ici, le paramètre χ représente la correction du champ local de l'hôte mentionné plus haut, et il dépend de l'indice de réfraction.

La force de transition expérimentale S_{exp} est définie par rapport au spectre d'absorption mesuré comme :

$$S_{\text{exp}} = \frac{3hcn}{8\pi^3 e^2 \lambda} \int \frac{2J+1}{\chi} \sigma_a(\lambda) d\lambda \quad (2.6)$$

avec la variable intégrée $\sigma_a(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{\rho}$, $\alpha(\lambda)$ étant la section efficace d'absorption de la transition et ρ la densité de terres rares.

Voici quelques autres relations utiles quand on veut comparer l'aspect théorique et l'aspect expérimental :

$$\int \sigma_a(\lambda_a) d\lambda = \frac{2J'+1}{2J+1} \frac{\bar{\lambda}^4}{8\pi m^2 c} A_{S'LJ',SLJ} \quad (2.7)$$

$$\int \sigma_e(\lambda_e) d\lambda = \frac{\bar{\lambda}^4}{8\pi m^2 c} A_{S'LJ',SLJ} \quad (2.8)$$

Ceci nous donne une relation entre les sections efficaces d'absorption et d'émission :

$$\sigma_a(\lambda_a) = \frac{J'+\frac{1}{2}}{J+\frac{1}{2}} \sigma_e(\lambda_e) \quad (2.9)$$

Il est intéressant de remarquer ici que les termes au numérateur et au dénominateur sont en fait des dégénérescences g_1 et g_2 des niveaux concernés. Ainsi, on obtient une expression relative au gain des lasers!

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{\sigma_e(\lambda)}{\sigma_a(\lambda)} \quad (2.10)$$

2.3. La radioluminofluorescence (fluorescence induite par radioluminescence)

2.3.1. Hypothèse

Après ces quelques rappels théoriques, cette section va porter sur la production de lumière des matériaux scintillants dopés par des lanthanides. Ce processus pourrait s'appeler « radioluminofluorescence », car il est difficile de le considérer comme une troisième forme de scintillation. En fait, ce phénomène serait plutôt une fluorescence induite par radioluminescence (d'où le nom).

En 2002, Andrezj J. Wojtowicz publiait un article intitulé "Rare-earth-activated wide bandgap materials for scintillators" [26]. Dans cet article Wojtowicz étudiait la

radioluminescence du BaF_2 . Cette scintillation est formée de deux composantes : une rapide (dominante) à 300 nm, et une très rapide à 210 nm. L'auteur utilisait des échantillons dopés de lanthanides (Ce, Pr, Nd, Tb) ainsi qu'un échantillon témoin (non dopé) qu'il exposait à des rayons X produits par des électrons accélérés à 30 keV.

Lors de ces expériences, il observa des pics de luminescence propres aux terres rares qui sont très facilement identifiables [27], cependant il écrivait :

“In summary, the radioluminescence spectra of RE-activated BaF_2 clearly suggest that these ions open new channels of radiative deexcitation that more or less efficiently compete with radiative decay of self trapped excitons (STE). Although the positive identification of the specific mechanism of light production is still missing we can, nevertheless, exclude one of them (the STE-to-ion energy transfer) that has been pointed out in the past as the dominant mechanism in fluorides [32]”.

2.3.2. Interactions des lanthanides dans les scintillateurs

Nous avons vu dans la première section de ce chapitre comment la lumière se forme dans les scintillateurs. De cette première section, on peut affirmer que les lanthanides ne devraient pas produire de lumière par interaction avec les molécules, dans le cas des scintillateurs organiques, puisque les terres rares agissent comme ions libres (deuxième section), et ne font donc pas partie des molécules concernées.

Dans le cas soulevé par Wojtowicz, pour les scintillateurs inorganiques la situation est plus délicate. Tout d'abord les pics d'émission sont clairement ioniques. D'autre part, contrairement au processus habituel de transfert d'énergie exciton - ion, l'exciton ne peut pas ioniser le lanthanide; en effet l'énergie d'ionisation, de par sa structure trivalente, est beaucoup trop élevée pour permettre une telle ionisation. Aussi, de par son statut d'ion libre, les interactions entre le cristal hôte et l'ion libre sont très peu probables.

Éventuellement, nous pourrions considérer le cas que l'ion de terre rare absorbe un électron, cependant dans ce cas nous n'obtiendrions pas les pics d'émission des ions trivalents, mais plutôt ceux des ions ionisés deux fois. Cela a d'ailleurs déjà été observé [33].

Il se pourrait alors, que par les processus décrit dans le chapitre 1, la particule ionisante dépose son énergie en ionisant l'ion trivalent, et que celui-ci en réabsorbant un électron se désexcite par ses processus fluorescents habituels. Là encore, il y a un problème de section efficace : les ions de terres rares sont trop peu nombreux pour justifier une émission suffisante. Des simulations numériques montreront plus loin que la présence de l'ion dans l'hôte modifie très peu les résultats obtenus pour des matériaux non dopés.

Il reste donc une autre possibilité, que je vais m'efforcer de démontrer dans les chapitres suivants :

Les particules ionisantes interagissent normalement avec le matériau hôte qui produit la radioluminescence habituelle, le spectre émis correspondant à certains pics d'absorption des ions de terres rares dopant la matrice hôte. Ces ions absorbent donc les photons émis et se retrouvent dans un état excité, la désexcitation des ions, décrit par la théorie de Judd-Ofelt, permettant la production des raies d'émissions spécifiques aux lanthanides.

Ce processus serait valable autant pour les matériaux organiques qu'inorganiques.

2.4. Références

1. W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 2^{ème} édition (Springer-Verlag, Berlin, 1994).
2. Site internet : dernière visite 14 avril 2006 : http://www.detectors.saint-gobain.com/Data/Element/Node/Category/Category_edit.asp?ele_ch_id=C0000000000000001831&Lang=US.

3. Site internet : dernière visite 14 avril 2006 : http://www.detectors.saint-gobain.com/Data/Element/Node/Category/Category_edit.asp?ele_ch_id=C0000000000000001841&Lang=US.
4. Site internet : dernière visite 14 avril 2006 : http://www.detectors.saint-gobain.com/Data/Element/Node/Category/Category_edit.asp?ele_ch_id=C0000000000000001838&Lang=US.
5. Site internet : dernière visite 14 avril 2006 : http://www.detectors.saint-gobain.com/Data/Element/Node/Category/Category_edit.asp?ele_ch_id=C0000000000000001873&Lang=US.
6. K.S. Krane, *Introductory Nuclear Physics* (Wiley, New-York, 1988).
7. H. Ibach et H. Lüth, *Solid-State Physics. An Introductory to Principles of Material Science*, 2^{ème} édition révisée (Springer, Berlin, 1996).
8. R. Eisberg et R. Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles* (Wiley, New-York, 1985).
9. B.R. Judd, *Phys. Rev.* **127**, 750 (1962).
10. G.S. Ofelt, *J. Chem. Phys.* **37**, 511 (1962).
11. K. Drisen, S. Fourier, C. Görller-Walrant et K. Binnemans, *Chem. Phys* **5**, 198 (2003).
12. K. Binnemans et C. Görller-Walrand, *J. Phys.-Condens. Mat.* **10**, L167 (1998).
13. K. Soga, H. Inoue et A. Makishima, *J. Non-Cryst. Solids* **274**, 69 (2000).
14. H. Inoue, K. Soga et A. Makishima, *J. Non-Cryst. Solids* **298**, 270 (2002).
15. K. Soga, H. Inoue, A. Makishima et S. Inoue, *Phys. Chem. Glasses* **36**, 253 (1995).
16. H. Inoue, K. Soga et A. Makishima, *J. Non-Cryst. Solids* **222**, 212 (1997).
17. M. Tsuda, K. Soga, H. Inoue, S. Inoue et A. Makishima, *J. Appl. Phys.* **85**, 29 (1999).
18. M. Tsuda, K. Soga, H. Inoue, S. Inoue et A. Makishima, *J. Appl. Phys.* **86**, 6143 (1999).
19. M. Tsuda, K. Soga, H. Inoue et A. Makishima, *J. Appl. Phys.* **88**, 1900 (2000).
20. K. Soga, H. Inoue et A. Makishima, *J. Appl. Phys.* **89**, 3730 (2001).

21. K. Soga, H. Inoue et A. Makishima, *Phys. Chem. Glasses* **42**, 328 (2001).
22. H. Inoue, K. Soga et A. Makishima, *J. Non-Cryst. Solids* **325**, 282 (2003).
23. H. Inoue, S. Osawa, K. Soga et A. Makishima, *Phys. Chem Glasses* **44**, 422 (2003).
24. H. Inoue, K. Soga et A. Makishima, *J. Non-Cryst. Solids* **306**, 17 (2002).
25. H. Inoue, K. Soga et A. Makishima, *J. Non-Cryst. Solids* **331**, 58 (2003).
26. W.T. Carnall, P.R. Fields et K. Rajnak, *J. Chem. Phys.* **49**, 4424 (1968).
27. W.T. Carnall, P.R. Fields et K. Rajnak, *J. Chem. Phys.* **49**, 4443 (1968).
28. W.T. Carnall, P.R. Fields et K. Rajnak, *J. Chem. Phys.* **49**, 4447 (1968).
29. W.T. Carnall, P.R. Fields et K. Rajnak, *J. Chem. Phys.* **49**, 4450 (1968).
30. A.J. Wojtowicz, *Nucl. Instrum. Methods A* **486**, 201 (2002).
31. *Atomic Energy Levels: The Rare-Earth Elements*, NSRDS-NBS 60.
32. R. Visser, P. Dorenbos, C.W.E. van Eijk, A. Meijerink, G. Blasse et H.W. den Hartog, *J. Phys.-Condens. Mat* **5**, 1659 (1993).
33. B. Tsuchiya, A. Morono, E.R. Hodgson, S. Nagata, K. Toh et T. Shikama, *J. lum.* **112**, 75 (2005).

Chapitre 3 : Les matériaux

3.1. Introduction

Différents matériaux sont étudiés dans cette thèse. Certains le sont uniquement pour fin de simulations numériques et d'autres sont étudiés aussi à titre expérimental. En plus des facteurs de coûts et de disponibilité habituels, certaines considérations additionnelles doivent être prises en compte.

Afin d'éviter le propagation d'exciton, le premier choix porte sur des matériaux à structure non cristalline. En effet, l'absence d'exciton devrait nous assurer que les pics d'émission associés aux lanthanides ne sont pas dus à la relaxation des excitons, ce qui nous amène à l'évidence que ces matériaux doivent être radioluminescents et dopés par des ions trivalents de terres rares. Le dernier critère porte sur le coût et la disponibilité. Ces matériaux étant spécifiques, les coûts auraient pu être particulièrement élevés.

Il y a aussi un critère de choix sur le dopant. Tous les lanthanides ne sont pas nécessairement utiles pour cette recherche, de plus l'étude d'applications potentielles passe par des raies spectrales d'émission connues. Deux ions en particulier ont été retenus: l'erbium trivalent (Er^{III}) et le néodyme trivalent (Nd^{III}). Je reviendrai dans ce chapitre sur l'usage potentiel de ces deux lanthanides en particulier.

3.2. Les verres dopés

Pour cette recherche, l'étude de deux matériaux de type verre dopé a pu être menée. Il s'agit du verre ED2 dopé d'ions trivalents de néodyme Nd³⁺ ou Nd^{III}, ainsi que d'un verre poreux, noté VP, dopé d'ions trivalents d'erbium Er³⁺ ou Er^{III}.

3.2.1. Le verre ED2 dopé de néodyme

Le verre ED2 fut particulièrement utilisé pour les lasers avant l'usage des cristaux de YAG, en particulier à l'Université Laval, dans les laboratoires de la Professeure Roberge. Ces verres peuvent être dopés d'ions trivalents de néodyme (Nd^{III}), afin d'obtenir les raies spectrales désirées. Le Nd^{III} a déjà été utilisé comme dopant pour des matériaux

scintillateur [1-3], et l'ED2 a aussi été étudié dans le cadre de la radioluminescence [4-5], ce qui nous confirme son adéquation avec le présent projet.

Les échantillons utilisés furent empruntés dans l'ancien laboratoire de Madame Roberge et la compagnie les ayant produits n'est plus active aujourd'hui. Cependant, il existe des verres phosphatés très similaires, distribués par la compagnie Kigre.

Le tableau 3.1 présente la composition du verre ED2.

Densité (g/cm ³)	Si	O	Li	Ca	Al	Nd	Totale
NdIV:ED2	0.612	1.118	0.069	0.145	0.024	0.061	2.03
ED2	0.612	1.118	0.069	0.146	0.021	NA	1.97

Tableau 3.1 : Composition des échantillons de ED2.

En absence d'échantillon témoin de verre ED2 non dopé, un échantillon a été simulé (cf. chapitre 4). C'est pourquoi la composition stœchiométrique de ce matériau est tout de même présentée.

Considérons maintenant le cas du néodyme trivalent, il répond aux données suivantes :

Néodyme trivalent / Nd³⁺ / NdIV	
Z=60	
<m>=144.24 u.m.a.	
Configuration atomique à l'état fondamental :	(1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶)4f ³ 4I _{9/2} ^o
Énergie d'ionisation :	326000 ± 3000 cm ⁻¹ 40.4 ± 0.4 eV

Tout comme l'erbium, présenté plus loin, le néodyme est très utilisé dans la technologie laser contemporaine. En fait, c'est cet ion trivalent qui est utilisé dans les lasers tels que le laser verdi à 532 nm. Il s'agit de lasers à quatre niveaux. Une pompe optique va exciter l'ion à un niveau tel que le $^4F_{5/2}$ ou le $^4F_{9/2}$, ce niveau relaxera rapidement vers le niveau $^4F_{3/2}$. Ce niveau est métastable; il est donc aisé d'y faire une inversion de population par rapport aux niveaux inférieurs. Sa relaxation vers le niveau $^4I_{11/2}$ permet une émission à 1064 nm – soit 532 nm lorsque doublée en fréquence.

Les niveaux d'énergie de cet ion sont présentés sur la figure 3.1.

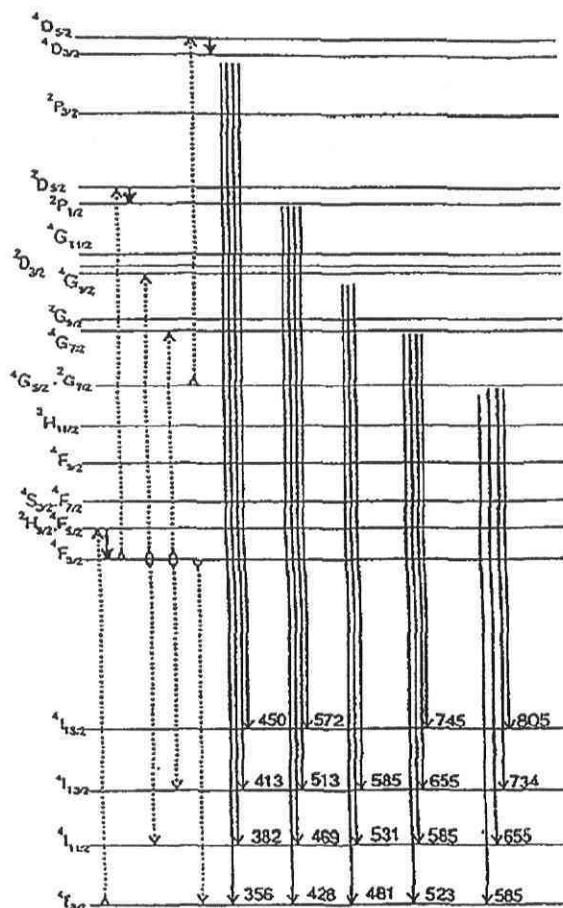


Figure 3.1 : Niveaux d'énergie du NdIV (Holgate *et al.*, J. Phys. : Condens. Matter 6, 9255 (1994)).

Sur la figure 3.2, nous pouvons observer le spectre d'absorption du verre NdIV:ED2, pris avec le spectrophotomètre du Laboratoire de caractérisation de Dr. Tigran Galstian.

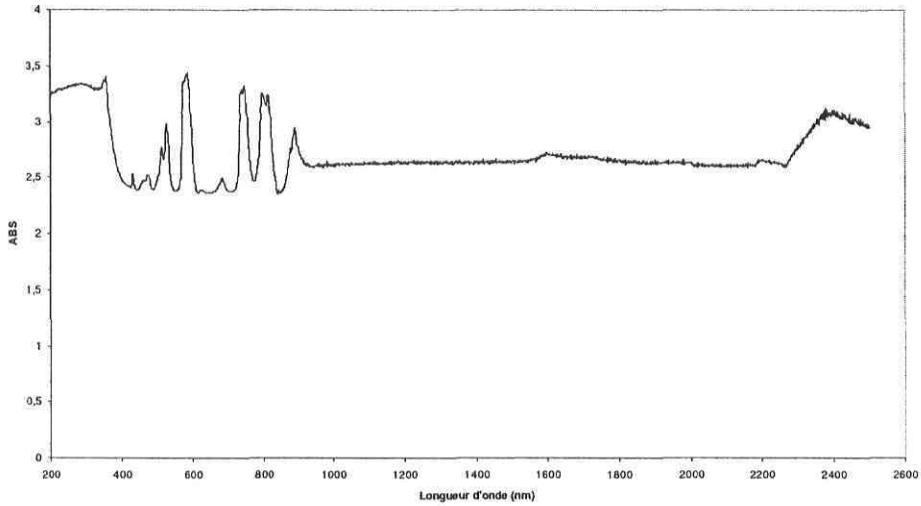


Figure 3.2 : Spectre d'absorption du NdIV:ED2.

Il n'y a pas de pics significatifs dans l'infrarouge lointain, mais cette observation est trompeuse puisque de nombreuses transitions radiatives du NdIV se situent dans l'infrarouge. Donc, les pics d'absorption du NdIV:ED2 sont principalement dans l'UV et le visible, la figure 3.3 montre ces pics plus particulièrement.

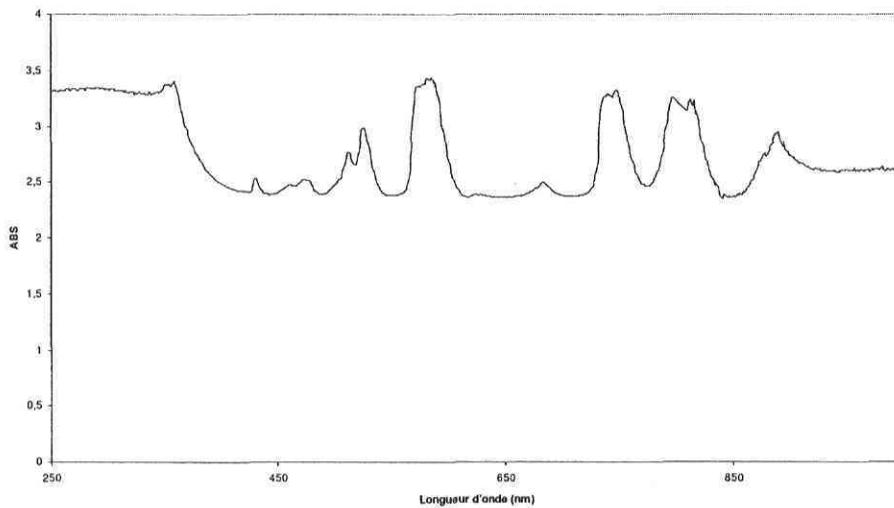


Figure 3.3 : Spectre d'absorption du NdIV:ED2 de 250 à 1000 nm

On observe sur ce spectre les différents pics d'absorption, dont une zone particulière à partir de 400 nm jusque dans l'UV où l'absorbance augmente significativement, bien qu'il demeure difficile d'identifier si cela est dû au matériau ED2 ou au dopant NdIV. Cependant, les pics entre 350 et 475 nm correspondent bien à des niveaux atomiques du néodyme, soit les niveaux ${}^2K_{15/2}$ et ${}^4G_{11/2}$ à 475 nm et ${}^2D_{5/2}$ et ${}^2P_{1/2}$ à 435 nm. Ces pics, cependant, sont importants par leur position spectrale puisqu'ils se situent dans la zone envisageable de radioluminescence, et que donc ils pourraient être adéquats pour la radioluminofluorescence.

On observe également clairement les pics à 600 nm des niveaux ${}^4G_{7/2}$ et ${}^4G_{5/2}$, à 750 nm des niveaux ${}^4S_{3/2}$ et ${}^4F_{7/2}$, à 810-820 nm des niveaux ${}^2H_{9/2}$ et ${}^4F_{5/2}$, et finalement le pic d'absorption à environ 880 nm du niveau ${}^4F_{3/2}$. Ces niveaux cependant ne seront importants que pour les raies d'émission quand les transitions seront radiatives. Pour l'excitation par radioluminescence, ils ne joueront aucun rôle.

Des spectres de transmission ont également été mesurés en exposant un échantillon à une lampe UV et à un pompage par diode laser à 808 nm et 200 mW. Le montage expérimental est présenté à la figure 3.4 et les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.5.

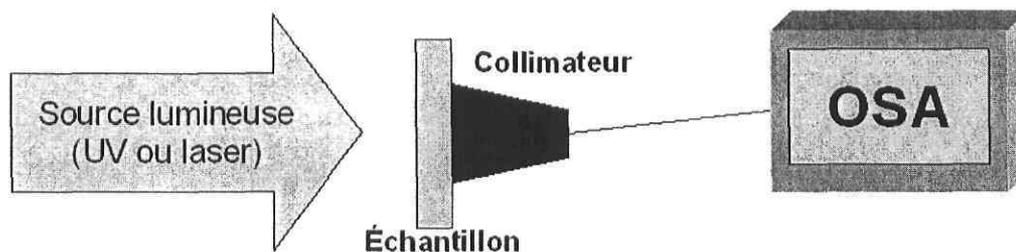


Figure 3.4 : Montage expérimental de mesure du spectre d'émission sous exposition optique.

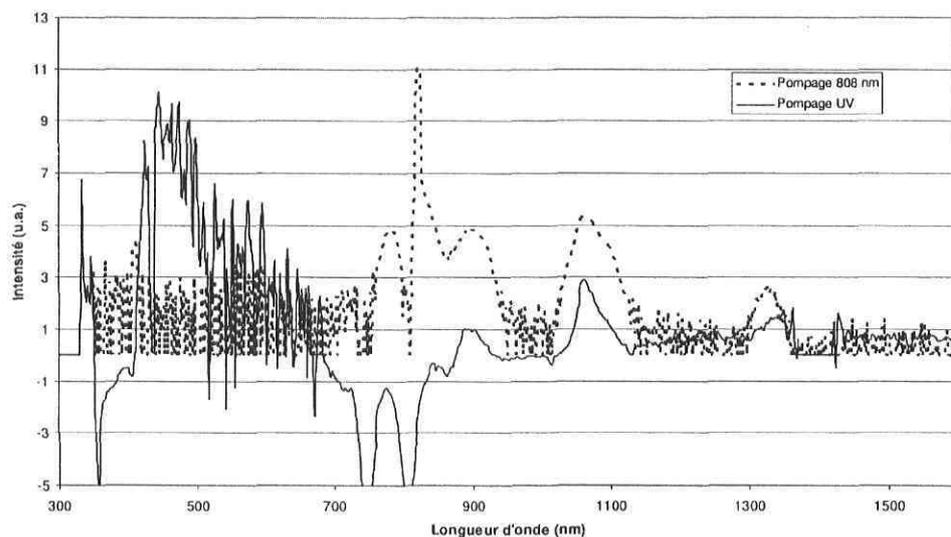


Figure 3.5 : Spectres d'émission du NdIV:ED2 exposé à la lampe UV et à une diode laser à 808 nm.

Les figures 3.6 et 3.7 présentent le spectre de la lampe UV utilisée.

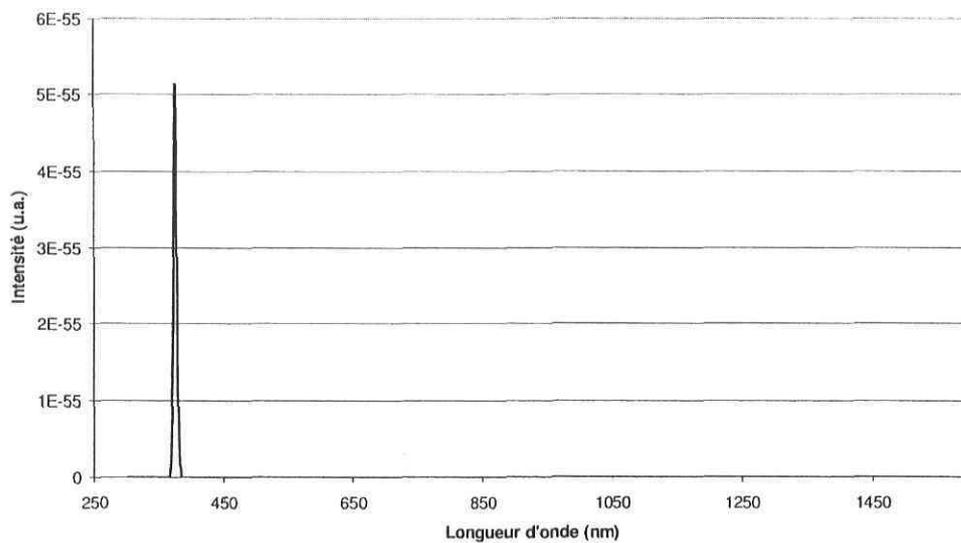


Figure 3.6 : Spectre d'émission de la lampe UV utilisée.

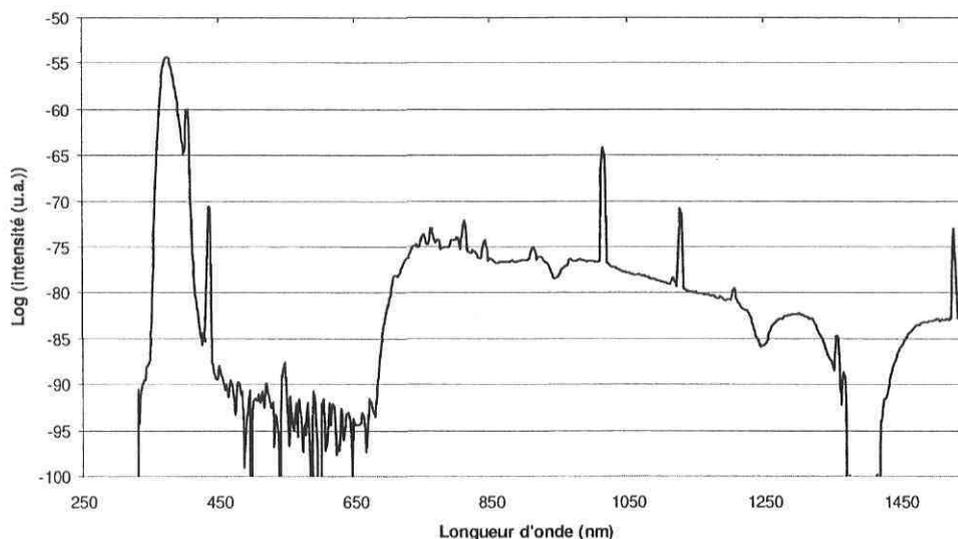


Figure 3.7 : Spectre d'émission de la lampe UV utilisée (échelle semi-logarithmique).

En ce qui concerne le pompage laser (la courbe en tirets figure 3.5), on voit clairement l'absorption des niveaux ${}^4F_{5/2}$ et ${}^2H_{9/2}$ à 808 nm. La relaxation des ions excités à ces niveaux se fait dans un premier temps de façon non radiative vers le niveau ${}^4F_{3/2}$, qui relaxe ensuite radiativement vers les niveaux ${}^4I_{13/2}$ à 1330 nm, ${}^4I_{11/2}$ à 1064 nm, et ${}^4I_{9/2}$ à 880 nm ce dernier étant le niveau fondamental.

En ce qui concerne le pompage UV, il faut tout d'abord expliquer la présence de pics d'absorption à 780 nm et à 808 nm, qui ne sont certainement pas des pics UV! En fait, ce spectre est normalisé pour retirer la pompe, ces pics sont aussi une conséquence du traitement informatique. La lampe UV émet une faible lumière dans l'infrarouge qui ne fut pas totalement éliminée par des filtres. Or les niveaux concernés ${}^4F_{5/2}$ et ${}^2H_{9/2}$ à 808 nm et ${}^4F_{7/2}$ à 780 nm absorbent énormément – c'est bien pour cela que les pompes lasers se font sur ces niveaux. La faible lumière à ces longueurs d'onde par la lampe UV est totalement absorbée par l'échantillon, et nous voyons donc de forts pics d'absorption, ce qui est le cas, mais il faut garder à l'esprit que l'intensité lumineuse de la source UV à ces longueurs d'onde infrarouges était particulièrement négligeable pour les considérations d'excitation optique, par rapport à l'intensité UV. D'ailleurs, la

conséquence du pompage UV se voit par l'apparition d'une large zone spectrale d'émission, centrée vers 400 nm et d'une largeur de presque 200 nm. Dans cette zone, nous voyons un pic d'absorption apparaître à 370 nm, soit les niveaux atomiques $^2D_{5/2}$ et $^2P_{1/2}$, précédemment mentionnés. Cette zone d'émission ne peut pas être ionique de par sa largeur spectrale, elle ne peut qu'être due à une émission originaire de l'ED2; il s'agit donc d'un phénomène moléculaire. Nous pourrions presque parler de radioluminescence, bien que le terme serait abusif en regard de l'énergie de pompage. Mais nous avons bien affaire à un phénomène similaire, les photons UV (γ très mous) interagissent avec le matériau, y déposent de l'énergie qui excite les molécules. La relaxation de celle-ci est radiative et la largeur spectrale se justifie par les niveaux vibrationnels (cf. chapitre 2).

Le pompage UV permet donc l'excitation des ions directement par les niveaux $^2D_{5/2}$ et $^2P_{1/2}$ ainsi que les relaxations radiatives $^4I_{9/2}$ à 880 nm, $^4I_{11/2}$ à 1064 nm, et $^4I_{13/2}$ à 1330 nm.

Il est important également de constater que cette zone d'émission par relaxation des molécules n'apparaît pas avec le pompage laser, celui n'affectant que les ions trivalents de néodyme NdIV. Cette zone devrait donc apparaître à nouveau lors d'un pompage par radiation ionisante.

3.2.2. Le verre poreux dopé d'erbium

Le « verre poreux » (VP) est un matériau aux propriétés très proches du ZBLAN [6], comme nous pourrions le voir dans le chapitre suivant, l'échantillon utilisé fut fourni par l'INO (l'Institut national d'optique) à Québec. Cet échantillon est également dopé d'erbium trivalent ErIV.

Le tableau 3.2 résume la composition stœchiométrique du verre poreux, ainsi que celle d'un échantillon simulé non dopé.

Densité (g/cm ³)	Si	O	B	Al	Er	Totale
ErIV:VP	0,342	0,452	0,017	0,376	0,012	1,20
VP	0,540	0,628	0,026	NA	NA	1,16

Tableau 3.2 : Compositions du verre poreux (VP) dopé d'erbium, et non dopé.

La littérature sur ce matériau est particulièrement rare et ancienne, et à ma connaissance ce matériau n'a jamais fait l'objet d'une étude sur sa radioluminescence. Nous verrons cependant dans les chapitres suivants que la radioluminescence de ce matériau est particulièrement intéressante.

Erbium trivalent / Er³⁺ / ErIV	
Z=68	
<m>=167.26 u.m.a.	
Configuration atomique à l'état fondamental :	(1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶)4f ¹¹ 4I _{15/2} ^o
Énergie d'ionisation :	34400 ± 300 cm ⁻¹ 42.7 ± 0.4 eV

Dans le cas des lasers à erbium, ou des amplificateurs, une pompe à 980 nm excite l'ion au niveau ⁴I_{11/2}, celui-ci relaxe rapidement, de façon non radiative vers le niveau ⁴I_{13/2}. Ce niveau est métastable –donc avec une demi-vie élevée– et permet d'accumuler les électrons à ce niveau excité. La relaxation vers le niveau ⁴I_{15/2} est radiative et émet un pic à environ 1550 nm. La transition ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2} se rend au niveau fondamental, c'est aussi pourquoi cette transition absorbe particulièrement.

C'est le concept de laser à trois niveaux avec cette particularité consistant à faire laser une longueur d'onde que le matériau absorbe, d'où une contrainte supplémentaire. Le niveau métastable $^4I_{13/2}$ va permettre l'inversion de population, ce qui permettra de rendre dominante l'émission stimulée sur l'émission spontanée, c'est comme cela que l'effet laser sera atteint.

La figure 3.8 représente les niveaux d'énergie de l'ion trivalent d'erbium.

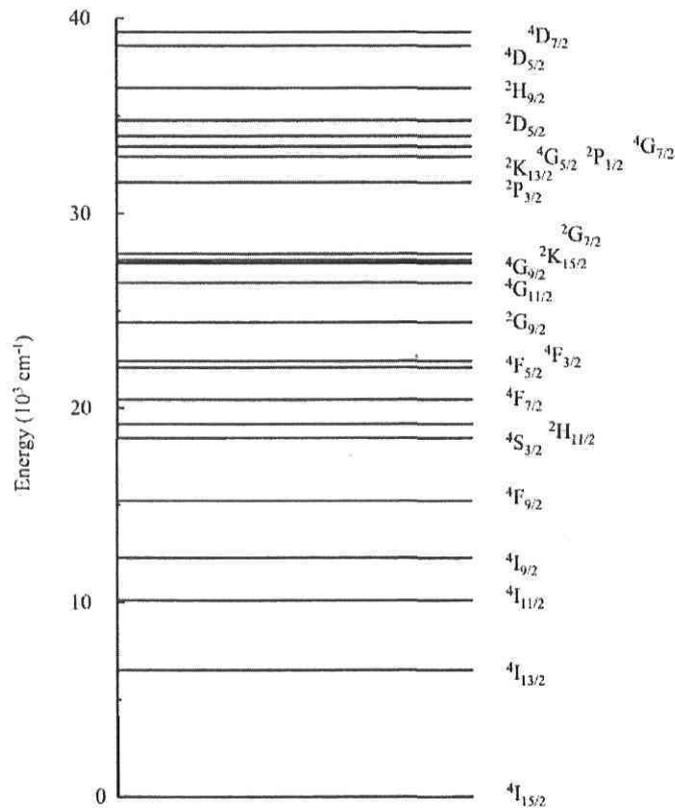


Figure 3.8 : Niveaux d'énergie de l' Er^{3+} (H. Inoue et al., *J. Non-Cryst. Solids* 298, 270–286 (2002)).

Il existe bien d'autres niveaux, qui seront utilisés dans cette thèse. Cependant, les niveaux ici représentés montrent l'essentiel de l' Er^{3+} dans ses utilisations courantes. Dans le cas des lasers, l'ion d'erbium est pompé par une source optique – généralement une diode laser à 980 nm.

La figure 3.9 montre le spectre d'absorption de l'échantillon de ErIV:VP, pris à l'aide du spectrophotomètre du laboratoire de caractérisation du COPL à l'Université Laval.

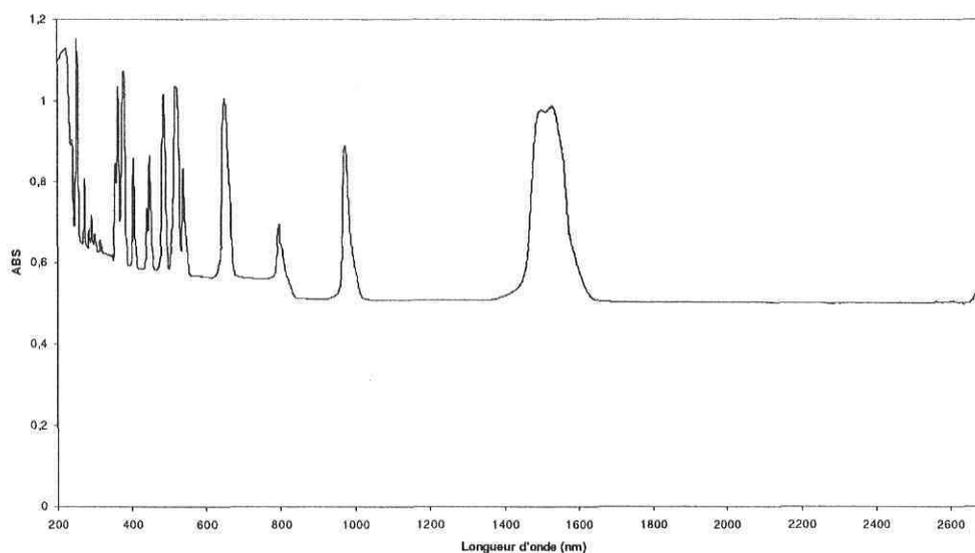


Figure 3.9 : Spectre d'absorption du ErIV:VP.

Sur ce graphique nous pouvons immédiatement identifier les pics importants de l'ErIV. Un détail spectaculaire sur ce spectre concerne le pic ${}^4I_{13/2}$ à 1550 nm. On y voit un petit creux au sommet du pic, on pourrait identifier cette forme particulière par la grande proximité de deux pics, mais ce n'est pas le cas. En fait, la lumière du spectromètre pompe les ions d'ErIV, ceux-ci relaxent par leur transition radiative en émettant donc un photon à 1550 nm qui peut être réabsorbé. La conséquence étant donc une perte relative d'absorption se traduisant par ce petit creux. On voit également un rapprochement particulier des pics d'absorption dans le bleu et l'ultraviolet. La figure 3.10 montre ces pics de plus près.

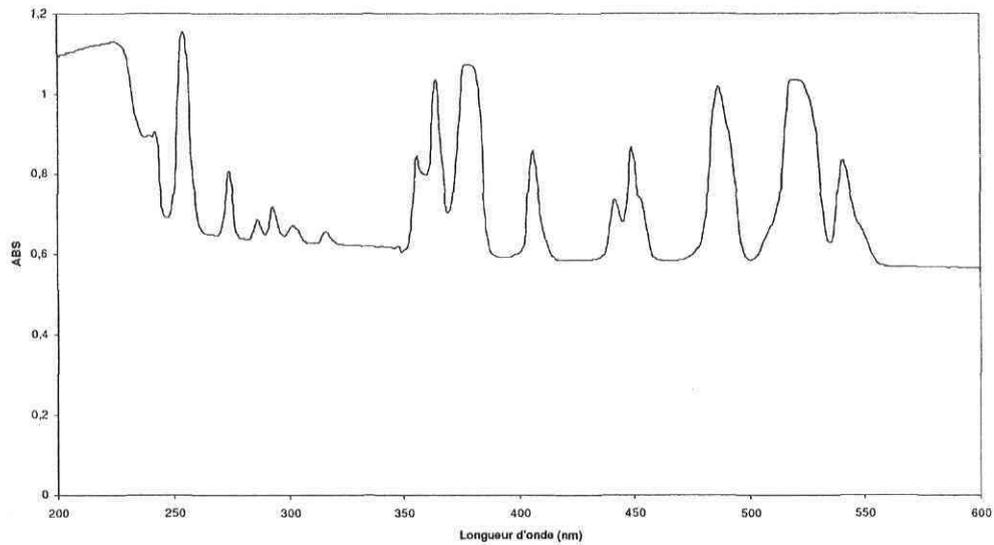


Figure 3.10 : Spectre d'absorption du ErIV:VP de 200 à 600 nm.

Ces pics seront, dans le cadre de la présente étude, particulièrement importants. En effet, comme décrit dans le chapitre précédent, la radiolumino fluorescence devrait permettre à la radioluminescence du matériau de pomper optiquement les ions de dopant. Considérons le cas de l'ErIV:ZBLAN. Son spectre d'absorption sera très similaire à celui du ErIV:VP, puisque la forme est surtout due au dopant. Nous savons par la littérature [7] que le ZBLAN émet une radioluminescence d'environ 350 à 400 nm (cf. figure 3.12). Or, comme on peut le constater sur les figures 3.9 et 3.10, dans cette zone du spectre se trouvent deux pics d'absorption importants $^4G_{11/2}$ et $^4G_{9/2}$, ces pics ayant une absorbance équivalente au pic $^4I_{13/2}$. Il ne serait donc pas illogique de penser que si le ZBLAN émet une vive radioluminescence à ces longueurs d'onde que ces photons pourront être absorbés par les ions d'ErIV, et que ces ions, en relaxant par leur processus habituel, émettront des photons dont l'énergie correspondra aux pics d'émission qu'on peut s'attendre de leur part!

Des spectres de transmission de l'ErIV:VP ont été pris par exposition UV et par exposition laser à 980 nm, et sont exposés dans la figure 3.11.

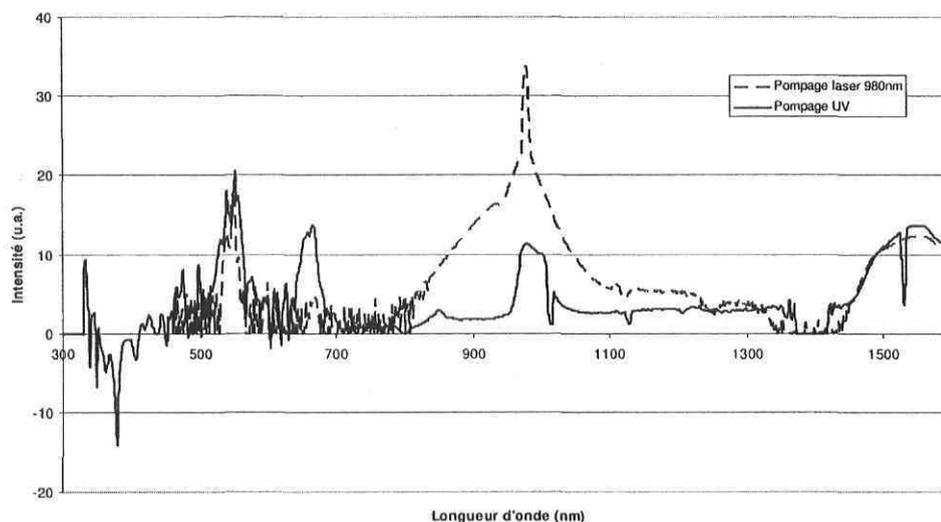


Figure 3.11 : Spectres d'émission du ErIV:VP pompé par lampe UV et par diode laser à 980 nm.

Observons tout d'abord le spectre d'émission sous pompage laser à 980 nm et 500 mW (le spectre en tirets). Nous voyons clairement le pic laser à 980 nm qui pompe le niveau $^4I_{11/2}$. Ce pompage conduit vers la transition radiative $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ à 1550 nm. Nous pouvons aussi observer la transition $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ à 550 nm, cette transition est très connue de par sa forte fluorescence, mais elle est rarement utilisée, sa courte demi-vie la rendant difficilement utilisable dans les applications lasers. Pour atteindre cette excitation en pompant à 980 nm il suffit qu'un phénomène de conversion par le haut se produise (up-conversion) c'est-à-dire que la pompe excite les ions au niveau $^4I_{11/2}$ et que ce niveau soit éventuellement surpompé vers le niveau $^4S_{3/2}$, c'est un phénomène connu [2].

Observons maintenant le spectre d'émission sous pompage UV (le spectre en continu)². La pompe UV s'étend de 300 nm à environ 450 nm. Le spectre présenté a été traité pour retirer le spectre de la pompe. Nous observons clairement qu'il y a un pompage par le

² Il est à noter aussi que le fort creux à environ 1550 nm n'est pas un effet ionique, mais juste un fantôme issu du traitement du spectre de la lampe UV. Je l'ai laissé, celui-ci consistant un bel exemple de bizarrerie se produisant parfois informatiquement. Notons aussi que le spectre sous excitation laser n'a pas été traité et que ce creux n'apparaît pas.

niveau ${}^4G_{11/2}$ et par les niveaux proches (cf. figure 3.8). On observe alors les transitions radiatives : ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, et ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$.

On constate aussi que les deux spectres ont la même hauteur relative des pics à 540 nm (${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) et à 1550 nm (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$), ceci est intéressant puisque durant les expériences avec l'accélérateur de particules nous devrions pouvoir observer visuellement la radioluminescence. En effet, si celle-ci est avérée, l'échantillon devrait émettre son pic à 540 nm.

L'absorption par le niveau ${}^4G_{11/2}$ est importante, surtout si la radioluminescence du verre poreux se situe vers 330 nm tout comme le ZBLAN, ce qui n'est qu'hypothétique, mais possible de par la similitude des deux verres. Quoiqu'il en soit, si la radioluminescence du verre poreux se situe plus dans l'ultraviolet, elle devrait toujours pouvoir pomper les ions d'ErIV grâce à l'importance du nombre de niveaux atomiques dans cette partie du spectre.

3.2. Les matériaux références

3.2.1. Le ZBLAN

Le ZBLAN³ est un verre fluoré bien connu de l'industrie photonique [8-11]. En effet, ce matériau se dope facilement avec les lanthanides, ce qui permet de l'utiliser dans la mise au point de systèmes d'amplification optiques. Cependant, à l'état non dopé le ZBLAN présente une radioluminescence [2, 7] (cf. figure 3.12).

³ ZBLAN est l'anagramme de Zr, Ba, La, Al, Na, les éléments principaux constituant ce matériau, en plus du fluor F.

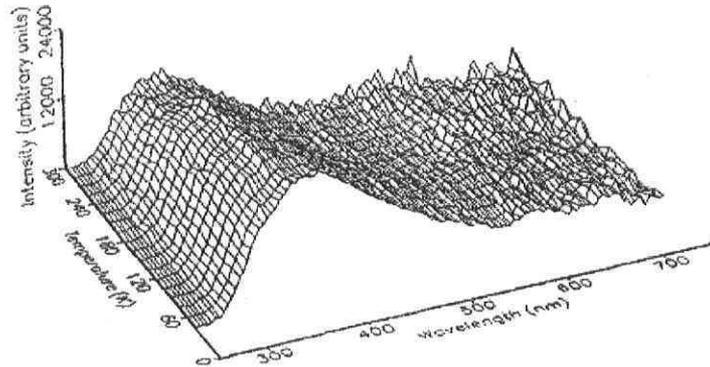


Figure 3.12 : Radioluminescence et thermoluminescence du ErIV:ZBLAN (B. Yang, P.D. Townsend, *et al.*, Phys. Rev B 56, 5876 (1997))

Le ZBLAN est donc un matériau tout indiqué par ses propriétés pour être adapté à ce projet. Malheureusement, le ZBLAN dopé nécessaire pour ce projet était difficilement disponible et particulièrement onéreux, ceci étant une conséquence du nombre d'entreprises en optique ayant fait faillite au début de cette décennie, ainsi que du fait que les applications contemporaines sont fibrées et que donc les échantillons qui auraient pu être utilisés ne se trouvent que sous la forme de fibres optiques.

Il fut néanmoins décidé de faire plusieurs simulations numériques de ce matériau, afin de vérifier ses propriétés, en comparaison d'autres matériaux similaires et disponibles.

Le tableau 3.3 résume la composition du ZBLAN non dopé, ainsi que du ZBLAN co-dopé à l'erbium (ErIV) et à l'ytterbium (YbIV).

	ZrF ₄ (%mol)	BaF ₂ (%mol)	LaF ₃ (%mol)	AlF ₃ (%mol)	NaF (%mol)	YbF ₃ (%mol)	ErF ₃ (%mol)	Densité (g/cm ³)
YbIV:ErIV:ZBLAN	56-x%	28%	2.5%	4%	7%	2.5%	x%	≈2
ZBLAN	54%	23%	4%	3%	16%	NA	NA	≈?

Tableau 3.3 : Compositions des échantillons de ZBLAN.

L'ajout d'ytterbium est justifié par le fait que celui-ci est excité plus facilement que l'erbium; l'ytterbium transfère alors son énergie à l'erbium, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'efficacité quantique – que l'on pourrait définir comme le rapport de l'énergie émise par l'énergie absorbée. Ce procédé est très utilisé en optique/photonique.

Le pic d'émission de la radioluminescence se situe aux environs de 330 nm, selon la littérature [2, 7].

3.2.2. Le titane saphir

Contrairement au matériau précédemment décrit, dont l'utilisation ne sera que numérique, le titane saphir (Ti:Sa) est un échantillon provenant du laboratoire du Professeur Michel Piché.

Le Ti:Sa est un cristal utilisé en physique des lasers. Il s'agit d'un matériau qui peut être excité dans le vert, généralement par un laser argon (514 nm) ou verdi (532 nm). L'émission est alors accordable dans l'infrarouge proche [1, 13-16]. Le saphir a déjà fait l'objet d'étude concernant sa radioluminescence [17-21]

Le tableau 3.4 résume la composition stœchiométrique du Ti:Sa.

Densité (g/cm ³)	Al	O	Ti	Totale
Ti:Sa	1.37	1.22	1.39	3.98

Tableau 3.4 : Composition du Ti:Sa.

La figure 3.13 montre le spectre d'absorption du Ti:Sa.

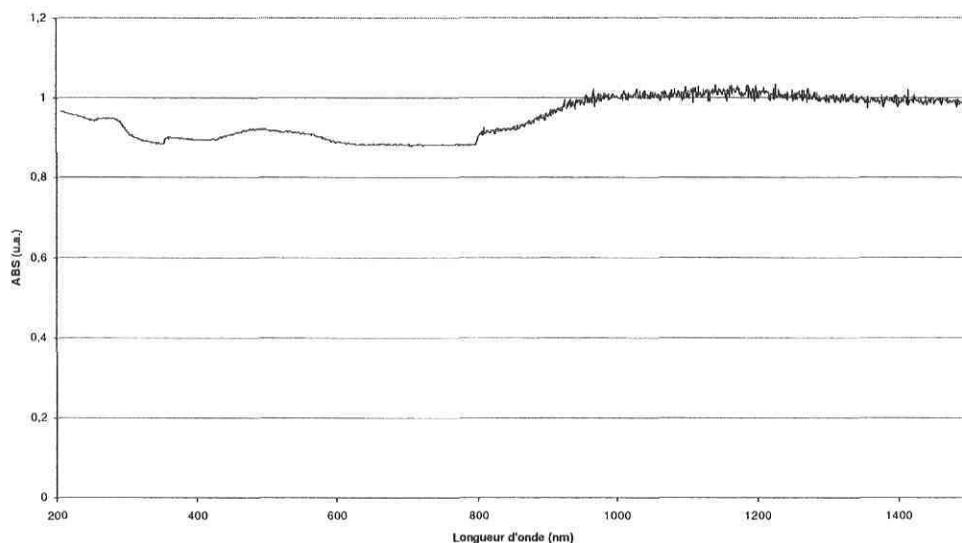


Figure 3.13 : Spectre d'absorption du Ti:Sa.

Sur ce graphique on observe la zone d'absorption du matériau autour de 500 nm qui correspond donc à la zone de pompage. Aussi, on observe l'habituelle absorption dans l'UV. Finalement, on voit la forte absorption dans l'infrarouge au-delà de 1000 nm.

Les lasers Ti:Sa émettent sur une plage de 650 à 900 nm, ce qui correspond à la zone non absorbante du matériau, comme nous pouvons le constater sur le spectre d'émission de la figure 3.14. Contrairement aux spectres d'émission précédents, celui-ci n'est obtenu qu'avec une pompe laser, soit un verdi à 532 nm. En effet, le Ti:Sa réagit bien mal dans l'UV, et aucun résultat adéquat ne fut obtenu avec ce type d'excitation.

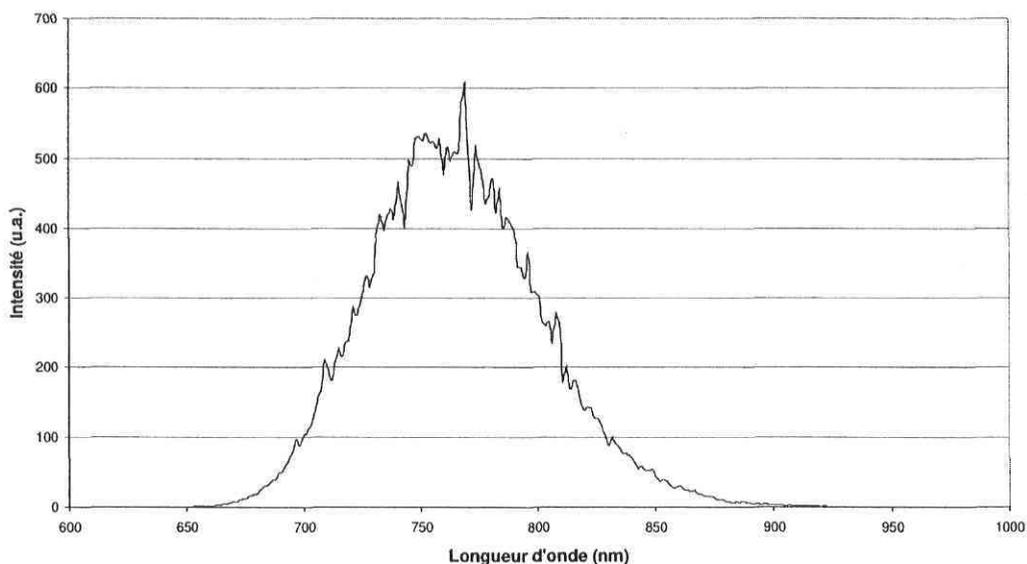


Figure 3.14 : Spectre d'émission du Ti:Sa excité par une pompe optique (Verdi à 532 nm).

3.4. Synthèse de chapitre

Dans ce chapitre ont été décrits les différents matériaux qui seront étudiés dans les chapitres suivants. L'ED2 dopé de néodyme et le verre poreux dopé d'erbium sont les matériaux principaux dans la mesure qu'ils sont dopés d'ions trivalents de lanthanides, donc qu'ils présentent une fluorescence; aussi il s'agit de structure non cristalline ce qui empêchera la propagation d'exciton. L'étude de la radioluminescence au chapitre 5 devrait montrer si ces matériaux ont bel et bien une émission dues aux ions, et auquel cas celle-ci ne devrait pas être due aux excitons.

Par opposition le Ti:Sa a une structure cristalline, l'étude de ce matériau ne devrait pas donner de résultat similaire à ceux du ErIV:VP ou du NdIV:VP. Le Ti:Sa sera donc utilisé comme matériau référence.

De même, le YbIV:ErIV:VP sera utilisé pour fin de comparaison numérique. En effet la littérature sur les deux matériaux choisis étant plutôt restreinte, la simulation avec un

matériau connu et bien documenté permettra la validation des résultats qui seront obtenus.

3.5. Références

1. T.S. Lonheim et L.G. DeShazer, *J. Appl. Phys.* **49**, 5517 (1978).
2. S.A. Holgate, T.H. Sloane, P.D. Townsend, D.R. White et A.V. Chadwick, *J. Phys.: Condens. Matter* **6**, 9255 (1994).
3. W.W. Moses, *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-45**, 462 (1998).
4. J.A. Levitt et W.H. Weber, *Appl. Opt.* **16**, 2684 (1977).
5. C.L. Hagen, J.W. Walewski, et S.T. Sanders, *IEEE Photonic Tech. L.* **18**, 91 (2006).
6. J.H. Simmons, R.K. Mohr, D.C. Tran, *et al.*, *Appl. Opt.* **18** (16), 2732 (1979).
7. B. Yang, P.D. Townsend, N. Can, *et al.*, *Phys. Rev. B* **56** (10), 5876 (1997).
8. A.E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Sausalito, 1986).
9. G. Qin, S. Huang, Y. Feng, *et al.*, *Appl. Phys. B Lasers O.* **82**, 65 (2006).
10. R. Piramidowicz, P. Witonski, M. Klimczak, *et al.*, *Opt. Mat.* **28**, 152 (2006).
11. I.A. Grishin, V.A. Gur'ev et A.P. Savikin, *Opt. Spectrosc.+* **93**, 709 (2002).
12. Z. Buchta, J. Rychnovsky et J. Lazar, *J. Optoelectron. Adv. M.* **8**, 350 (2006).
13. A.G. Shvedko, S.G. Kruglik et P.A. Apanasevich, *Laser Phys.* **13**, 1491 (2003).
14. P.L. Ramazza, S. Ducci, A. Zavatta, *et al.*, *Appl. Phys. B-Lasers O.* **75**, 53 (2002).
15. M.P. Kalashnikov, P.V. Nickles, M. Schnuerer, *et al.*, *Opt. Commun.* **133**, 216 (1997).
16. S. Varro, *Laser Phys. Lett.* **1**, 42 (2004).
17. J. Garcia-Guinea, J. Rubio, V. Correcher et F.J. Valle-Fuentes, *Radiat. Meas.* **33**, 653 (2001).

18. V. E. Pelenyov, V. S. Kortov et I. I. Milman, *Radiat. Meas.* **33**, 629 (2001).
19. N. Agersnap-Larsen, L. Botter-Jensen et S.W.S. McKeever, *C. Radiat. Prot. Dosim.* **84**, 87 (1999).
20. M.S. Akselrod, A.C. Lucas, J.C. Polf et S.W.S. McKeever, *Radiat. Meas.* **29**, 391 (1998).
21. R. Gaza, S.W.S. McKeever, M.S. Akselrod MS, *et al.*, *Radiat. Meas.* **38**, 809 (2004).

Chapitre 4 : Simulations numériques

4.1. Introduction

Différents outils informatiques sont aujourd'hui disponibles pour simuler les interactions des particules avec la matière. Ces logiciels sont Geant4 [1-6] et SRIM2003 [7-10]. Le premier de ces logiciels fut développé par des scientifiques du CERN en Suisse, le deuxième – d'usage très convivial – fut développé par une collaboration germano-américaine. De ces simulations nous pouvons déterminer, pour différentes particules et énergies, les profondeurs de pénétration, les spectres de dépôt d'énergie, les pouvoirs d'arrêt – aussi appelé dE/dx^4 –, et ainsi obtenir des prévisions sur la photoémission des divers matériaux testés.

4.2. Les simulations Geant4

4.2.1. Les interactions

Les simulations Geant4 portèrent sur les interactions de particules gamma à 1.2 MeV sur cinq matériaux simulés avec les données stœchiométriques, décrites au chapitre 3. Il s'agit dans un premier temps du ErIV:YbIV:ZBLAN, du ErI:VP et du VP. Dans un deuxième temps des simulations furent faites avec le NdIV:ED2 et le ED2. Ceci permet donc d'étudier les verres dopés et non dopés, ce qui demeure un avantage en considérant l'absence d'échantillon témoin pour procéder aux expériences.

L'idée initiale était de simuler les interactions avec des particules gammas émises par le ^{60}Co . Cependant, comme les matériaux utilisés ne répondaient pas aux irradiations menées expérimentalement, pour des raisons mentionnées plus loin, l'intérêt des simulations présentées ici est de constater l'incidence de la radiation incidente sur les

⁴ Les collisions inélastiques sont de nature statistique, se produisant avec une probabilité issue de la mécanique classique. Cependant, comme leur nombre par unité de longueur macroscopique est généralement élevé, les variations de la perte d'énergie totale sont faibles et on peut facilement travailler avec la perte moyenne d'énergie totale par unité de longueur. C'est ce que représente le dE/dx .

électrons du milieu, et ainsi observer le dépôt d'énergie à des énergies correspondant au spectre visible.

Quand le gamma traverse le matériau, il peut interagir de différentes façons, telles que décrites dans le chapitre 1. Ces interactions vont provoquer des émissions d'autres particules ionisantes : gammas, X ou électrons, et celles-ci interagiront aussi avec le matériau, et ainsi de suite, jusqu'à ce que toute l'énergie du gamma initial soit absorbée par le matériau. La liste suivante montre les premières interactions dues à un gamma initial avec une énergie de 1.2 MeV sur un échantillon de ErIV:VP.

```

Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV) StepLeng TrackLeng NextVolume ProcName
0  -800    0    0    1.25    0    0    0 WorldPhysical initStep
1  -100    0    0    1.25    0    700   700 SlabVariablePhys Transportation
2  -85.6   0    0    0.436   0    14.4  714 SlabVariablePhys LowEnCompton
:----- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 1 -----
:  -85.6   0    0    0.814           e-
:----- EndOf2ndaries Info -----
3  -82.5  -6.61  -10.7  0.167   0    12.9  727 SlabVariablePhys LowEnCompton
:----- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 2 -----
:  -82.5  -6.61  -10.7  0.269           e-
:----- EndOf2ndaries Info -----
4  -79.6  -1.81   3.08  0.163   0    14.9  742 SlabVariablePhys LowEnCompton
:----- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 3 -----
:  -79.6  -1.81   3.08  0.00377          e-
:----- EndOf2ndaries Info -----
5  -76.1  -1.6   10.7   0 0.00835  8.39  751 SlabVariablePhys LowEnPhotoElec
:----- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 2(Rest= 0,Along= 0,Post= 2), #SpawnTotal= 5 -----
:  -76.1  -1.6   10.7   0.106           e-
:  -76.1  -1.6   10.7   0.0492          gamma
:----- EndOf2ndaries Info -----

*****
*****
* G4Track Information: Particle = gamma, Track ID = 6, Parent ID = 1
*****
*****

Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV) StepLeng TrackLeng NextVolume ProcName
0  -76.1  -1.6   10.7  0.0492   0    0    0 SlabVariablePhys initStep
1  -76.6  -1.09  11    0 0.00835  0.776  0.776 SlabVariablePhys LowEnPhotoElec
:----- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 1 -----
:  -76.6  -1.09  11    0.0409          e-
:----- EndOf2ndaries Info -----

*****
*****
* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 7, Parent ID = 6
*****
*****

Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV) StepLeng TrackLeng NextVolume ProcName
0  -76.6  -1.09  11    0.0409   0    0    0 SlabVariablePhys initStep

```

1	-76.6	-1.09	11	0.0354	0.00551	0.00491	0.00491	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-76.6	-1.09	11	0.0335	0.000788	0.000857	0.00577	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
:---- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 1 -----									
:	-76.6	-1.09	11	0.0011				e-	
:----- EndOf2ndaries Info -----									
3	-76.6	-1.09	11	0.0304	0.00308	0.00342	0.00919	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-76.6	-1.09	11	0.0284	0.000506	0.000736	0.00992	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
:---- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 2 -----									
:	-76.6	-1.09	11	0.00144				e-	
:----- EndOf2ndaries Info -----									
5	-76.6	-1.09	11	0.0265	0.00192	0.00254	0.0125	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-76.6	-1.09	11	0.0243	0.00222	0.00224	0.0147	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-76.6	-1.09	11	0.0211	0.00322	0.00191	0.0166	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-76.6	-1.09	11	0.0195	0.0016	0.00147	0.0181	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-76.6	-1.09	11	0.0163	0.00318	0.00127	0.0194	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-76.6	-1.09	11	0.0147	0.0016	0.000921	0.0203	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-76.6	-1.09	11	0.0132	0.00147	0.000762	0.021	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-76.6	-1.09	11	0.0119	0.00137	0.00063	0.0217	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-76.6	-1.09	11	0.00987	0.000902	0.000445	0.0221	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
:---- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 3 -----									
:	-76.6	-1.09	11	0.00108				e-	
:----- EndOf2ndaries Info -----									
14	-76.6	-1.09	11	0.00893	0.000943	0.000372	0.0225	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-76.6	-1.09	11	0.0079	0.00103	0.00031	0.0228	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-76.6	-1.09	11	0.0069	0.000998	0.000248	0.023	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-76.6	-1.09	11	0.0056	0.0013	0.000195	0.0232	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-76.6	-1.09	11	0.00515	0.000451	0.000135	0.0234	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-76.6	-1.09	11	0.0043	0.000846	0.000117	0.0235	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-76.6	-1.09	11	0.00401	0.000292	8.59e-05	0.0236	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-76.6	-1.09	11	0.00345	0.000557	7.63e-05	0.0237	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-76.6	-1.09	11	0.00229	1.44e-05	3.56e-06	0.0237	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
:---- List of 2ndaries - #SpawnInStep= 1(Rest= 0,Along= 0,Post= 1), #SpawnTotal= 4 -----									
:	-76.6	-1.09	11	0.00115				e-	
:----- EndOf2ndaries Info -----									
23	-76.6	-1.09	11	0.00203	0.000255	3.13e-05	0.0237	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-76.6	-1.09	11	0.00168	0.000348	2.64e-05	0.0237	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-76.6	-1.09	11	0.00144	0.000241	2.03e-05	0.0237	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-76.6	-1.09	11	0.00119	0.000257	1.66e-05	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-76.6	-1.09	11	0.000932	0.000254	1.3e-05	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-76.6	-1.09	11	0.000848	8.44e-05	9.86e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
29	-76.6	-1.09	11	0.000597	0.000251	8.92e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
30	-76.6	-1.09	11	0.000594	2.54e-06	6.45e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
31	-76.6	-1.09	11	0.000518	7.69e-05	6.42e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
32	-76.6	-1.09	11	0.000438	7.95e-05	5.77e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
33	-76.6	-1.09	11	0.000424	1.37e-05	5.14e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
34	-76.6	-1.09	11	0.000165	0.000259	5.04e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
35	-76.6	-1.09	11	8.46e-06	0.000156	3.38e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
36	-76.6	-1.09	11	1.35e-06	7.11e-06	1.79e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
37	-76.6	-1.09	11	0	1.35e-06	1.01e-06	0.0238	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

La liste complète des interactions simulées, pour un seul gamma incident, se trouve en annexe 1.

On voit sur cette liste que si les premières interactions sont des interactions de type Compton et photoélectrique, très rapidement le processus dominant devient l'ionisation à

basse énergie. Les électrons éjectés par ionisation vont perdre de l'énergie cinétique dans le matériau. Ces pertes devront être photoniques ou phononiques. L'étude de ces pertes pourra donc nous donner un spectre de densité d'énergie déposée, et ainsi pouvoir évaluer quelle sera la radioluminescence résultante. Avec des gammas incidents ayant des énergies plus élevées, nous observerions des interactions de type production de paires au début du processus, mais les dépôts d'énergie résultant des ionisations ne devraient pas être affectés à basse énergie. En effet, il s'agit là d'un phénomène d'ionisation en cascade, et ces interactions sont donc de type électronique, telles que décrites au chapitre 1.

4.2.2. Les spectres de dépôt d'énergie

On peut simuler avec Geant4 la perte d'énergie cinétique, dans le matériau, des électrons émis par ionisation pour les différents échantillons. La figure 4.1 montre le dépôt d'énergie, soit la perte d'énergie, des électrons émis par ionisation dans le matériau. Ici, la perte d'énergie ΔE est exprimée en longueur d'onde (nm) selon l'équation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{4.1}$$

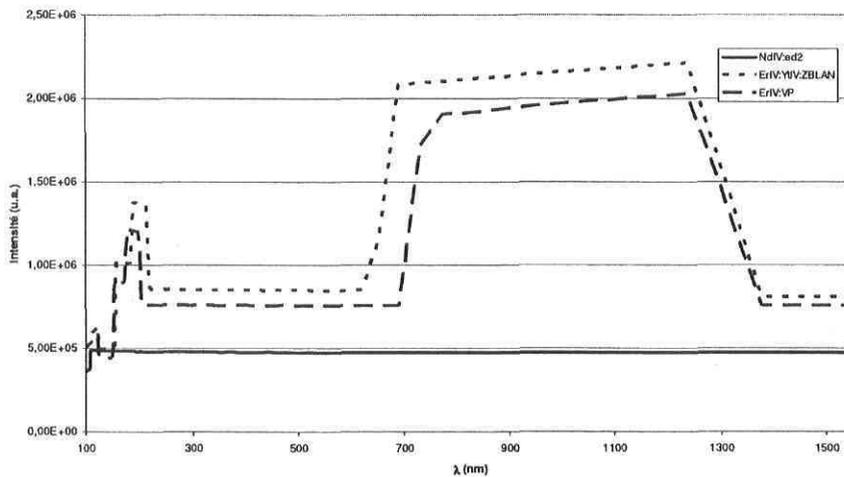


Figure 4.1: Spectre de dépôt d'énergie, dans le spectre visible, de divers matériaux exposés à des gammas de 1.2 MeV.

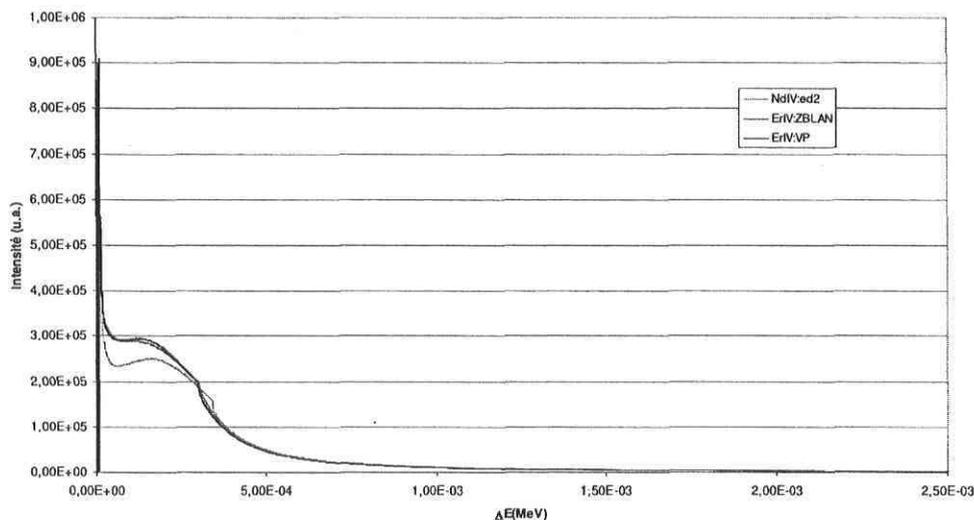


Figure 4.2 : Spectre de dépôt d'énergie, dans le spectre d'énergie, de divers matériaux exposés à des gammas de 1.2 MeV.

Les figures 4.1 et 4.2 présentent les mêmes résultats mais de façon différente, puisqu'une échelle est proportionnelle à l'inverse de l'autre : $[\text{nm}] \rightarrow [\text{MeV}]$. La figure 4.2 montre la perte d'énergie des électrons ΔE et est exprimée en MeV, alors que la figure 4.1 la montre en terme de longueur d'onde (nm).

La figure 4.1, sur le spectre optique, nous montre clairement deux zones dominantes de dépôt d'énergie des électrons dans le ZBLAN et le verre poreux, chacun dopé d'erbium. La première zone est située autour de 200 ± 50 nm, et la deuxième zone, beaucoup plus intense, située à 1000 ± 300 nm.

La première zone est la seule d'intérêt. En effet nous savons que les molécules du matériau pourront être excitées à ces niveaux d'énergie et pourront donc éventuellement émettre une radioluminescence à partir de 200 nm, soit dans l'UV.

La deuxième zone montre bien un dépôt d'énergie dans l'infrarouge, mais l'énergie concernée ne devrait pas correspondre aux niveaux d'excitation moléculaire des matériaux. Ces pertes devraient donc justifier la création de phonons.

Malheureusement nous n'observons pas de telles zones pour le NdIV:ED2. N'en déduisons pas qu'il n'y aura pas de radioluminescence, mais plutôt que l'énergie sera déposée uniformément dans le matériau.

La figure 4.2 confirme que les spectres en énergie sont similaires pour les trois matériaux. Pour les énergies élevées, la perte énergétique est négligeable, à partir de 500 eV (5×10^{-4} MeV) le dépôt d'énergie commence significativement, et dans les très basses énergies (soit dans le spectre visible) le dépôt d'énergie est maximal.

Il est à noter que la similitude des spectres ErIV:VP et ErIV:ZBLAN n'est pas due au dopant ErIV, mais est due à la similitude des deux verres. Comme le montre la figure 4.3, l'ajout de ErIV dans le verre poreux (VP) ne modifie pas significativement le spectre de dépôt d'énergie des électrons émis par ionisation.

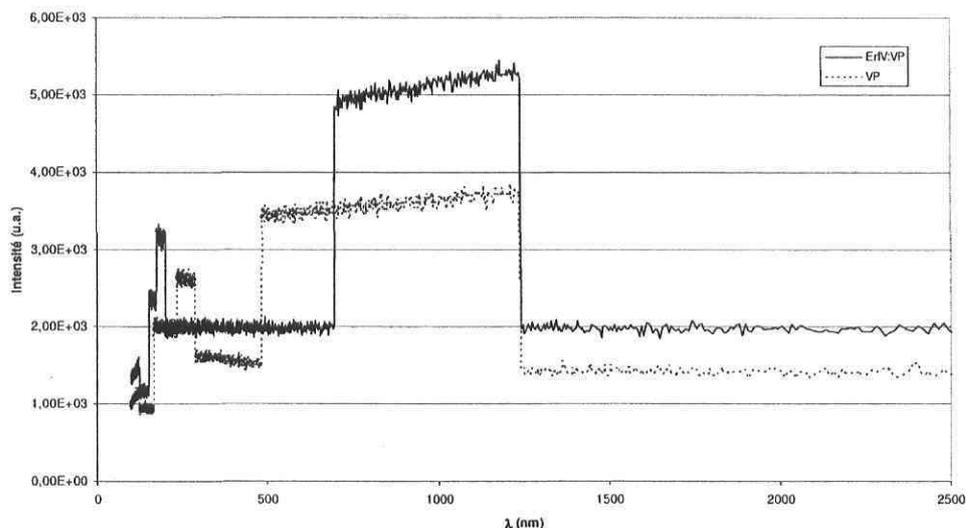


Figure 4.3 : Comparaison des spectres de dépôt d'énergie entre le verre poreux (VP) et le verre poreux dopé (ErIV:VP).

4.2.3. Profondeur de pénétration des gammas

Un autre paramètre important est la distance sur laquelle le gamma interagira. En effet, dans le cadre expérimental, ceci nous permet de savoir quelle épaisseur devra avoir l'échantillon exposé.

Les graphiques 4.4, 4.5 et 4.6 présentent le dépôt d'énergie en fonction de l'épaisseur de l'échantillon, de même que la somme d'énergie déposée en fonction de la position dans l'échantillon⁵.

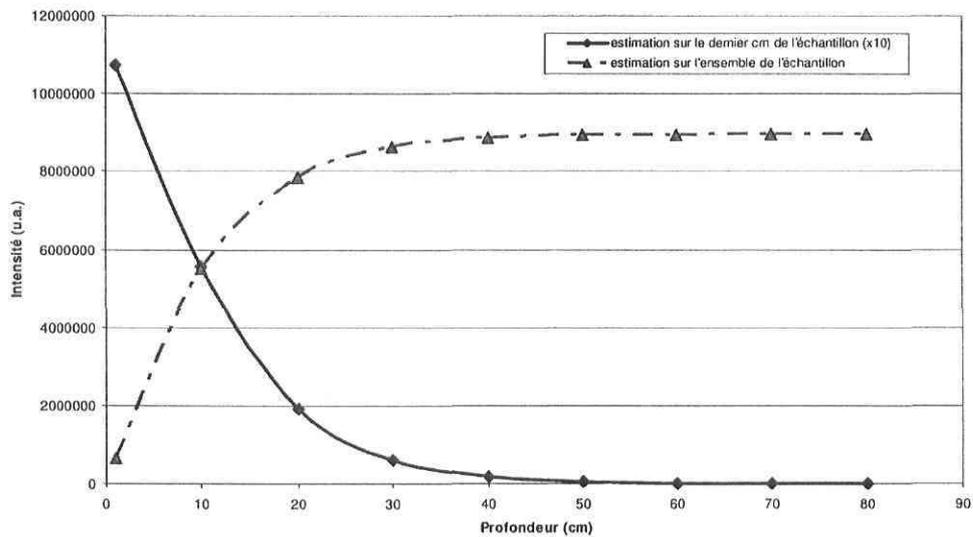


Figure 4.4 : Profondeur de pénétration des interactions dues au gamma à 1.2 MeV dans le NdIV:ED2.

⁵ Cette dernière donnée est présentée avec un facteur multiplicatif de 10, afin de compenser le fait que le calcul se faisait sur une tranche de 1 cm d'épaisseur tous les 10 cm de matériau. Il s'agit en fait d'une sorte d'intégrale, c'est ce qui lie les deux courbes.

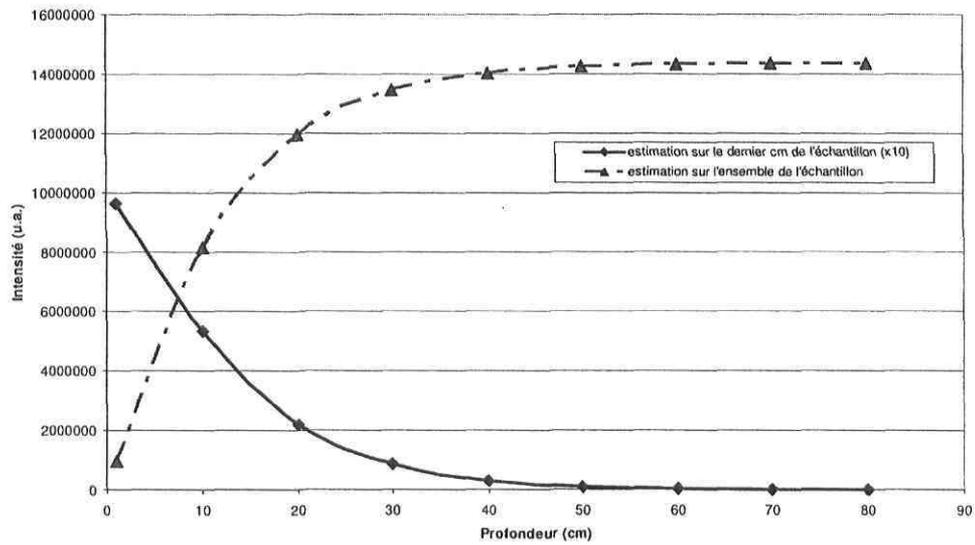


Figure 4.5 : Profondeur de pénétration des interactions dues au gamma à 1.2 MeV dans le ErIV:VP.

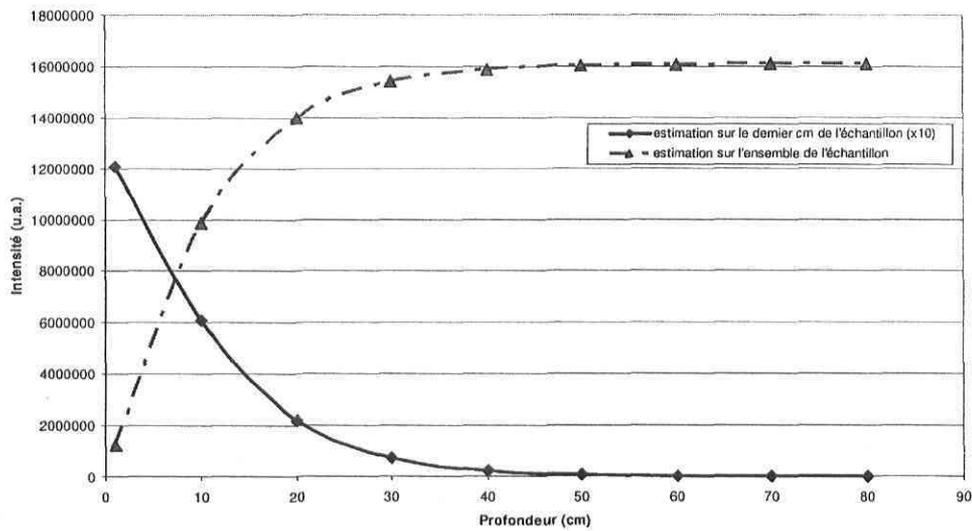


Figure 4.6 : Profondeur de pénétration des interactions dues au gamma à 1.2 MeV dans le ErIV:YbIV:ZBLAN.

Ces simulations furent réalisées en considérant la somme d'énergie déposée de 200 à 400 nm, ce qui correspond aux longueurs d'onde moyenne de la radioluminescence des matériaux scintillateurs.

On note que la nature des matériaux ne modifie pas la profondeur de pénétration des interactions dues au gamma incident. Ainsi toute l'énergie est déposée après 40 cm de pénétration. Aussi, on note que le maximum d'énergie est déposé à l'entrée du gamma dans le matériau par une décroissance exponentielle, fonction de la position dans l'échantillon.

L'équation type à la mesure sur le dernier cm de l'échantillon simulée est :

$$I = Ae^{\frac{-D}{9.1}}. \quad (4.2)$$

On peut donc en déduire que la moitié de l'énergie qui sera déposée dans la matrice en raison du gamma le sera à une profondeur d'environ environ 9.1 cm. Cette estimation est indépendante de la constitution du matériau, en fait elle dépend plus de la densité massique de l'échantillon.

Une simulation, présentée sur la figure 4.7, permet aussi de comparer les spectres de dépôt d'énergie en fonction de la position dans l'échantillon.

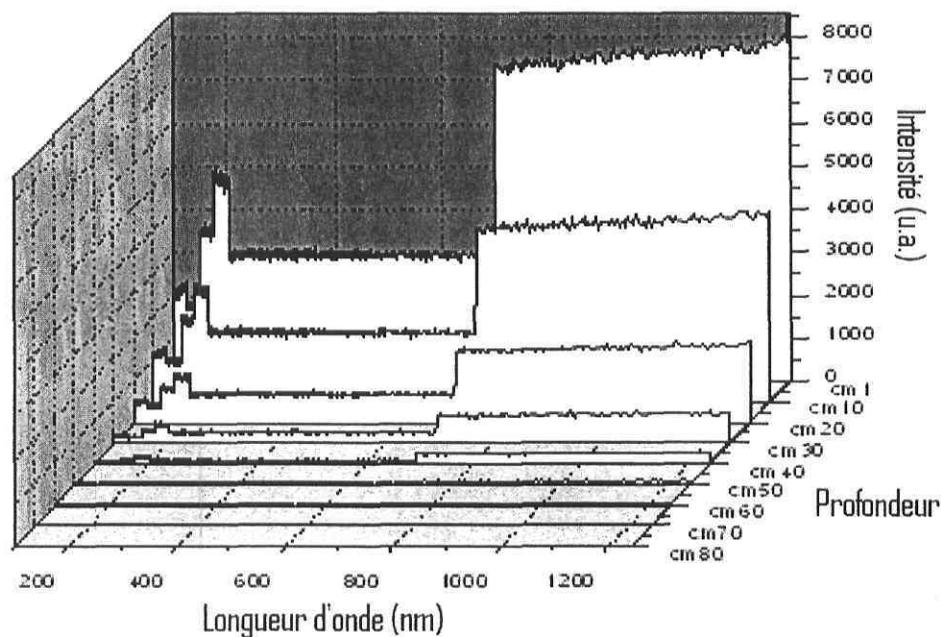


Figure 4.7 : Étude du spectre de dépôt d'énergie en fonction de la position dans l'échantillon de ErIV:VP.

Le spectre de dépôt d'énergie n'est pas affecté par la position dans l'échantillon, si ce n'est l'intensité. En fait, comme nous le voyons en annexe, très rapidement l'interaction dominante est l'ionisation à basse énergie, et le dépôt d'énergie demeurera donc électronique. C'est pourquoi les spectres de dépôt d'énergie sont particulièrement intéressants. En effet, comme il s'agit d'ionisation à basse énergie, la nature de la radiation incidente n'a pas d'importance sur le spectre, ce spectre dépend des électrons excités, et que la particule soit un gamma ou un proton les interactions finales seront les mêmes. La nuance se fera donc sur la profondeur de pénétration de la particule.

4.3. Les simulations SRIM2003

Les calculs de SRIM2003 permettent de simuler l'interaction des ions accélérés avec la matière. Nous pouvons ainsi déterminer le dE/dx de ces interactions, la profondeur de pénétration des ions dans les matériaux et encore une fois le type d'interactions

(ionisations ou phonons). Les sections suivantes traiteront des interactions avec le matériau ED2, ensuite une comparaison avec les autres matériaux sera effectuée.

4.3.1. Profondeur de pénétration des ions

Une première simulation intéressante est la profondeur de pénétration, c'est-à-dire la distance sur laquelle la particule ionisante va se propager dans le matériau, en fonction de l'énergie de la particule. Le graphique 4.8 montre cette simulation pour le NdIV:ED2 irradié par des ions H, ^4He et ^{12}C .

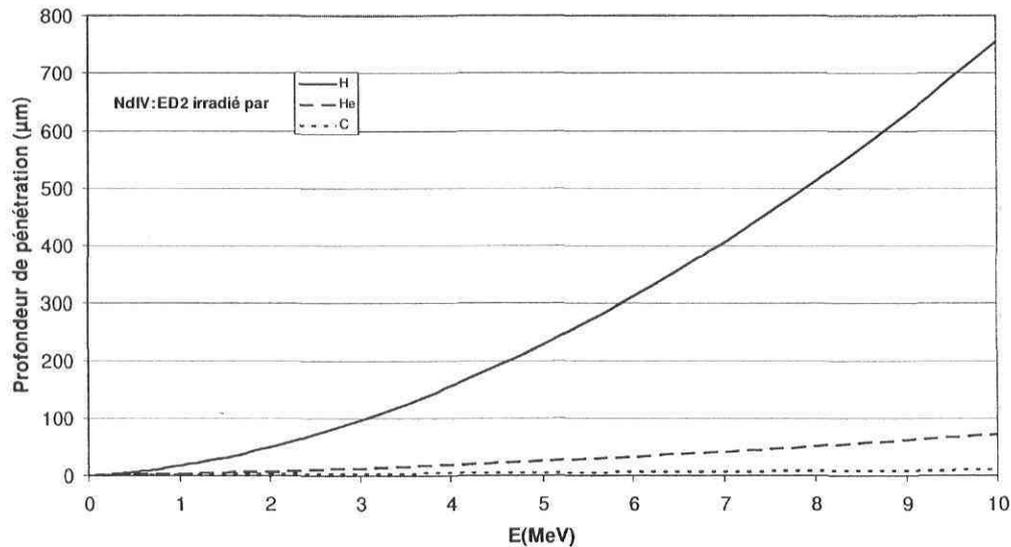


Figure 4.8 : profondeur de pénétration dans le NdIV:ED2 irradié par des ions H, He et C.

Ainsi, on voit clairement que les protons (H^+) se propagent très profondément dans l'échantillon, jusqu'à près de 750 μm pour une énergie de 10 MeV, alors que les ions plus lourds demeurent en surface. Ceci est entre autre dû à la différence de masse de ces ions. C'est pourquoi les résultats suivants sont présentés en MeV/nucléon, cette unité normalisant l'énergie cinétique avec la masse.

Le dE/dx permet de mesurer l'énergie déposée dans un matériau par une particule ionisante en fonction de la profondeur de pénétration. Ce paramètre varie donc en fonction du type de particule et de son énergie, comme le montre la figure 4.9.

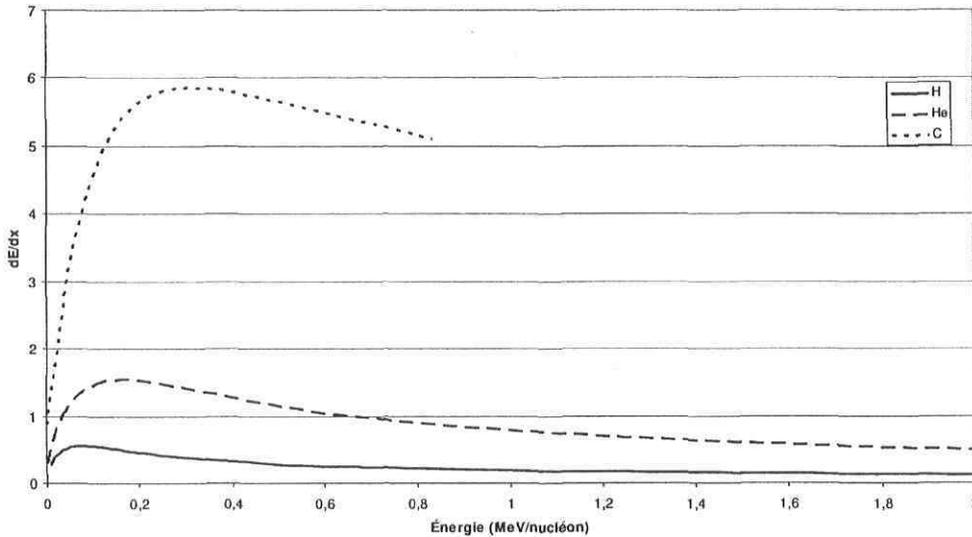


Figure 4.9 : mesure du dE/dx du NdIV:ED2, irradié par des ions de H, He et C.

Cette donnée confirme la précédente, plus l'ion est lourd plus il va déposer d'énergie sur une distance faible. *A contrario*, un ion très léger comme le H^+ déposera moins d'énergie par unité de distance parcourue, ceci s'expliquant par le fait qu'à énergie égale l'ion léger se propage beaucoup plus profondément.

4.3.2. Dépôt d'énergie

Bien que l'on sache maintenant la distance sur laquelle se propage la particule ionisante et son dE/dx , il reste à déterminer dans quelle zone principale et de quelle manière cette énergie sera déposée.

Les graphiques 4.10 à 4.14 montrent la propagation d'ions de H, He et C dans un matériau de NdIV:ED2, la portée (distance à laquelle l'ion incident s'arrête dans le matériau) ainsi que le type de dépôt d'énergie (ionisation et phonon).

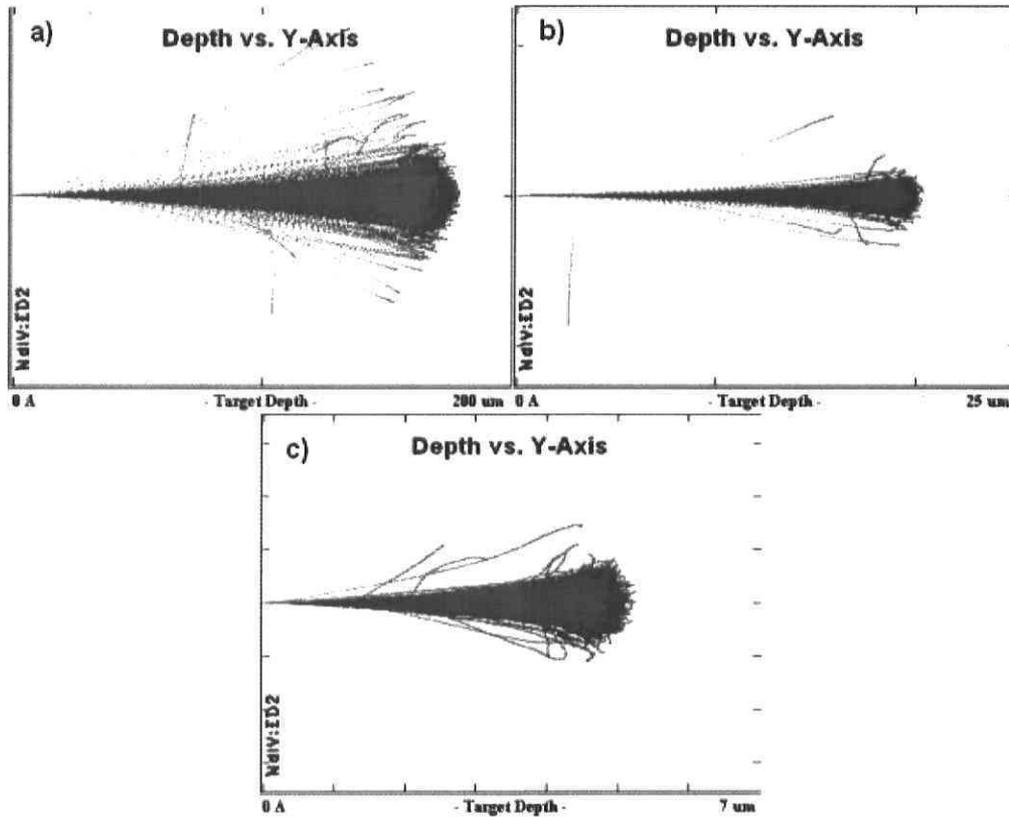


Figure 4.10: Propagation d'ions de a) H, b) He et c) C dans du NdIV:ED2.

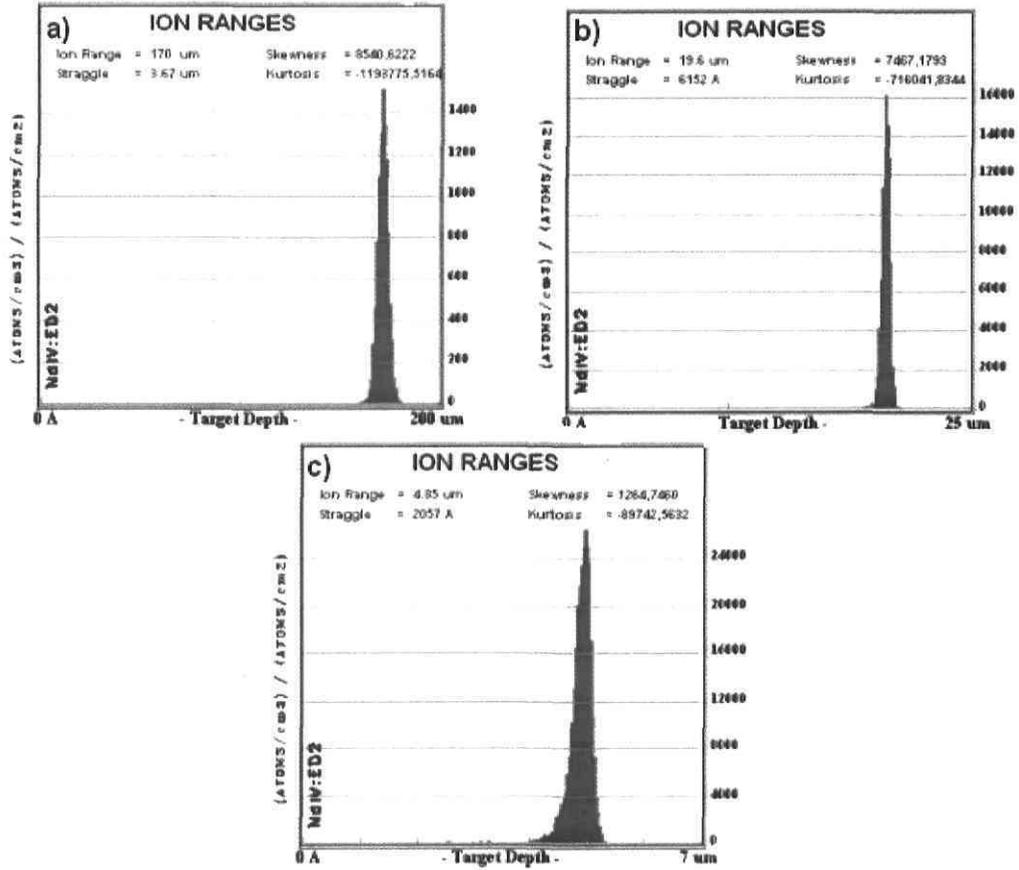


Figure 4.11 : Portée d'ions de a) H, b) He et c) C dans du NdIV:ED2.

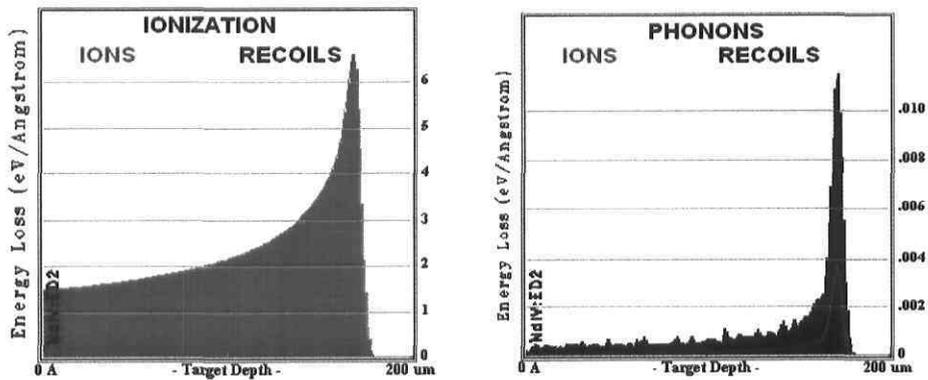


Figure 4.12 : Ionisations et créations de phonons provoquées par des ions de H_2^+ à 2.1 MeV dans le NdIV:ED2.

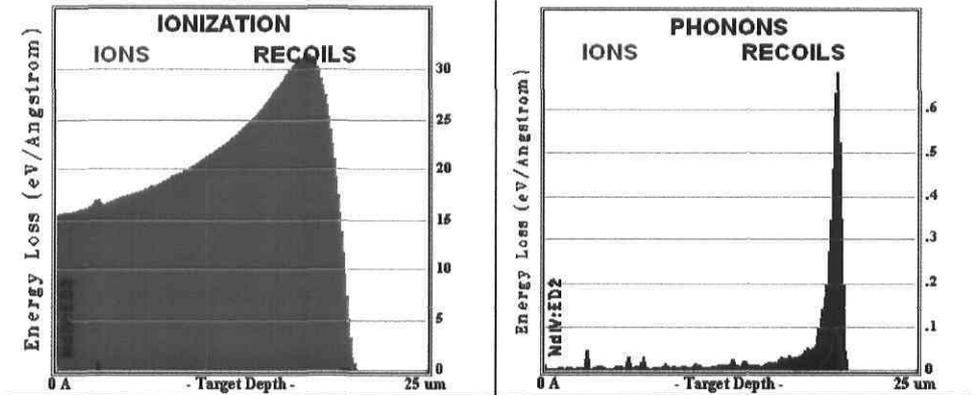


Figure 4.13 : Ionisations et créations de phonons provoquées par des ions de ${}^4\text{He}^{++}$ à 8.4 MeV dans le NdIV:ED2.

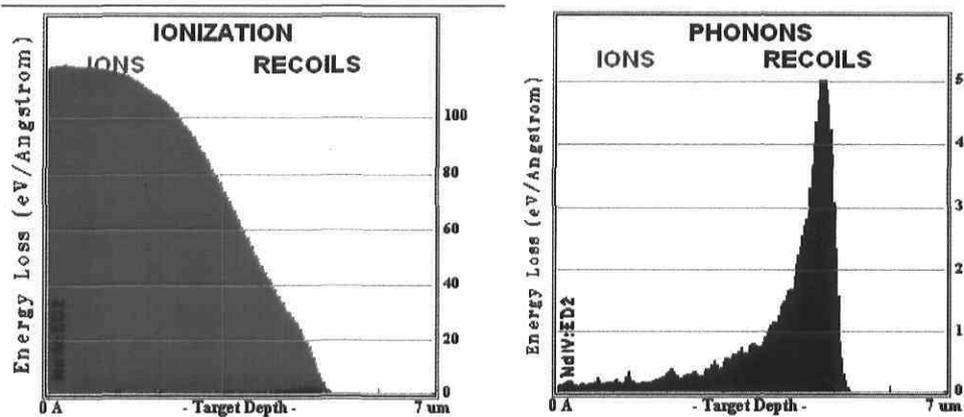


Figure 4.14 : Ionisations et créations de phonons provoquées par des ions de ${}^{12}\text{C}^{++}$ à 8.4 MeV dans le NdIV:ED2.

Pour fin de clarté tout d'abord, notons que les figures 4.12, 4.13 et 4.14 présentent chacune les phénomènes pour les effets issus des ions en rouge et issus du recul en bleu. Par exemple sur la figure 4.14, nous observons des ionisations d'origine ionique jusqu'à $120 \text{ eV}/\text{Å}$ à $1 \mu\text{m}$, et sur le même graphique nous voyons des ionisations provoquées par recul à quelques $\text{eV}/\text{Å}$ à $5 \mu\text{m}$.

La figure 4.10 confirme naturellement les mesures des figures 4.8 et 4.9, on peut constater l'effet de diffusion aussi du matériau. La figure 4.11 montre la portée des

particules dans le matériau qui est de $170 \mu\text{m} \pm 2\%$ pour l'hydrogène, de $19.6 \mu\text{m} \pm 3\%$ pour l'hélium, et de $4.85 \mu\text{m} \pm 4\%$ pour le carbone. On constate donc que l'incertitude sur la portée est inversement proportionnelle à la portée elle-même. Ceci tient des ordres de grandeur de la portée des ions dans le matériau.

Les figures 4.12, 4.13 et 4.14 demeurent les plus intéressantes puisqu'elles identifient les types d'ionisation et d'émission phononique selon qu'elles soient dues aux ions incidents ou au recul des éléments cibles.

À faible masse atomique (H et He), on constate que le maximum d'ionisation se produit à peu près à la distance de portée des ions incidents, alors qu'à masse élevée (C) les ionisations se produisent rapidement après l'entrée de la particule dans l'échantillon. On constate également que les ionisations par recul des éléments cibles sont négligeables.

La création de phonons semble se produire principalement à la distance de portée des ions incidents, aussi elle est principalement due au recul des éléments cibles; la production phononique due aux ions incidents demeure très faible. Il faut cependant noter que la production phononique est négligeable par rapport aux ionisations, ce dernier phénomène demeurant fortement dominant.

4.3.3. Comparaison avec les autres matériaux

Comme décrit dans le chapitre précédent, cette étude porte également sur un verre poreux dopé d'erbium et sur du titane:saphir. Des données similaires à celles des sections 4.2.1 et 4.2.2 furent obtenues pour ces deux matériaux et sont exposées en annexe.

Les courbes de dE/dx sont résumées sur les figures 4.15 et 4.16.

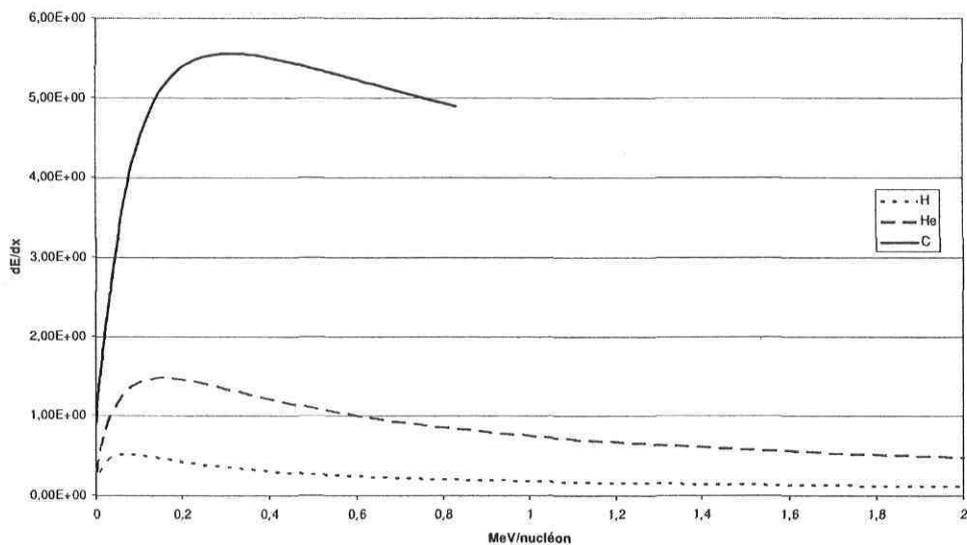


Figure 4.15 : dE/dx des H, He et C dans le ErIV:VP.

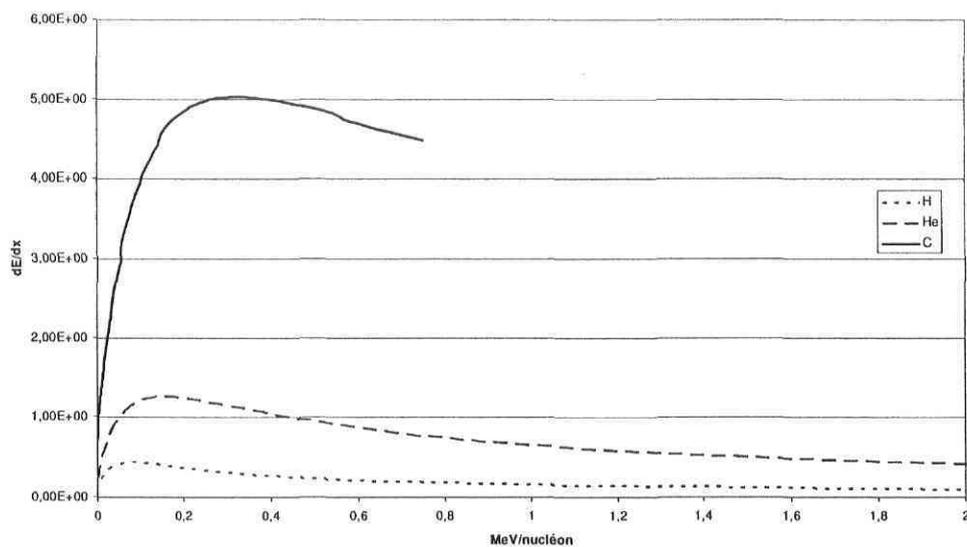


Figure 4.16 : dE/dx des ions de H, He et C dans le Ti:Sa.

Nous observons que ces deux figures sont très similaires à la figure 4.9. Seules les amplitudes des courbes changent, ce qui d'ailleurs s'observe également sur les courbes de profondeur de pénétration des figures 4.17 et 4.18, comparées avec la figure 4.8.

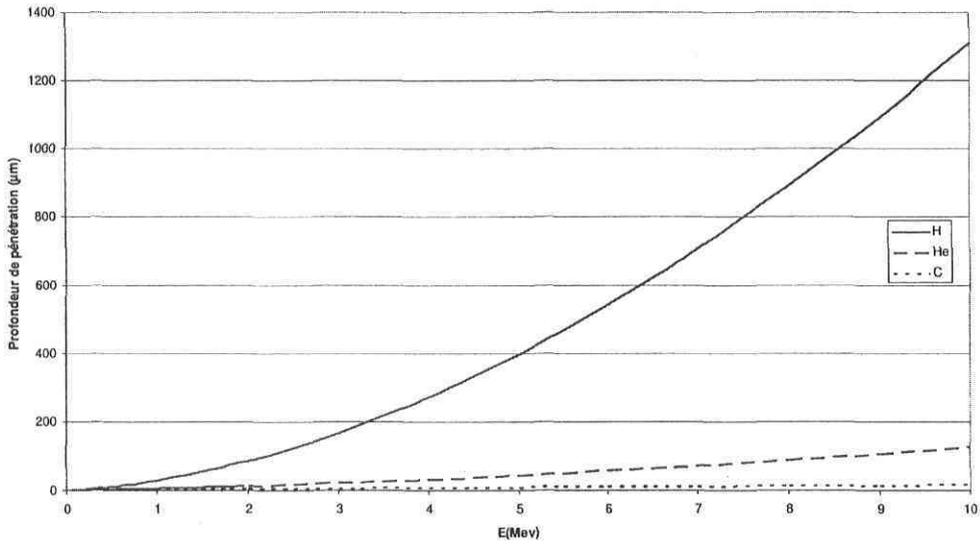


Figure 4.17 : Profondeur de pénétration des ions de H, He, et C dans l'ErIV:VP.

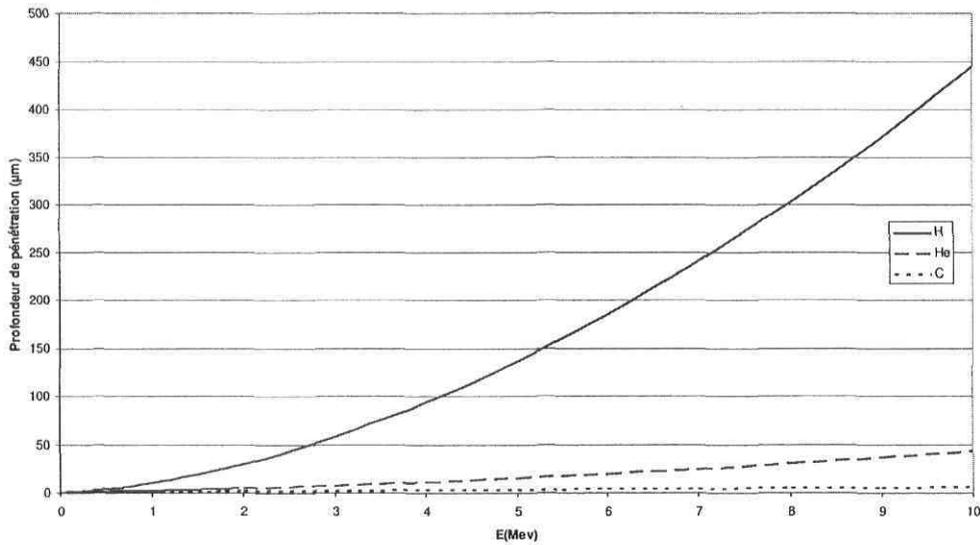


Figure 4.18 : Profondeur de pénétration des ions de H, He, et C dans le Ti:Sa.

On remarque d'ailleurs que les figures 4.17 et 4.18 sont tellement similaires qu'il est difficile de noter quelques différences. En fait, cela est tout à fait normal, les ions incidents auront le même comportement dans les matériaux. C'est la nature du matériau

qui peut éventuellement changer l'amplitude, i.e. la distance sur laquelle l'ion incident pourra se propager. Concernant la profondeur de pénétration il est intéressant de comparer la profondeur de pénétration des ions de H, He et C à 4,2 MeV dans les différents échantillons comme le montre la figure 4.19.

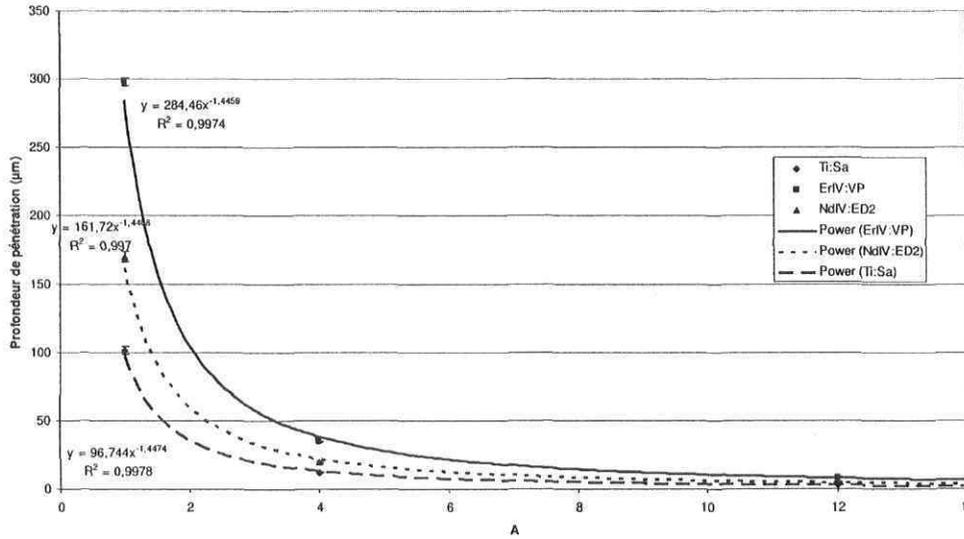


Figure 4.19 : Profondeur de pénétration en fonction du nombre de masse.

On observe sur la figure 4.19 la similarité des trois courbes et on comprend que la densité des matériaux est plus importante que la composition même de ceux-ci, bien qu'évidemment les deux soient liées. On observe d'ailleurs que l'amplitude des courbes de tendance est proportionnelle à la densité des matériaux telle que décrite dans le chapitre 3 :

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{ErIV:VP}} &= 1.2 \text{g.cm}^{-3}, \\
 \eta_{\text{NdIV:Ed2}} &= 2.03 \text{g.cm}^{-3}, \\
 \eta_{\text{Ti:Sa}} &= 3.98 \text{g.cm}^{-3}.
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

De la même façon on peut tracer la profondeur de pénétration des particules H, He et C en fonction de la densité des matériaux, comme le montrent les figures 4.20 et 4.21.

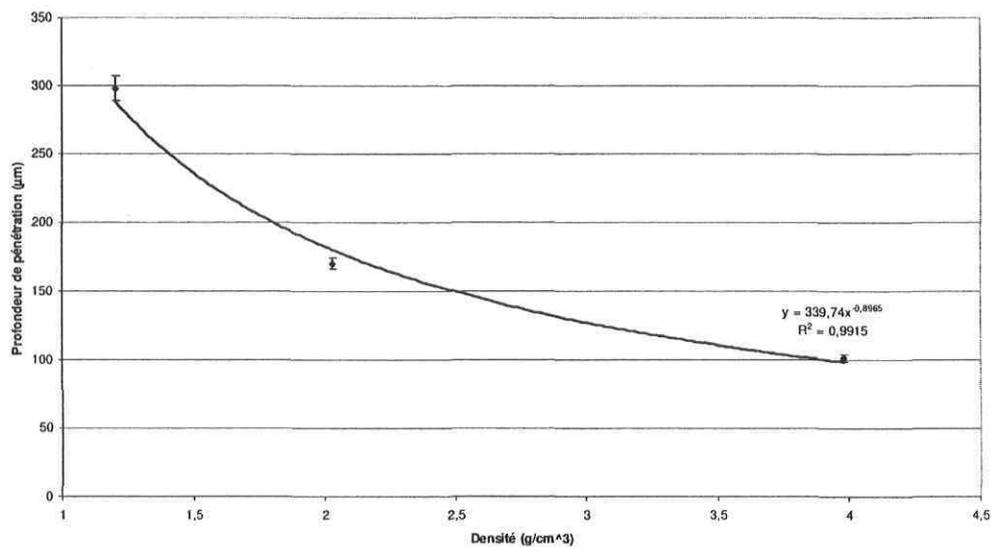


Figure 4.20 : Parcours des ions H en fonction de la densité des matériaux.

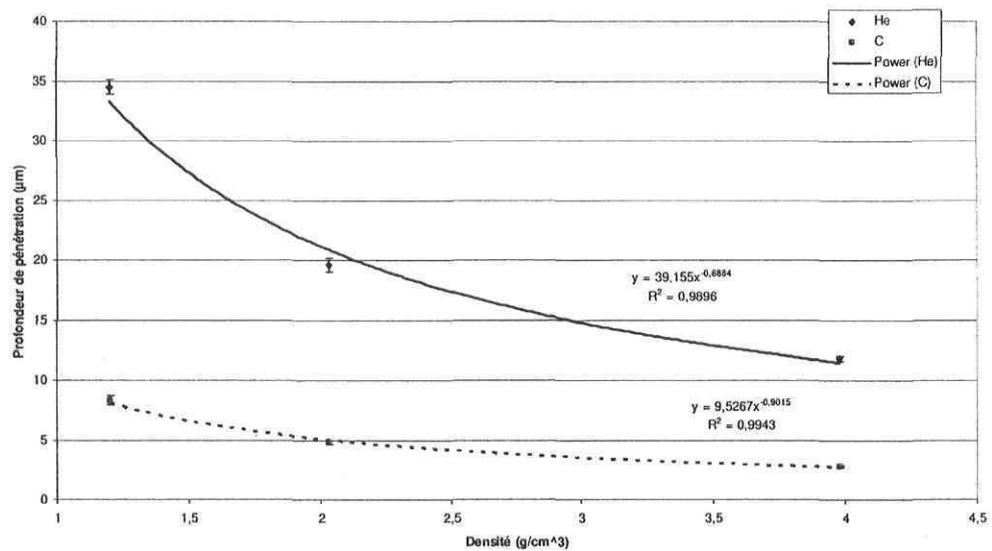


Figure 4.21 : Parcours des ions He et C en fonction de la densité des matériaux.

4.4. Synthèse de chapitre

Les simulations Geant4 nous permettent d'affirmer qu'à des énergies de quelques MeV le processus dominant de dépôt d'énergie sera l'ionisation des atomes. De ce fait, l'énergie se déposera principalement dans une zone correspondant à l'UV proche. Aussi, le spectre de dépôt d'énergie demeurera invariant sur la distance parcourue par la particule ionisante.

Les simulations Geant4 avec des particules gamma, ainsi que les calculs SRIM2003 réalisées avec des ions accélérés, nous confirment que l'excitation dominante sera l'ionisation des atomes, le profil de dépôt d'énergie devrait demeurer dans l'UV proche puisque c'est dans cette zone que l'on retrouve le plus de transitions atomiques susceptibles d'absorber l'énergie déposée.

Les simulations SRIM2003 nous confirment aussi que le matériau cible n'amène pas de différence notable sur les processus d'excitation et donc de dépôt d'énergie. En fait, les différences que nous pouvons espérer seront sur les spectres optiques d'émission ainsi que sur le temps de vie de ces niveaux. C'est ce qui sera étudié dans le chapitre suivant.

4.5. Références

1. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behnerl, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **506**, 250 (2003).
2. J. Apostolakis, S. Giani, M. Maire, *et al.*, Comput. Phys. Commun. **132**, 241 (2000).
3. K. Amako, Nucl. Instrum. Meth. A **453**, 455 (2000).
4. J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, *et al.*, IEEE T Nucl. Sci. **53**, 270 (2006).
5. J.F. Carrier, L. Beaulieu, F. Therriault-Proulx, *et al.*, Med. Phys. **33**, 595 (2006).
6. J.F. Carrier, L. Archambault, L. Beaulieu, *et al.*, Med. Phys. **31**, 484 (2004).

7. D. Spemann, K.H. Han, P. Esquinazi, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B **219**, 886 (2004).
8. H.H. Xia et X.D. Liu, Chinese Phys. Lett. **21**, 1051 (2004).
9. D. Spemann, P. Esquinazi, R. Hohne, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B **231**, 433 (2005).
10. C. Pascual-Izarra, M. Bianconi, N.P. Barradas, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. B **219**, 268 (2004).

Chapitre 5 : Étude de la fluorescence induite par radioluminescence

5.1. Introduction

Nous avons vu dans les chapitres précédents comment les particules ionisantes peuvent exciter un matériau en lui transmettant l'énergie cinétique, et comment cette excitation peut mener à la formation de lumière. Aussi, si le matériau est dopé d'ions de lanthanides, il peut émettre des raies spectrales associées à ces ions, sans que le matériau hôte ne présente une structure cristalline, donc sans qu'il ne permette la propagation d'exciton.

Plusieurs expériences ont été menées pour vérifier et mesurer la fluorescence induite par radioluminescence. Une première consiste à mesurer le spectre optique d'émission des matériaux irradiés par des particules ionisantes. Une seconde consiste à mesurer les temps de fluorescence. Ces deux paramètres permettront de distinguer les applications potentielles. De plus ces mesures seront comparées avec les résultats obtenus en utilisant un pompage optique plutôt qu'ionisant.

5.2. Mesures des spectres d'émission

Les matériaux ont été placés dans la chambre d'analyse – sous vide – d'un accélérateur de particules de type Van de Graaff [1], et ont été soumis à un bombardement d'ions H_2^+ selon le montage résumé sur la figure 5.1. La mesure du spectre optique fut prise en utilisant un analyseur de spectre optique (OSA) de marque ANDO et avec un spectromètre UV-visible d'Ocean Optics. Cependant les mesures avec ces instruments n'étaient pas prises simultanément.

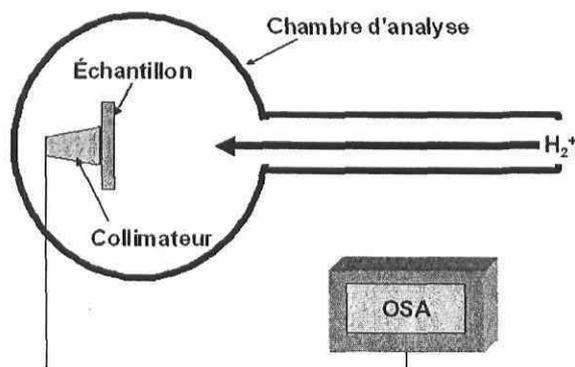


Figure 5.1 : Montage expérimental de mesure de spectre d'émission sous excitation ionisante.

Les ions H_2^+ sont accélérés par le générateur van de Graaff à une énergie de 4.2 MeV, soit 2.1 MeV/nucléon. L'échantillon fait office de cible et produit la lumière par les procédés décrits aux chapitres 1 et 2. La lumière émise est collectée par un collimateur qui la concentre dans une fibre optique de 600 μm de diamètre. À l'extérieur de la chambre, l'analyseur de spectre optique (OSA) (ou le spectromètre) analyse le signal transmis par le système fibré. Ces expériences ont également été menées avec des ions $^4He^{++}$ à 8.4 MeV (2.1 MeV/nucléon) et avec des ions de $^{12}C^{++}$ à 8.4 MeV (0.7 MeV/nucléon).

5.2.1. Spectre d'émission du NdIV:VP excité par radiation ionisante, dépendance en dose et comparaison avec le spectre d'émission par excitation optique.

Les spectres optiques du verre ED2 dopé de néodyme trivalent (NdIV) sont présentés sur les figures 5.2 à 5.5.

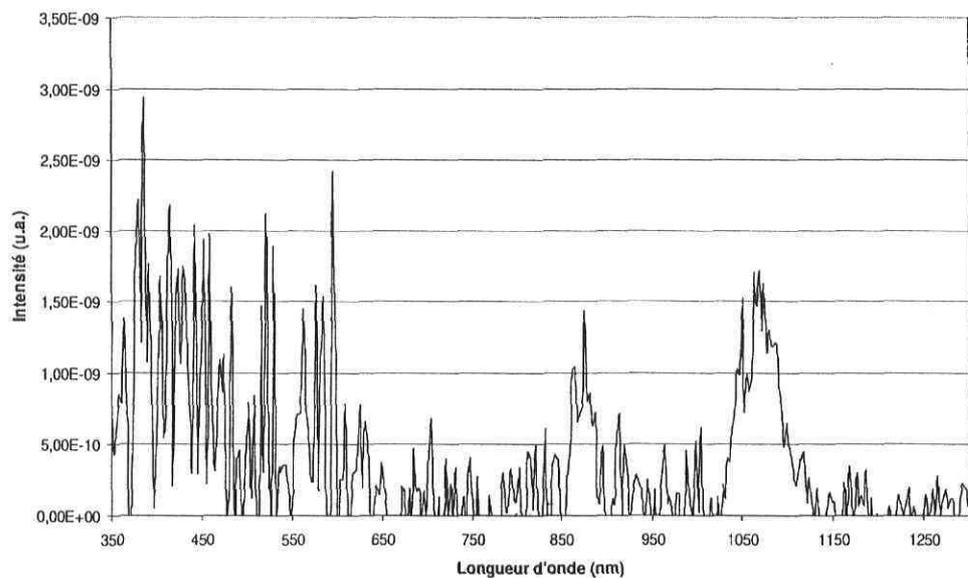


Figure 5.2 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 exposé à une irradiation d'ions H_2^+ à 4.2 MeV.

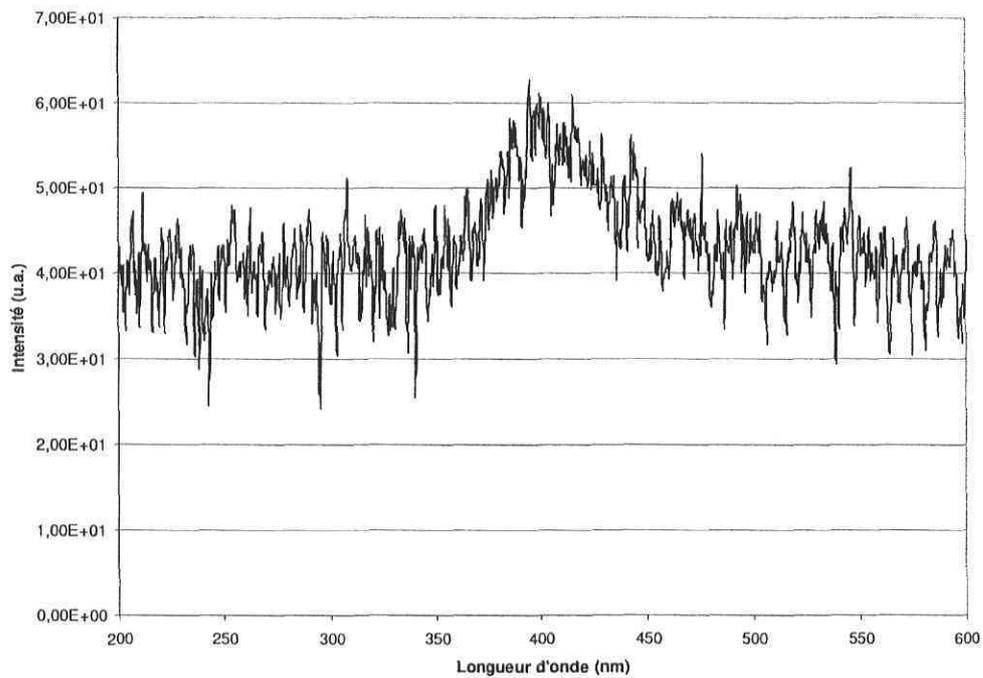


Figure 5.3 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 exposé à une irradiation d'ions H_2^+ à 4.2 MeV mesuré avec le spectromètre UV-visible.

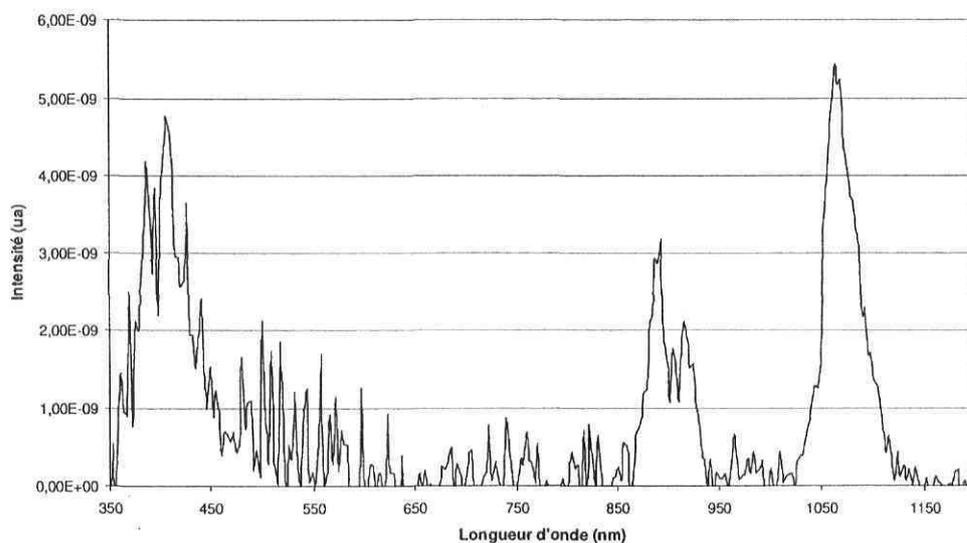


Figure 5.4 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 irradié par des ions $^4\text{He}^{++}$ à 8.4 MeV.

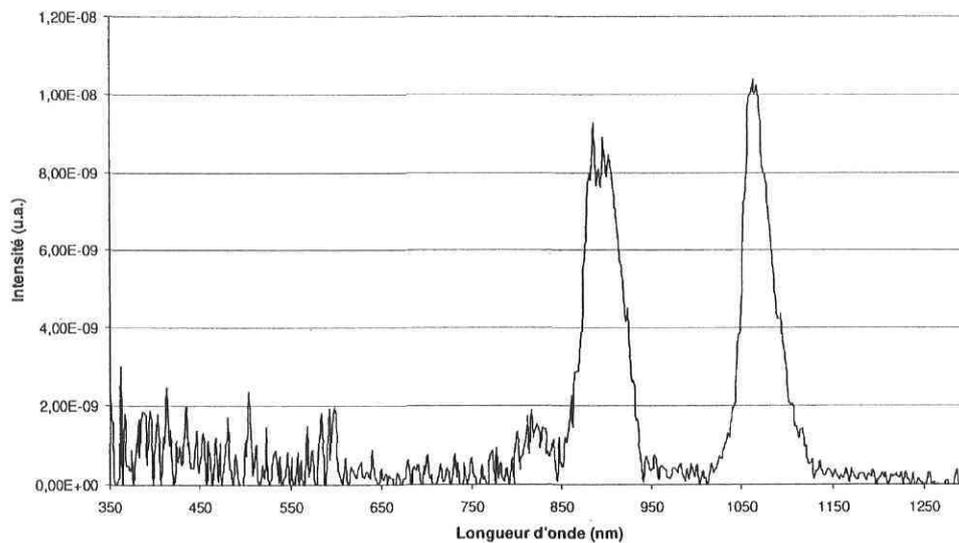


Figure 5.5 : Spectre d'émission du NdIV:ED2 irradié par des ions $^{12}\text{C}^{++}$ à 8.4 MeV.

Tout d'abord, comme il a été souligné précédemment, il faut noter que les spectres présentés aux figures 5.2 et 5.3 n'ont pas été pris simultanément, mais dans des conditions similaires.

Des graphiques 5.2, 5.4 et 5.5 nous pouvons observer clairement différentes zones d'émission, que l'on peut comparer avec les niveaux d'énergie du NdIV présentés au chapitre 3 :

- 1) Le pic le plus important est le pic à 1064 nm, correspondant à la transition ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$.
- 2) Ensuite, on peut observer le pic d'émission à 880 nm : ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$.
- 3) Aussi, on observe un faible pic vers 808 nm (surtout sur la figure 5.5) correspondant à la transition des niveaux ${}^4F_{5/2}$ et ${}^2H_{9/2}$ vers le niveau fondamental ${}^4I_{9/2}$.
- 4) Sur les figures 5.2, 5.3 et 5.4 on observe une zone d'émission centrée à peu près à 400 nm. Cette zone fut déjà observée au chapitre 3 et ne correspond pas à une émission ionique propre au NdIV. Plusieurs éléments parlent en ce sens :
 - a. Les niveaux atomiques du NdIV qui correspondent à cette zone sont visibles dans le spectre 5.3, mais sont des pics d'absorption et non d'émission. En effet, toutes les transitions atomiques ne sont pas radiatives, comme décrit au chapitre 2.
 - b. Cette zone d'émission disparaît dans le spectre correspondant à l'exposition au ${}^{12}C^{++}$ alors que les pics d'émission ionique sont plus importants. Il est aussi très intéressant de noter que cette zone d'émission UV-bleue se décale vers l'UV à fur et à mesure qu'elle s'atténue, ce qui s'expliquerait par une absorption de cette émission par le matériau et

probablement par les ions de néodyme, celui-ci présentant de nombreux pics d'absorption dans cette partie du spectre optique [2] : ${}^2K_{15/2}$ et ${}^4G_{11/2}$ à 475 nm, ${}^2D_{5/2}$ et ${}^2P_{1/2}$ à 435 nm, et surtout ${}^4D_{5/2}$ et ${}^4D_{3/2}$ à 355 nm.

- c. Comme décrit au chapitre 3, cette zone d'émission autour de 400 nm n'est pas ionique mais moléculaire et serait donc propre à l'ED2. L'absence d'échantillon témoin ne permet pas de conclure définitivement, mais l'observation sous différentes expositions montre bien que cette zone d'émission ne peut pas être de la même nature que les autres pics d'émission.

Aussi ces différents graphiques montrent très nettement que l'intensité des pics d'émission est dépendante de la nature des ions irradiant l'échantillon. Ceci n'est pas une surprise si l'on considère les simulations du chapitre 4, et principalement les courbes de dE/dx . Plus un ion sera lourd, moins il se propage dans l'échantillon, plus il dépose d'énergie localement. En fait, il est plus probable que l'intensité d'émission soit proportionnelle à la dose que reçoit l'échantillon, la dose étant l'unité de mesure d'énergie par unité de volume. Aussi, la forme des pics peut différer selon le graphique cela est justifié par le bruit qui demeure élevé. Ce bruit est justifié par la faiblesse du signal émis, par l'électronique employée pour observer le signal, ainsi que les quelques variations d'intensité du faisceau d'ions.

Ainsi qu'on peut le voir sur la figure 5.6, l'intensité d'émission du pic infrarouge à 1064 nm est proportionnelle à la dose absorbée. La mesure présentée fut réalisée avec une exposition à des ions ${}^{12}C^{++}$ à une énergie de 8.4 MeV, sur un échantillon de 0.0015 cm^3 avec une densité de 2.3 g/cm^3 . Le montage utilisé est présenté à la figure 5.8.

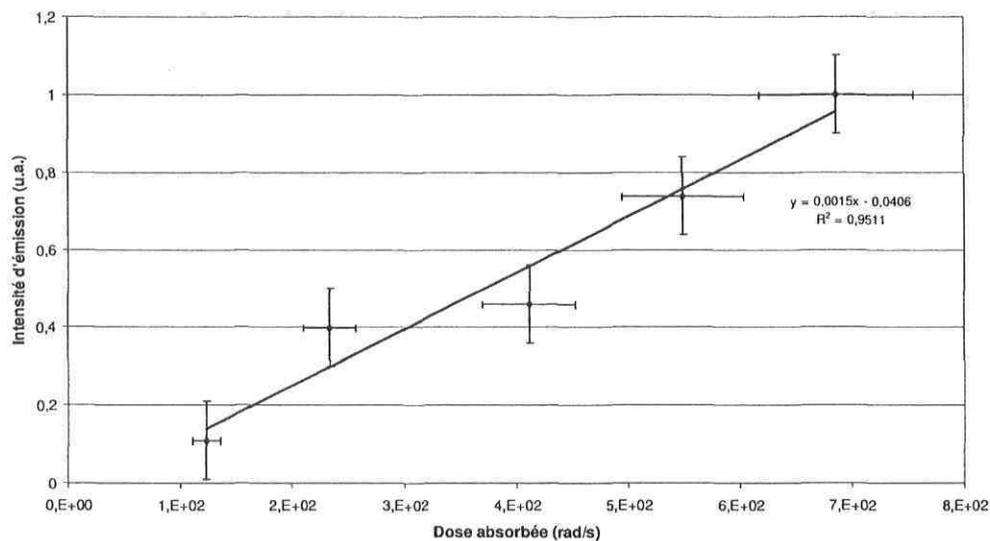


Figure 5.6 : Intensité d'émission du NdIV:ED2 dans l'infrarouge en fonction de la dose de radiation absorbée.

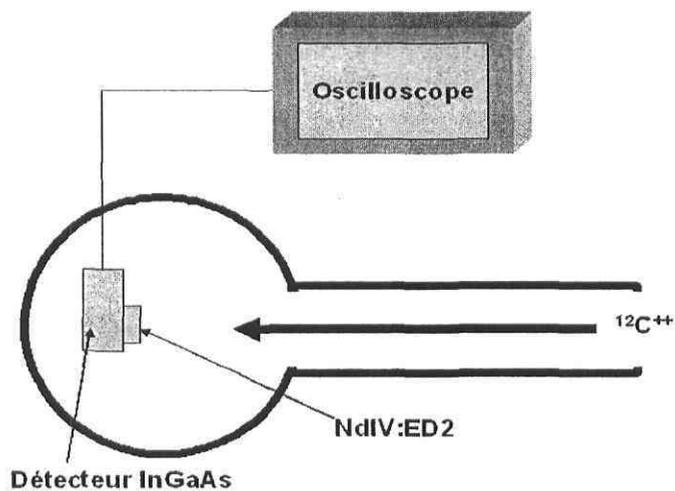


Figure 5.7 : Mesure d'intensité d'émission dans l'infrarouge.

Il est alors intéressant de comparer le spectre d'émission du NdIV:ED2 excité par radiation ionisante avec le spectre du même matériau excité optiquement, présenté à la figure 5.8.

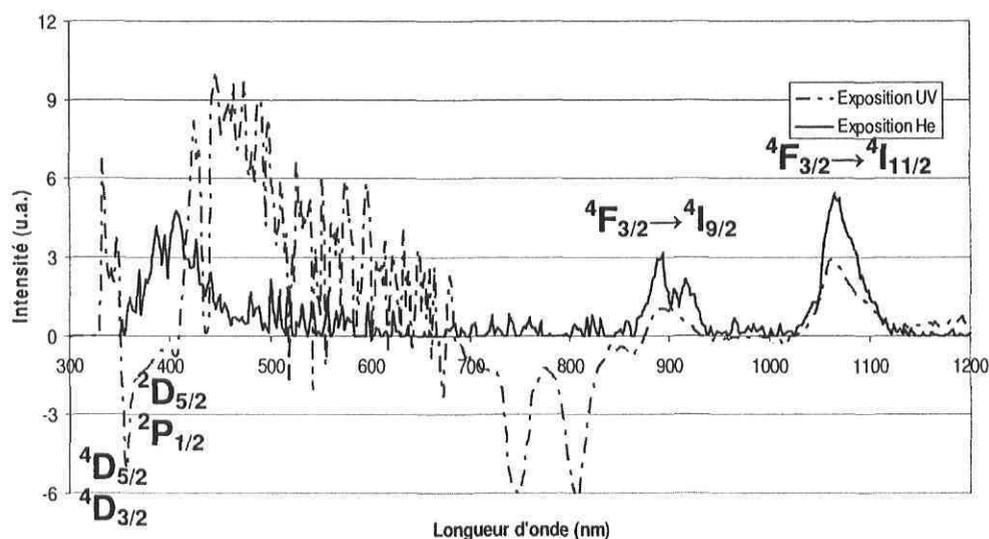


Figure 5.8 : Comparaison des spectres d'émission du NdIV:ED2 exposé à une excitation UV et à une excitation ionisante (He).

La superposition de ces deux graphiques nous permet de constater que les hauteurs relatives de nos deux pics infrarouges à 880 nm et à 1064 nm demeurent équivalentes; cependant, l'émission UV-bleue est beaucoup plus importante dans le cas du pompage UV, ce phénomène est probablement dû à la lampe utilisée. En effet, celle-ci étant de qualité très moyenne (cf chapitre 3), il était difficile d'obtenir un spectre constant, ce qui a très certainement nuit au traitement du spectre de transmission.

Ce qui demeure primordial c'est que nous voyons clairement la concordance des pics d'absorption du NdIV à 350 nm du spectre d'émission sous pompage UV avec la zone d'émission UV-bleue du spectre d'émission sous pompage ionique. Ceci nous conforte bien que, si le matériau non dopé émet de l'UV sous excitation ionisante, les ions trivalents de néodyme dans le matériau dopé peuvent absorber ces photons et sont excités de cette manière. Bien sûr il demeure toujours la probabilité que les ions de néodyme puissent être directement excités par les projectiles (H, He ou C), mais celle-ci répond à une section efficace beaucoup trop faible pour qu'elle soit observable quantitativement.

Une autre donnée pertinente est la fatigue que subit le matériau sous l'exposition ionique. En effet, les ions incidents peuvent d'une part altérer la surface, d'autre part modifier la composition chimique du matériau par implantation ionique, la modification chimique du matériau pouvant modifier le spectre d'émission. C'est pourquoi une mesure de l'intensité d'émission dans l'infrarouge a été réalisée pour évaluer sa dépendance en dose absorbée totale, et est présentée sur la figure 5.9.

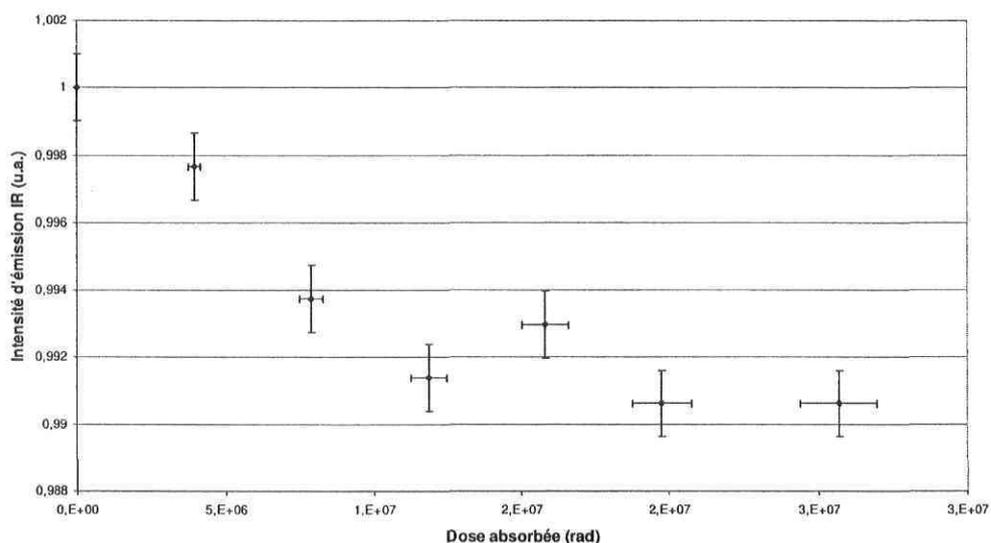


Figure 5.9 : Fatigue du NdIV:ED2 irradié au $^{12}\text{C}^{++}$ à 4.2 MeV, à une intensité de 0.5 μA ou $1.6 \cdot 10^{12}$ ions/s.

On observe bien un phénomène de fatigue, de diminution de l'intensité d'émission infrarouge du matériau, mais cette fatigue est plutôt faible. En effet, l'exposition a été réalisée avec des ions de $^{12}\text{C}^{++}$ afin d'augmenter la dose absorbée, le volume irradié devenant plus petit de par la faible profondeur de pénétration de cet ion. On constate surtout qu'à une dose absorbée de 3×10^7 rad l'émission de lumière ne s'est atténuée que de 1%. Finalement, nous notons aussi que l'atténuation de l'émission semble stagner à partir d'une certaine dose absorbée.

Des images au microscope à force atomique (AFM), présentées aux figures 5.10 et 5.11, ont été prises avant et après cette expérience, afin de constater l'impact du traitement sur la surface de l'échantillon.

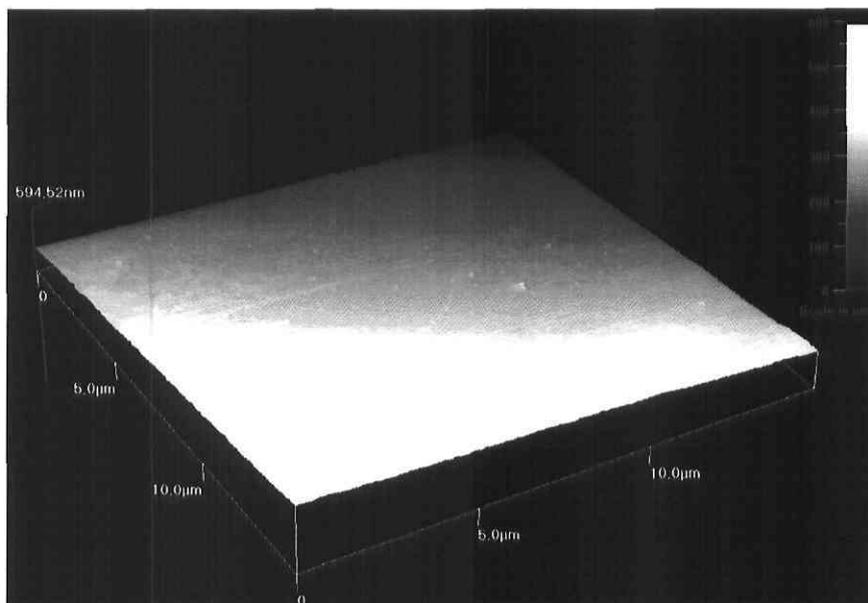


Figure 5.10 : Image AFM de la surface de l'échantillon de NdIV:ED2 avant exposition au $^{12}\text{C}^{++}$.

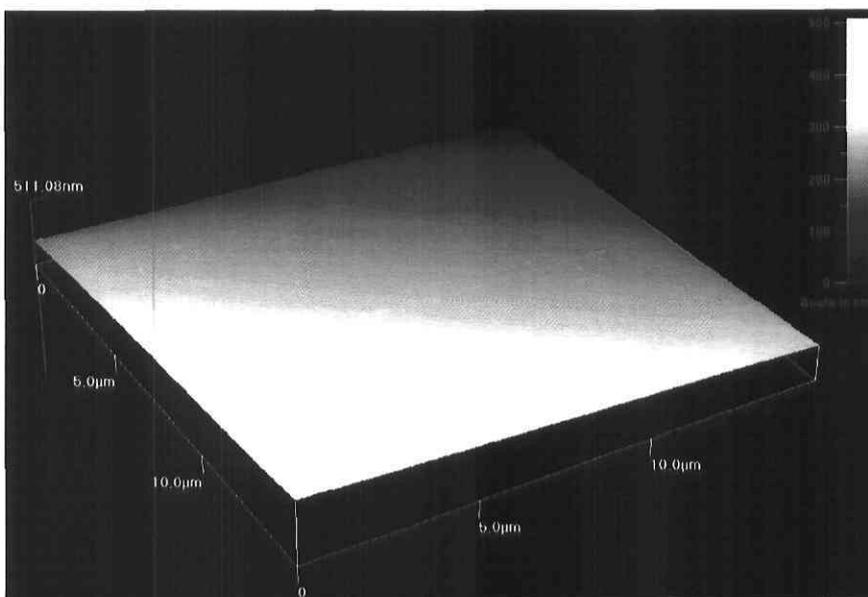


Figure 5.11 : Image AFM de l'échantillon de NdIV:ED2 après exposition au $^{12}\text{C}^{++}$ à 4.2 MeV et 0.15 μA , pour une dose absorbée de $3 \cdot 10^7$ rad.

On n'observe pas de différence significative entre ces deux images; les aspérités observées ont à peu près la même densité et la même amplitude. Il faut cependant noter que ces images n'ont pas pu être prises au même point, et qu'il n'est pas possible d'assurer que le polissage initialement effectué a été uniforme. Malgré cela, la qualité des surfaces observées avec l'AFM nous conforte sur le fait que l'exposition ionique n'altère pas significativement la surface des échantillons.

Nous pouvons donc conclure que la légère baisse d'intensité d'émission, observée sur la figure 5.9, est due à une modification de la composition stœchiométrique du matériau, plutôt que d'un dépôt en surface. Cependant, peut-être qu'à des doses absorbées plus élevées nous verrions apparaître ce phénomène⁶.

5.2.2. Spectre d'émission du ErIV:VP excité par radiation ionisante, dépendance en dose et comparaison avec le spectre d'émission par excitation optique

Les spectres d'émission du verre poreux dopé d'ions trivalents d'erbium (ErIV:VP) sont présentés sur les figures 5.12 à 5.15.

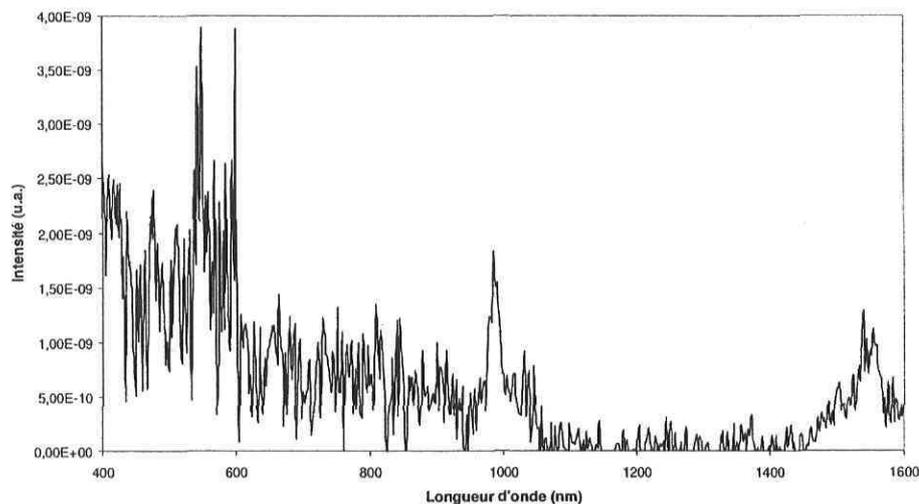


Figure 5.12 : Spectre d'émission du ErIV:VP irradié par des ions de H_2^+ à 4.2 MeV.

⁶ Une étude plus approfondie avec des doses plus élevées aurait été intéressante, malheureusement les moyens technologiques à notre disposition ne le permettaient pas.

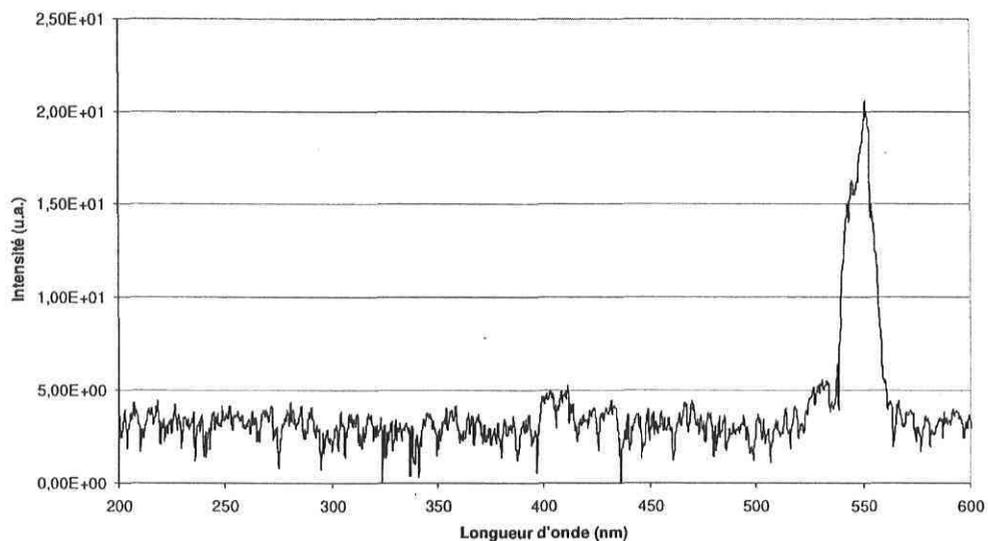


Figure 5.13 : Spectre d'émission du ErIV :VP irradié par des ions de H_2^+ à 4.2 MeV prise au spectromètre UV-visible.

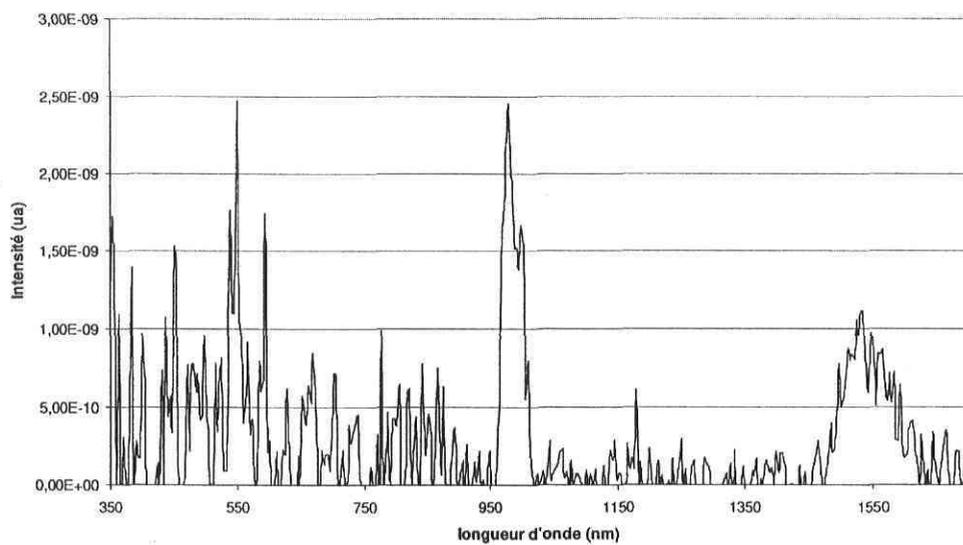


Figure 5.14 : Spectre d'émission du ErIV:VP irradié par des ions de $^4He^{++}$ à 8.4 MeV.

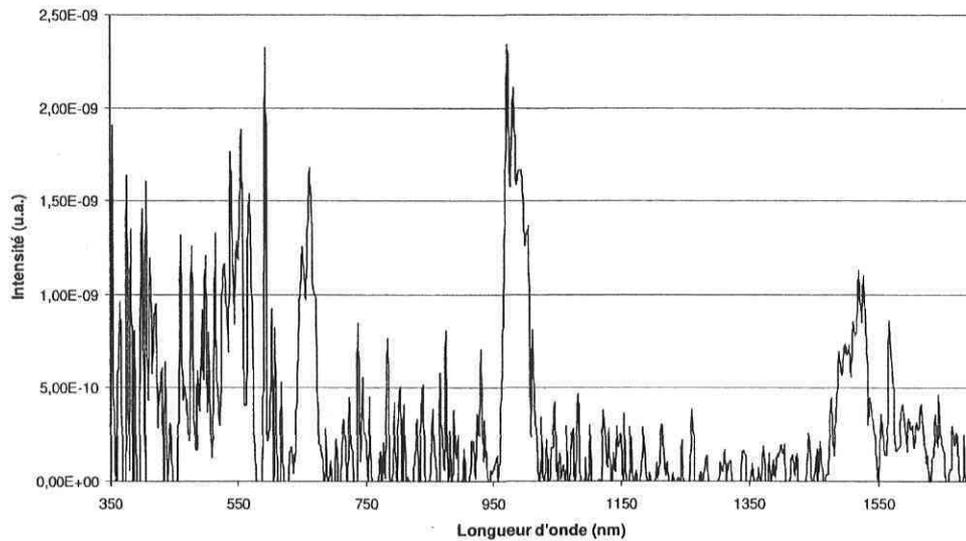


Figure 5.15 : Spectre d'émission du ErIV:VP irradié par des ions de $^{12}\text{C}^{++}$ à 8.4 MeV.

Des graphiques 5.12, 5.14 et 5.15, nous pouvons observer clairement différentes zones d'émission, que l'on peut comparer avec les niveaux d'énergie du ErIV présentés au chapitre 3 :

- 1) Le premier pic, en partant de la droite, est la transition $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ qui émet des photons à 1550 nm, cette transition est bien connue puisqu'il s'agit de celle utilisée dans les technologies de télécommunications.
- 2) Le deuxième pic, à 980 nm, d'une hauteur relative 2.5 fois supérieure à la précédente, est la transition $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$.
- 3) Finalement, d'une hauteur relative similaire au précédent pic, on observe la transition $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, à 550 nm. Ce pic d'émission est principalement observable sur la figure 5.13.
- 4) On peut également vaguement discerner la transition $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, à 650 nm sur le figure 5.14, et cette transition est évidente sur la figure 5.15. Il

est intéressant de constater l'évolution de ce pic par les figures 5.12, 5.14 et 5.15, qui semble vraiment indiquer une dépendance à l'égard de la particule incidente, donc certainement liée à la dose absorbée. Cette étude pour le cas de la transition à 1550 nm est présentée plus loin, mais n'a pas été réalisée pour cette transition à 650 nm, cette transition se situant dans une zone mal définie des spectromètres utilisés.

Le problème récurrent de toutes ces mesures est que l'analyseur de spectre optique utilisé avait une très faible sensibilité et résolution de 350 nm à 700 nm, ce qui explique le bruit sur ces graphiques. L'utilisation d'un spectromètre UV-visible permet d'observer de 250 nm à 600 nm, il demeure donc une plage d'une centaine de nm qui demeure mal observée d'une part, et aussi une incapacité d'évaluer les intensités relatives entre un pic dans la zone 250-600 nm et un dans la zone 700+ nm.

Là encore, une mesure d'intensité d'émission infrarouge dépendante de la dose a été effectuée, et est présentée sur la figure 5.16.

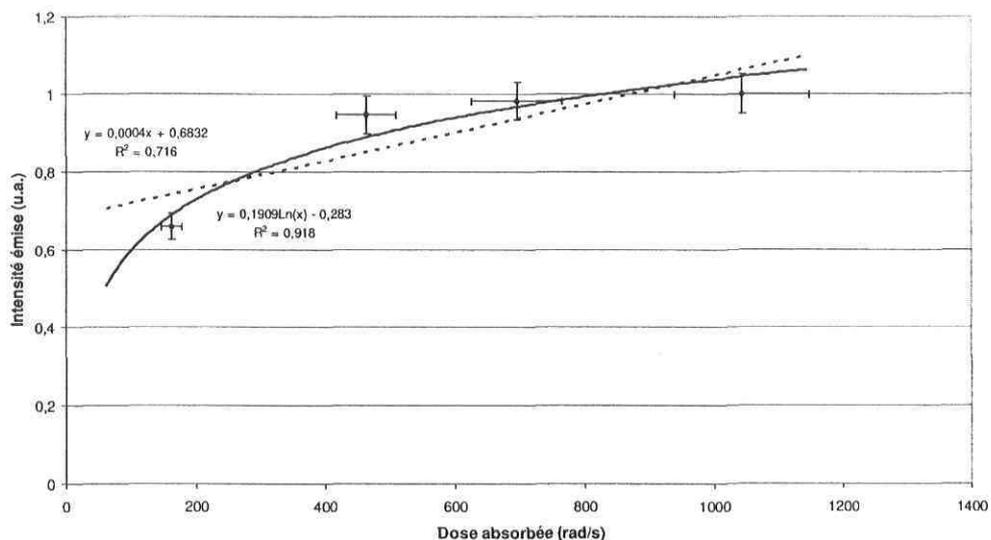


Figure 5.16 : Intensité d'émission dans l'infrarouge en fonction de la dose de radiation absorbée dans l'ErIV:VP.

Sur la figure 5.16, l'intensité d'émission du pic infrarouge à 1550 nm est fonction de la dose absorbée. La mesure présentée fut réalisée avec une exposition à des ions $^{12}\text{C}^{++}$ à une énergie de 4.2 MeV, sur un échantillon⁷ de 0.0015 cm^3 avec une densité de 1.2 g/cm^3 . Cependant, contrairement au cas NdIV:ED2, la fonction résultante n'est pas linéaire, le meilleur lissage étant une courbe logarithmique. Ceci nous porte à penser que nous saturons l'émission par nos ions. Il faut insister ici sur le fait que l'expérimentateur a pris soin de s'assurer que le détecteur ne saturait pas! Aussi, en considérant le lissage linéaire, la pente de la droite est bien inférieure dans le cas de l'ErIV:VP à celui du NdIV:VP, ce qui tend à confirmer la saturation du verre poreux.

Comparons maintenant les spectres d'émission de l'ErIV:VP excité optiquement et excité par ions, par la figure 5.17.

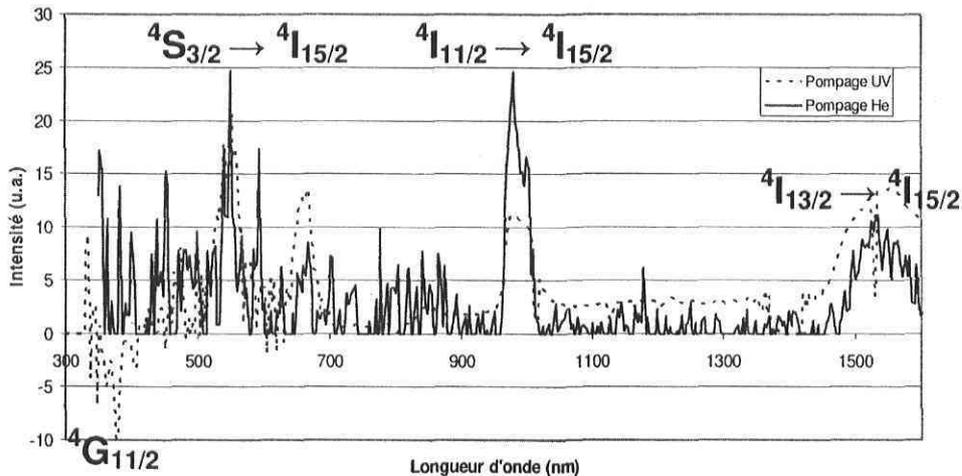


Figure 5.17 : Comparaison des spectres d'émission du ErIV:VP exposé à une excitation UV et à une excitation ionisante (He).

Nous observons une parfaite concordance en ce qui concerne la position des pics d'émission entre l'excitation par ions et l'excitation optique : la transition $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$

⁷ Le volume a été calculé en se basant sur la surface exposée (mesurée) ainsi que sur la profondeur de pénétration calculée avec le logiciel SRIM2003 (cf. 4.3.1.), l'échantillon utilisé s'approximant à un cylindre de 1 cm de diamètre et de 1 cm de hauteur.

qui émet des photons à 1550 nm, la transition ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ à 980 nm, la transition ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, à 650 nm, la transition ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ à 550 nm.

Là encore nous voyons des pics d'absorption dans l'UV proche et le bleu. Cependant, contrairement au cas du NdIV:ED2, nous n'observons pas non plus d'émission dans cette zone, donc les ions d'erbium sont soit excités différemment, soit excités optiquement mais à des longueurs d'onde plus courtes. Ceci est en fait fortement probable. Tout d'abord, le matériel utilisé (OSA, spectromètre et fibres optiques) ne permet pas d'observer en dessous de 300 nm, alors que de nombreux scintillateurs émettent en dessous de cette limite (cf. chapitre 2). D'autres part, comme on le voit au chapitre 4 de cette thèse, selon les simulations Geant4, la zone de dépôt d'énergie dans ce matériau s'étend autour de 200 ± 50 nm, ce qui demeure au-dessous des 300 nm minimum pour observer le phénomène.

Seul le NdIV:ED2 permet de conclure sur la réalité d'une fluorescence induite par radioluminescence. Quoi qu'il en soit, l'émission radiative des ions d'ErIV ne peut pas être due à la propagation des excitons dans le verre poreux. La radioluminescence est ici provoquée par la désexcitation moléculaire, ces photons pouvant exciter les ions d'erbium.

Une dernière hypothèse serait envisageable. Si le verre poreux a un comportement très proche du ZBLAN, alors nous pourrions espérer une émission autour de 330 nm. Or cela correspond à une zone de forte absorption de l'erbium, principalement du niveau ${}^4G_{11/2}$. Il n'est donc pas impossible que la radioluminescence du verre poreux se situe dans cette portion du spectre optique, mais soit absorbée par les ions d'ErIV très rapidement. Le seul moyen de vérifier cette hypothèse serait d'avoir un échantillon témoin de verre poreux non dopé et d'observer son spectre d'émission; malheureusement un tel échantillon n'était pas disponible.

La figure 5.18 présente la mesure de fatigue réalisée pour l'émission infrarouge.

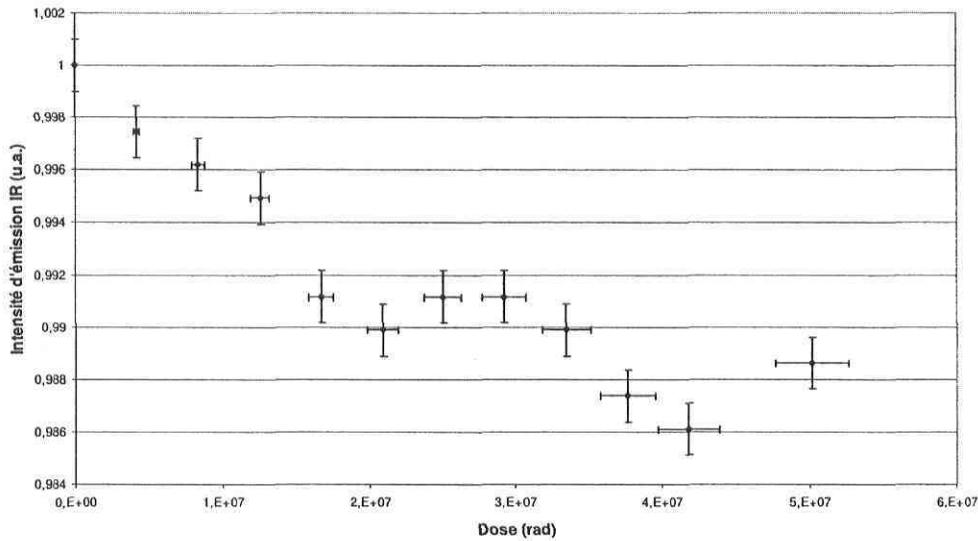


Figure 5.18 : Fatigue du ErIV:VP irradié au $^{12}\text{C}^{++}$ à 4.2 MeV, à une intensité de 0.5 μA ou 1.6×10^{12} ions/s.

Nous observons exactement le même comportement que dans le cas du NdIV:ED2 : la fatigue du matériau irradié est négligeable à l'échelle de la dose absorbée. Ceci demeure un paramètre très intéressant pour d'éventuelles applications. En effet, dans le cas présent, tout comme dans celui du NdIV:ED2, l'échantillon a été exposé à un faisceau de $^{12}\text{C}^{++}$ à 4.2 MeV de 0.5 μrad durant plusieurs minutes.

5.2.3. Spectre d'émission du Ti:Sa excité par radiation ionisante, et comparaison avec le spectre d'émission par excitation optique.

La figure 5.19 montre le spectre d'émission du titane:saphir (Ti:Sa).

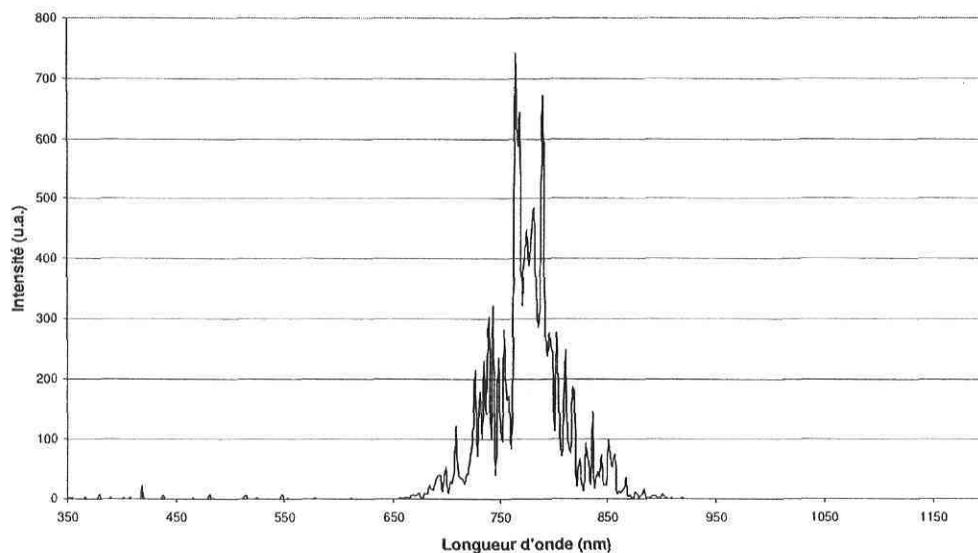


Figure 5.19 : Spectre d'émission du Ti:Sa irradié au H_2^+ à 4.2 MeV.

Malheureusement il n'a pas été possible de reproduire⁸ les expériences d'irradiation au $^4He^{++}$ et au $^{12}C^{++}$ sur l'échantillon de Ti:Sa. Quoiqu'il en soit, comme précédemment mentionné au chapitre 3, l'intérêt de cet échantillon est de faire une comparaison avec un échantillon présentant une structure cristalline, à la différence du NdIV:ED2 et du ErIV:VP.

Aussi, le Ti:Sa réagit plutôt mal à une exposition UV; des expériences à ce niveau n'ont donné aucun résultat. Cela démontre déjà que le Ti:Sa ne répond pas de la même façon que les verres dopés de lanthanides. Déjà, le titane ne présente pas autant de transitions que l'on peut observer dans les terres rares, puisque pour ces derniers ces transitions

⁸ Les ions sont choisis à partir de l'ionisation de certains gaz contenus dans des bonbonnes; il y a dans le Van de Graaff deux séries de bonbonnes de gaz, la valve, permettant d'accéder à la deuxième série contenant entre autres le CO_2 et le 4He , ne fonctionnait plus pour des raisons indéterminées et il était impossible de la réparer, celle-ci se trouvant dans la cloche. Aussi, dans la première série de bonbonne de gaz il ne restait plus que du H_2 , c'est pourquoi les expériences ne furent achevées qu'avec les ions de H.

dépendent des inversions des niveaux atomiques, ce qui justifie qu'elles soient présentes à basse énergie, i.e. dans le spectre visible. Cependant, il demeure possible de comparer le spectre d'émission par excitation par des ions avec le spectre d'émission par excitation optique, celle-ci étant réalisée avec un laser, comme présenté au chapitre 3. Cette comparaison est présentée à la figure 5.20.

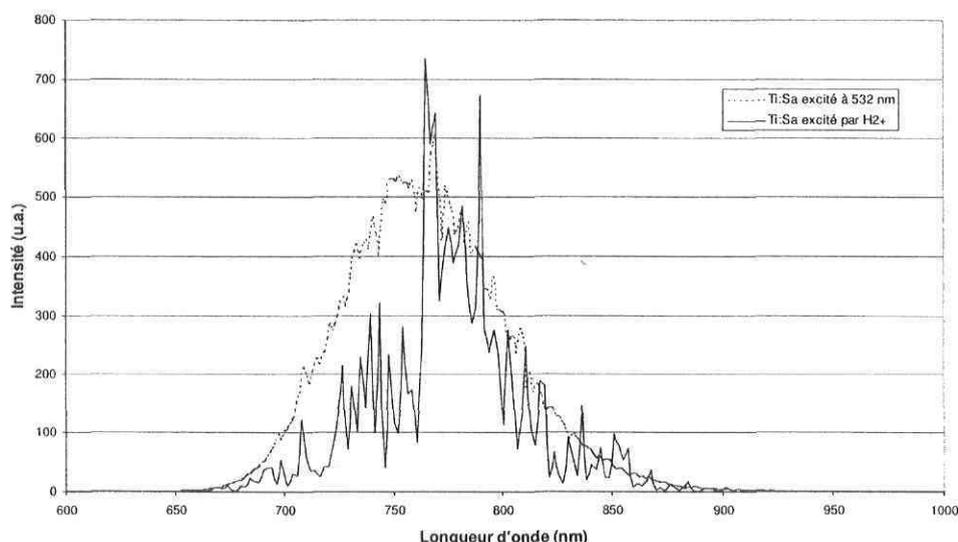


Figure 5.20 : Comparaison des spectres d'émission du Ti:Sa exposé à une excitation verdi (532 nm) et à une excitation ionisante (H).

La largeur de luminescence (650 - 900 nm) demeure inchangée. Cependant, la forme du spectre est passablement modifiée selon que l'excitation soit optique ou par particules ionisantes. Ce fait est d'autant plus intéressant que l'on n'observe pas ce phénomène pour les émissions ioniques des autres matériaux, le seul équivalent étant la radioluminescence UV-bleue du NdIV:ED2. D'une certaine manière, cela nous démontre que, pour un matériau à structure cristalline propageant donc des excitons, le processus de radioluminescence est différent de celui des matériaux n'ayant pas de structure cristalline. Les ions de néodyme et d'erbium des matériaux précédents ne peuvent donc pas relaxer un exciton et donc leur fluorescence doit être décrite différemment comme le souligne Wojtovic [3]. Encore une fois cela tend à démontrer que les verres dopés émettent une

radioluminescence qui excite les niveaux atomiques des ions trivalents de terres rares leur permettant de relaxer par leurs processus radiatifs habituels.

5.3. Temps de vie

Entre autres mesures importantes pour évaluer les applications potentielles, il y a les mesures de temps de vie de la fluorescence. En effet, si celui-ci est très court, des applications comme moyen de détection sont envisageables. À l'inverse des temps de vie plus longs simplifient l'inversion de population pour obtenir des lasers. Les temps de vie des matériaux utilisés (NdIV:ED2, ErIV:VP, Ti:Sa) sont connus lorsqu'ils sont pompés optiquement. Cependant il n'est pas assuré que ce soit encore le cas lorsqu'ils sont pompés par des particules ionisantes. C'est pourquoi les mesures de temps de vie ont été effectuées et comparées. Pour ce faire, le montage de la figure 5.21 a été utilisé.

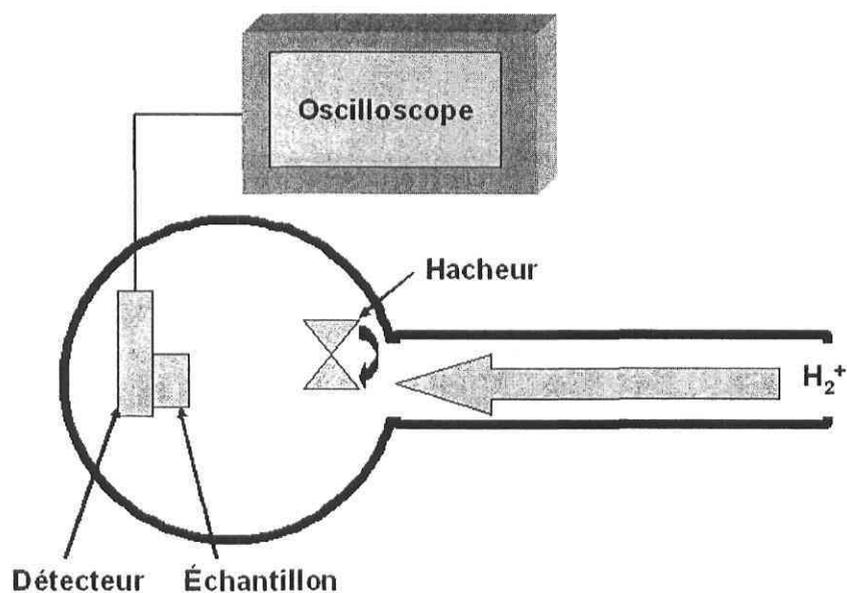


Figure 5.21 : Montage expérimental de mesures de temps de vie.

5.3.1. NdIV:ED2

Le NdIV:verre a un temps de vie admis de 0.3 ms [4-9], alors que le NdIV:YAG qui est un cristal a un temps de vie de 1.2 ms. Les résultats obtenus en exposant l'échantillon à un faisceau alterné de H_2^+ à 4.2 MeV de 15 nA sont présentés sur la figure 5.22.

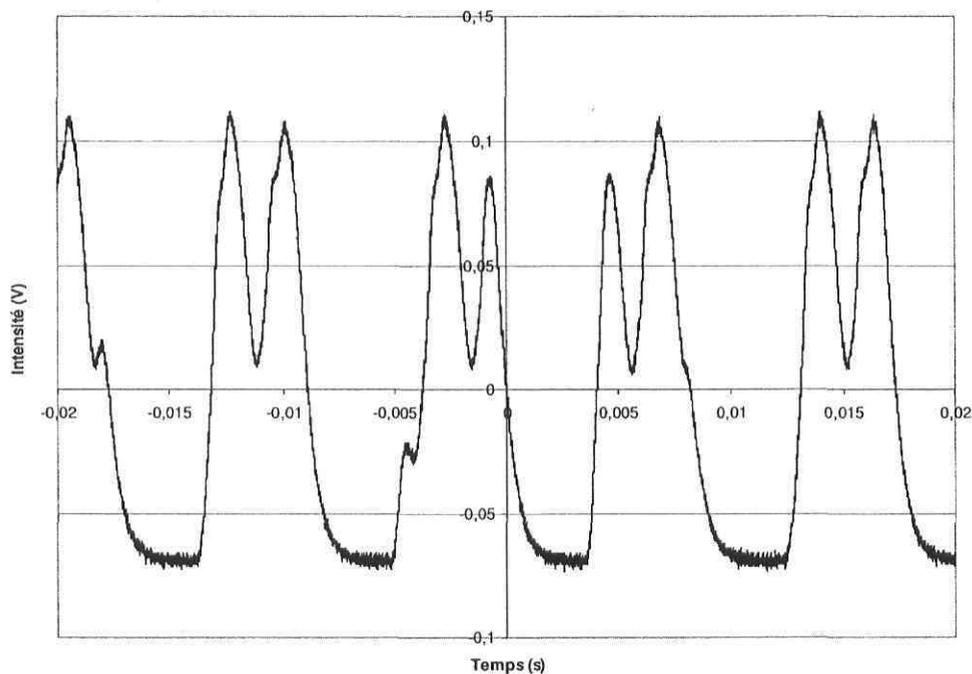


Figure 5.22 : Signal à l'oscilloscope de la fluorescence à 1064 nm du NdIV:ED2.

Nous pouvons donc prendre une section – ici de 8.5 à 11.5 ms – de ce signal correspondant à la relaxation du NdIV, et l'analyser en faisant un lissage en exponentielle décroissante pour en obtenir le temps de vie, selon l'équation :

$$I = A \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.1)$$

avec : A : amplitude du signal,

τ : temps de vie de la fluorescence.

L'analyse résultante est présentée à la figure 5.23.

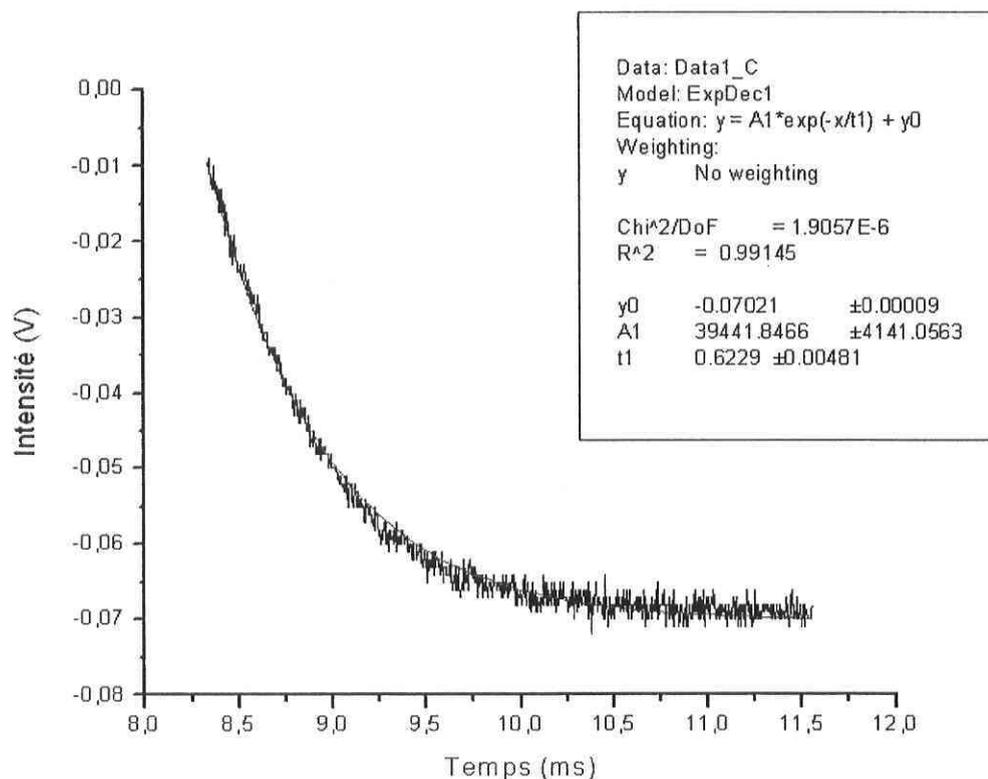


Figure 5.23 : Lissage exponentiel décroissant pour mesurer le temps de vie de la fluorescence IR du NdIV:ED2.

Nous obtenons donc un temps de vie de $623 \pm 5 \mu\text{s}$. Ce temps de vie est presque le double de la valeur admise. L'erreur est très basse et le coefficient de corrélation est très bon, à cela il faut considérer l'erreur systématique de $25 \mu\text{s}$ due au temps de coupage du faisceau. La valeur mesurée peut donc être considérée comme juste, bien qu'elle soit différente de la valeur admise, mais avec une incertitude plus élevée : $625 \pm 30 \mu\text{s}$. En considérant cette erreur systématique, les temps de vie mesurés pour une même intensité d'irradiation sont identiques.

Il est important à ce point de rappeler qu'il ne s'agit pas de fluorescence ordinaire, mais de fluorescence induite par radioluminescence, ce qui change le processus d'émission. Si la fluorescence est vraiment dépendante d'un autre processus, comme la

radioluminescence, nous devrions observer une dépendance en intensité du faisceau incident. Ceci fut mesuré et les résultats sont présentés à la figure 5.24.

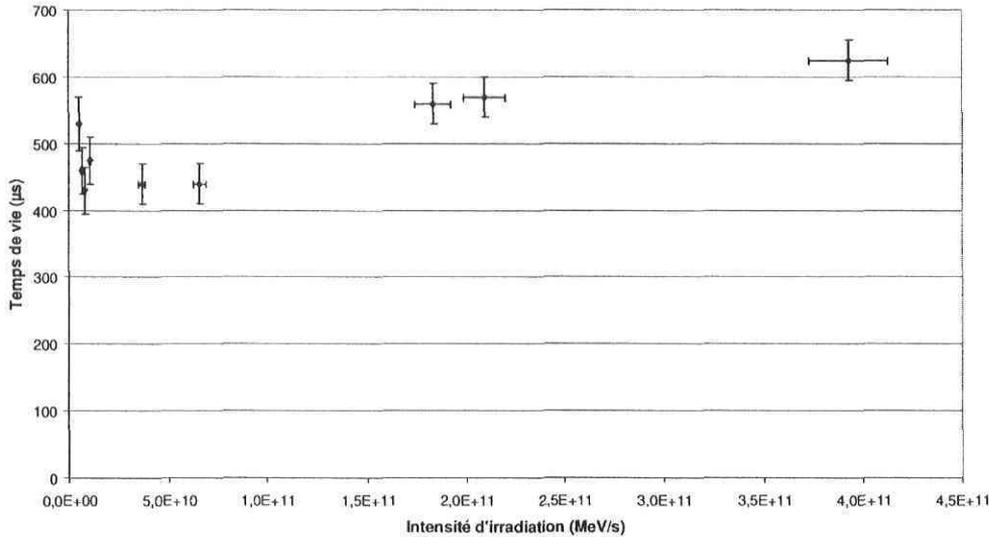


Figure 5.24 : Dépendance en intensité d'irradiation du temps de vie de la fluorescence à 1064 nm du NdIV:ED2.

On observe donc une dépendance en intensité du temps de vie de la fluorescence. Le temps de vie semble être d'environ $460 \pm 40 \mu\text{s}$ jusqu'à environ 10^{11} MeV/s , et ensuite le temps de vie augmente. En fait, il est envisageable que le matériau emmagasine l'énergie à partir d'un certain taux d'exposition. Ainsi, en dessous d'une certaine exposition, le matériau relaxe par son procédé de radioluminescence habituel et les photons UV-bleus sont absorbés par les ions de néodyme qui relaxent selon le procédé de fluorescence habituel. Par contre, au-dessus d'un certain taux d'exposition le matériau sature et emmagasine l'énergie, probablement thermiquement. Quand le faisceau d'ion est coupé le processus précédemment décrit continue mais en relaxant l'énergie emmagasinée.

Il est intéressant de noter que le temps de vie à basse intensité – $460 \mu\text{s}$ – est moins éloigné du temps de vie admis du NdIV:ED2, qu'à haute intensité. La différence pourrait être due au temps de vie de la radioluminescence du verre ED2, s'il s'agit de fluorescence induite par radioluminescence – plutôt que de radioluminescence – celle-ci excite les ions

trivalents de néodyme. C'est pourquoi des mesures de temps de vie de la radioluminescence UV-bleue ont été réalisées, et sont présentées à la figure 5.25.

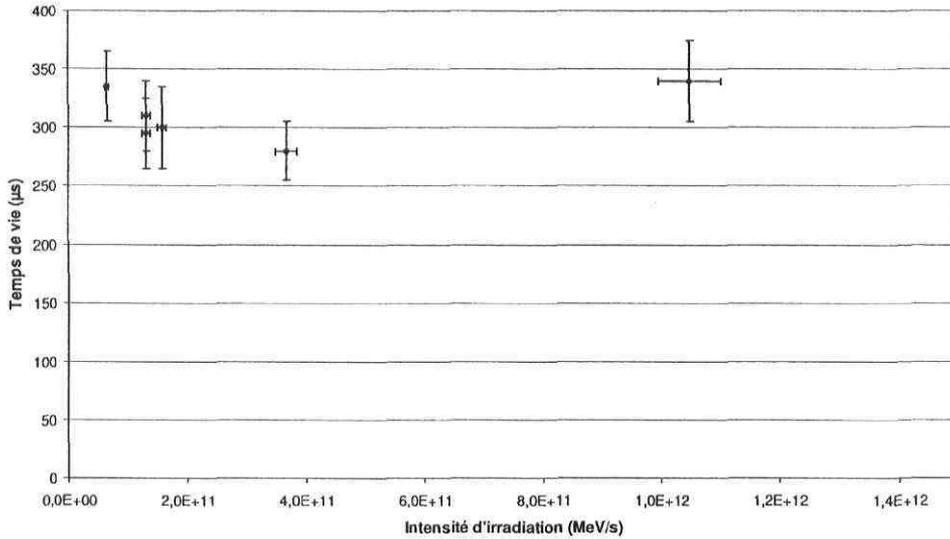


Figure 5.25 : Temps de vie de la radioluminescence UV-bleue (350 - 450 nm) du NdIV:ED2.

Nous observons le même phénomène que sur la figure 5.24, il est donc tout à fait envisageable que les deux luminescences soient liées.

Un point critique demeure la valeur de l'intensité de radiation; il était en effet assez délicat de s'assurer de l'intensité exacte du faisceau d'ions sur l'échantillon. Nous pouvons constater que le temps de vie de la fluorescence à 1064 nm à laquelle on soustrait le temps de vie de la radioluminescence UV-bleue correspond au temps de vie admis de la fluorescence à 1064 nm du NdIV:verre pour les intensités élevées. En effet, dans cette zone de grande intensité d'irradiation ($I > 5 \times 10^{11}$ MeV/s) la radioluminescence est de $340 \mu\text{s} \pm 35 \mu\text{s}$, celle de la fluorescence induite de $625 \pm 30 \mu\text{s}$, et la soustraction de la première à la seconde nous donne environ $285 \pm 45 \mu\text{s}$, ce qui correspond bien au temps de vie admis de la fluorescence à 1064 nm du NdIV:verre.

5.3.2. ErIV:VP

L'ErIV:VP a une fluorescence à 1550 nm dont le temps de vie a pour valeur admise de 10.0 ms [10, 11-16]. Des mesures de temps de vie ont été prises et les graphiques 5.26 et 5.27 donnent les résultats pour un faisceau d'ions H_2^+ de 10 nA à 4.2 MeV.

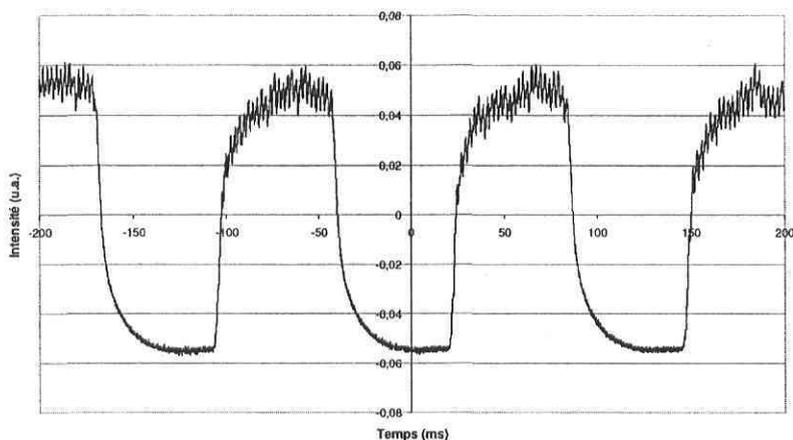


Figure 5.26 : Vue de l'oscilloscope de la mesure de temps de vie de la fluorescence à 1550 nm du ErIV:VP irradié par des H_2^+ à 4.2 MeV et 10 nA.

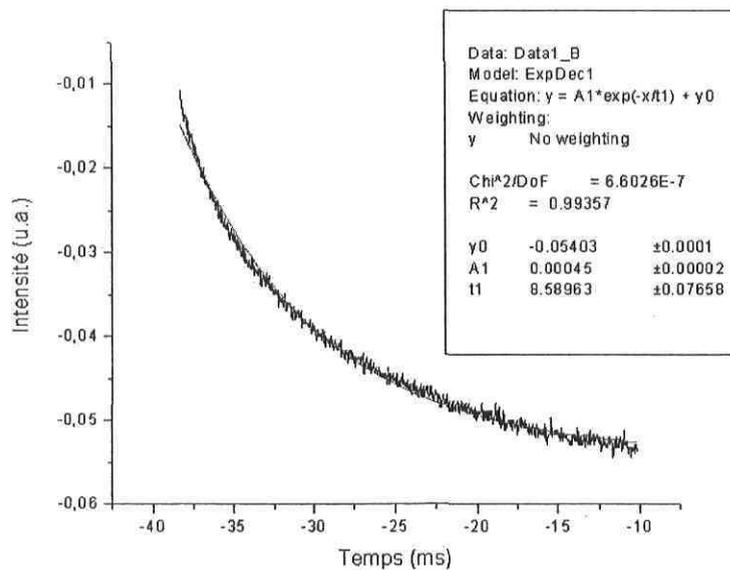


Figure 5.27 : Lissage exponentiel décroissant pour évaluer le temps de vie de la fluorescence à 1550 nm du ErIV:VP.

Là encore une étude de la dépendance en irradiation a été effectuée (figure 5.28).

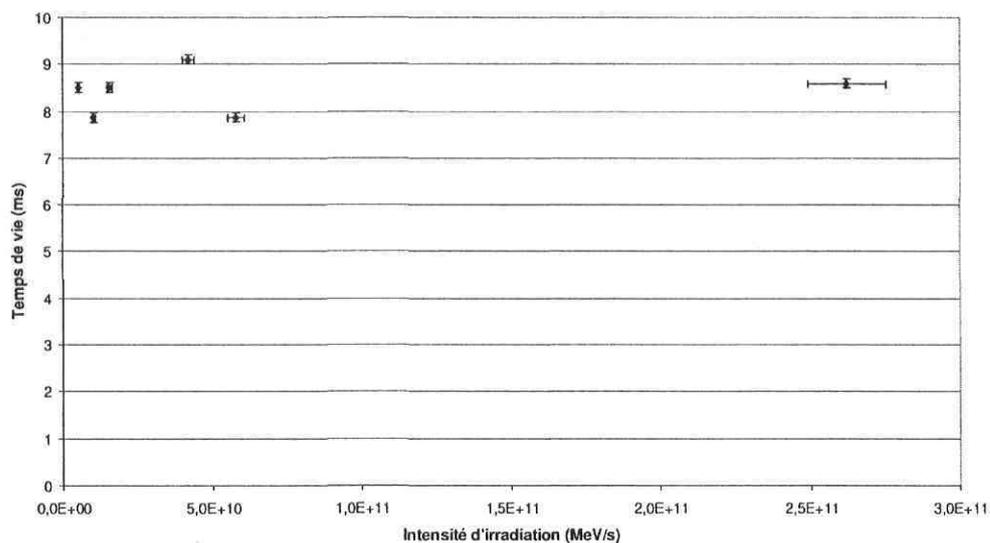


Figure 5.28 : Dépendance en intensité d'irradiation du temps de vie de la fluorescence à 1550 nm du ErIV:VP.

Il n'est pas envisageable de parvenir, de ce graphique, aux mêmes conclusions que dans le cas du NdIV:ED2. En effet, il manque de point à haute intensité d'une part, alors que l'intensité est déjà élevée pour le dernier point. Aussi la valeur moyenne de tous ces points est de : 8.4 ± 0.5 ms, ce qui demeure une valeur assez précise puisque cela donne une erreur relative de 6%. À titre de comparaison, le cas de la fluorescence à 1064 nm du NdIV:ED2 donnerait plutôt 500 ± 70 μ s, soit une erreur relative de 14%. Ces différences d'erreurs relatives montrent bien que si l'on peut admettre un temps de vie constant pour la fluorescence du ErIV:VP, il n'est pas adéquat d'en faire de même pour le NdIV:ED2.

5.3.3. Ti:Sa

Le Ti:Sa a une fluorescence de 650 à 900 nm dont le temps de vie a pour valeur admise $3.3 \mu\text{s}$ [10, 17-18]. Des mesures de temps de vie ont été également été prises (figures 5.29 et 5.30) pour un faisceau d'ions H_2^+ de 12.5 nA à 4.2 MeV.

Cependant comme la valeur admise est très faible le montage utilisé ne devrait pas permettre d'obtenir des résultats concluants, l'erreur systématique du montage étant de $25 \mu\text{s}$ c'est-à-dire plus que sept fois supérieure à la valeur admise. L'excitation étant ici ionique plutôt qu'optique, et considérant les écarts observés pour les autres échantillons (NdIV:ED2 et ErIV:VP), il est opportun de prendre cette mesure qui montre (figure 5.29 et 5.30) que le temps de vie de la luminescence du Ti:Sa est bien plus élevé lors d'une excitation ionique.

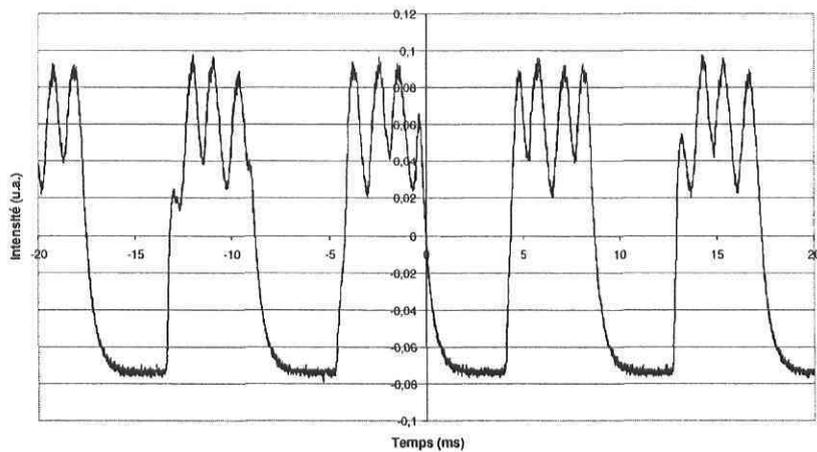


Figure 5.29 : Vue de l'oscilloscope de la mesure de temps de vie de la fluorescence IR du Ti :Sa irradié par des H_2^+ à 4.2 MeV et 12.5 nA.

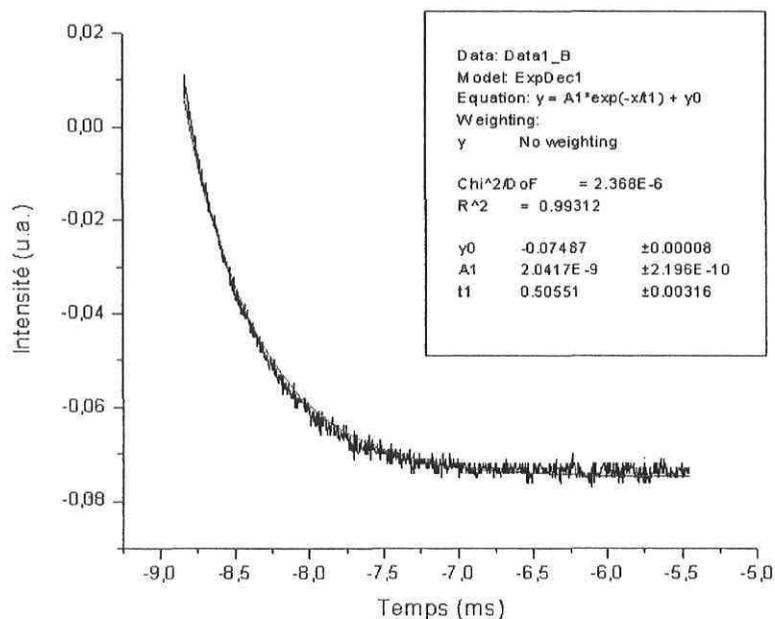


Figure 5.30 : Lissage exponentiel décroissant pour évaluer le temps de vie de la fluorescence en infrarouge du Ti:Sa.

On observe un temps de vie de la luminescence de $505 \pm 30 \mu\text{s}$, ce qui est franchement supérieur à la valeur admise de $3.3 \mu\text{s}$. Un tel écart ne peut se justifier par la démarche expérimentale. Il demeure que le mode d'excitation est très différent du pompage optique, nous avons ici une propagation d'exciton, alors que les désexcitations dues au pompage optique sont résultantes des interactions ions-ions. Cette différence montre bien que le phénomène décrivant la radioluminescence des matériaux à structure cristalline ne peut pas s'appliquer aux verres dopés tels que les matériaux précédemment utilisés.

Une étude de l'intensité de luminosité en fonction de l'intensité de pompage a également été effectuée, et est présentée en figure 5.31.

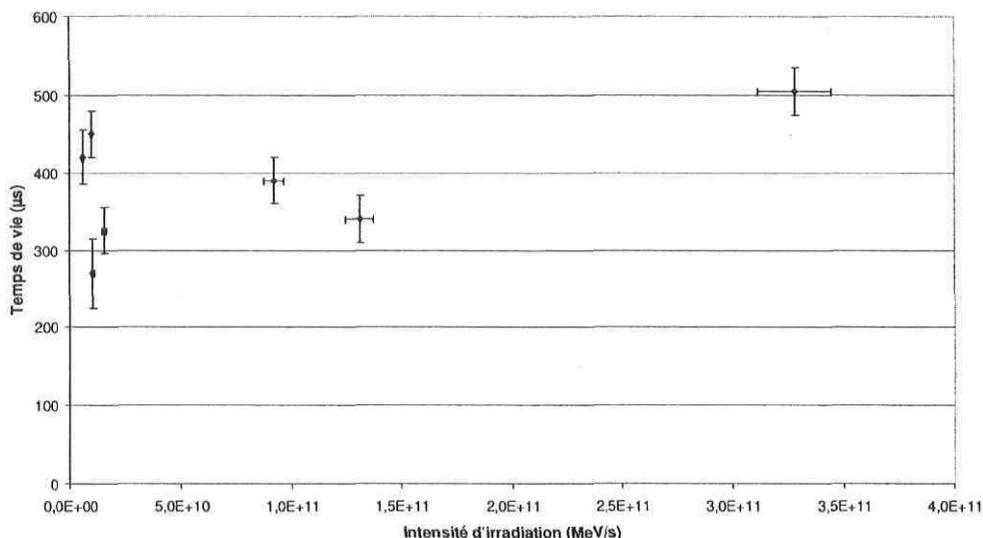


Figure 5.31 : Dépendance en intensité d'irradiation du temps de vie de la fluorescence en infrarouge du Ti:Sa.

Nous retrouvons ici un comportement similaire à ce que nous observions pour le NdIV:ED2. Il semble y avoir une dépendance en intensité d'irradiation à haute intensité, bien que comme dans le cas de l'ErIV:VP il manque de points à ce régime. Il demeure que le point à 3.3×10^{11} MeV/s est significativement plus élevé que les autres. La valeur moyenne et l'écart type – sur tout les points – pour la luminescence est cette fois de 385 ± 80 µs avec un erreur relative de 21%. Une telle erreur relative nous conforte sur le fait que la durée de vie de la luminescence ne peut pas être constante.

5.4. Synthèse de chapitre

L'étude de la radioluminescence de ces trois matériaux est aussi intéressante que surprenante. Tout d'abord, les spectres d'émission de fluorescence des verres dopés (1550 nm pour ErIV:VP et 1064 nm pour NdIV:ED2) montrent une excellente corrélation avec le pompage optique, alors que les spectres d'émission de radioluminescence (350 – 450 nm pour le NdIV:ED2 et 650 – 950 nm pour le Ti:Sa) diffèrent sensiblement, voire significativement, du pompage optique. Il est donc adéquat d'admettre que la

fluorescence des ions dopant les verres est probablement issue d'une excitation optique, et que celle-ci serait due à la radioluminescence propre aux verres.

Seul le NdIV:ED2 nous montre les deux spectres, soit celui de radioluminescence et celui de fluorescence des lanthanides, et une étude sur le temps de vie de ces luminescences semble bien indiquer qu'elles soient liées. Il est certain que l'utilisation d'un échantillon d'ED2 non dopé aurait permis d'identifier le phénomène définitivement, mais les éléments révélés par cette étude donne des arguments solides pour confirmer l'hypothèse de la fluorescence induite par radioluminescence.

L'étude du ErIV:VP ne permet malheureusement pas de tirer de telles conclusions. Là encore, l'usage d'un échantillon non dopé aurait certainement contribué à faciliter cette analyse. Il demeure indubitable cependant pour cet échantillon, comme pour le NdIV:ED2, que la fluorescence des ions ne peut pas être due à la propagation des excitons, ce qui est le cas du Ti:Sa. D'ailleurs l'étude de la radioluminescence de ce dernier matériau montre bien que, par les spectres et les temps de vie, l'excitation optique et l'excitation par faisceau d'ions amènent des résultats suffisamment différents pour ne pas confondre les phénomènes.

Si l'absence d'échantillons non dopés d'ED2 et de VP est un handicap pour cette étude, le fait d'avoir à disposition un échantillon de cristal dopé (Ti:Sa) aura permis de pouvoir comparer les différents procédés.

5.5. Références.

1. R.J. Van de Graaff, K.T. Compton et L.C. Van Atta, Phys. Rev. **43**, 149 (1933).
2. S.A. Holgate, T.H. Sloane, P.D. Townsend, *et al.*, J.Phys.-Condens. Mat. **6**, 9255 (1994).
3. A.J. Wojtowicz, Nucl. Instrum. Meth. Res. A **486**, 201 (2002).
4. B. Chen, N. Dong, Q.J. Zhang, *et al.*, J. Non-Cryst. Solids **341**, 53 (2004).

5. E. Biemont, P. Quinet, S. Svanberg, *et al.*, J. Phys. B- At. Mol Opt. **37**, 1381 (2004).
6. A.F.H. Librantz, L. Gomes, L.V.G. Tarelho, *et al.*, J. Appl. Phys. **95**, 1681 (2004).
7. L.C. Courrol, L.R.P. Kassab, V.D.D. Cacho, *et al.*, J. Lumin. **102**, 101 (2003).
8. V. Aruna, N.S. Hussain et N.V.V. Prasad, Indian J. Pure Ap. Phys. **41**, 206 (2003).
9. Y.L. Mao, Z.R. Sun, X.L. Jiang, *et al.*, Chinese Phys. **11**, 613 (2002).
10. B.E.A. Saleh et M.C. Teich, *Fundamentals of photonics*, (Wiley-interscience, New-York, 1991) ch.13.
11. G. Zhou, S.X. Dai, C.L. Yu, *et al.*, Spectrosc. Spec. Anal. **26**, 403 (2006).
12. C.G. Wu, L.Z. Yao et H.P. Xia, Chinese J. Chem. Phys. **18**, 218 (2005).
13. S. Todoroki et S. Inoue, Appl. Surf. Sci. **223**, 39 (2004).
14. W. Wang, H. Isshiki, S. Yugo, *et al.* J. Lumin. **87**, 319 (2000).
15. A. Lidgard, A. Polman, D.C. Jacobsen, *et al.*, Electron. Lett. **27**, 993 (1991).
16. T. Benyattou, D. Seghier, G. Guillot, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **58**, 2132 (1991).
17. L.M.B. Hickey, E. Martins, J.E. Roman, *et al.*, Opt. Lett. **21**, 597 (1996).
18. J.H. Liu, P.Z. Deng et F.X. Gan, Opt. Mater. **4**, 781 (1995).

Chapitre 6 : Applications potentielles

6.1. Introduction

Si les matériaux scintillateurs sont étudiés depuis plusieurs décennies, c'est bien pour les différentes applications qu'ils peuvent apporter, que ce soit en physique nucléaire, en physique médicale, ou autres [1-10]. L'intérêt particulier de la présente étude est que les scintillateurs étudiés présentent des spectres d'émission du visible jusqu'à l'infrarouge. Dans ce chapitre, deux applications potentielles sont étudiées, la première porte sur les lasers pompés par radiations ionisantes, et la deuxième sur les détecteurs de particules ionisantes.

6.2. Les lasers pompés par radiations ionisantes

6.2.1. Concepts de base sur les lasers

Les lasers sont des sources de lumière cohérente et généralement monochromatique. Le principe de base fut énoncé par Einstein [11] et porte sur l'émission spontanée et l'émission stimulée. Quand un atome est excité, sa désexcitation peut passer par des transitions atomiques radiatives, et un photon, d'énergie correspondant à la différence des niveaux d'énergie initial et final, peut être émis. C'est l'émission spontanée. Aussi, un photon ayant pour énergie l'énergie qui correspond à la différence de deux niveaux peut provoquer une émission stimulée, c'est-à-dire qu'il interagit avec l'atome excité et provoque sa désexcitation. La désexcitation de cet atome produit un photon qui aura la même énergie que le photon initial (correspondant à la différence des deux niveaux), ainsi que la même phase. C'est l'émission stimulée. Cependant, selon la distribution probabiliste de Boltzmann [12]:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}} \quad , \quad (6.1)$$

avec : n_2 et n_1 : la population des niveaux 1 et 2,
 E_2 et E_1 : l'énergie des niveaux 1 et 2,

T : la température,
 k : La constante de Boltzmann.

On voit donc qu'il ne peut y avoir plus d'électrons au niveau excité 2 qu'au niveau 1, à moins que la température ne soit négative (en °K). Pour obtenir l'effet laser, il faut que l'émission stimulée domine l'émission spontanée, et pour cela il faut obtenir une inversion de populations des niveaux 1 et 2. Ce problème est résolu avec un résonateur optique, et c'est d'ailleurs la géométrie de celui-ci qui donne le profil gaussien du faisceau laser. Le résonateur optique est constitué de deux miroirs de par et d'autre du milieu de gain, le premier miroir ayant une réflectivité de 100% à la longueur d'onde d'émission, et le deuxième ayant une réflectivité moindre afin de transmettre le faisceau laser.

L'un des miroirs, si ce n'est les deux, est concave afin d'obtenir une solution stable d'opération du résonateur, c'est-à-dire le faisceau Gaussien. Le graphique 6.1 illustre le mode de fonctionnement d'un laser.

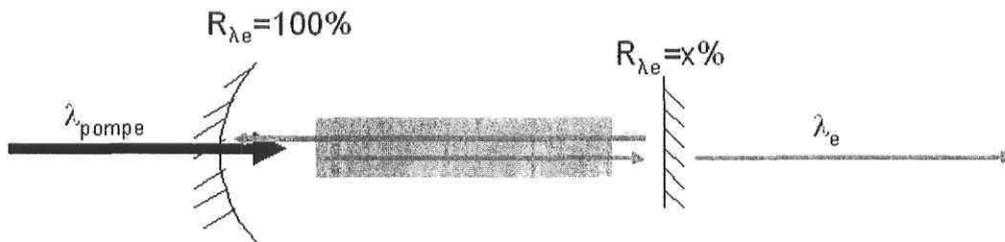


Figure 6.1 : Principe de fonctionnement du laser.

La pompe, qui est un autre laser sur la figure 6.1, excite le milieu actif du laser, et les éléments de celui-ci se désexcitent par des transitions potentiellement radiatives, c'est-à-dire par émission spontanée. Ces photons sont émis sur 4π stéradians. Cependant, certains d'entre eux sont réfléchis par les miroirs du résonateur. Leur retour dans le milieu actif force des émissions stimulées, et éventuellement l'inversion de population se produit et la production laser commence.

Il existe de nombreux ouvrages de référence sur la physique des lasers dont celui écrit par A.E. Siegman [13] qui demeure le plus complet. Les paramètres clefs pour obtenir l'effet laser sont :

- la durée de vie des niveaux concernés,
- la section efficace d'absorption de la pompe,
- la section efficace d'émission de la transition destinée à laser.

6.2.2. Modèle du laser pompé par radiation ionisante

Dans le cadre de cette étude deux matériaux étaient utilisables pour obtenir un effet laser : le NdIV:ED2 et le ErIV:VP. Cependant, les deux présentaient avantages et inconvénients.

Le NdIV:ED2 est un matériau très connu, qui a souvent été utilisé comme laser [14-15]. Son inconvénient majeur est que le temps de vie du niveau métastable ${}^4F_{3/2}$ est plutôt court, puisque la valeur admise est de 300 μ s. Aussi, ce matériau est surtout utilisé pour les lasers pulsés, ce qui n'était pas envisagé dans cette thèse. Un avantage certain de ce matériau est le fait que la transition radiative ne se fasse pas avec le niveau fondamental, on se retrouve alors dans la configuration d'un laser à quatre niveaux qui est plus facile à faire laser puisque l'inversion de populations se fait entre deux niveaux excités plutôt qu'entre un niveau excité et le niveau fondamental.

Le ErIV:VP est un matériau beaucoup moins connu, même s'il semble s'apparenter fortement au ErIV:ZBLAN. L'ion trivalent d'erbium présente plusieurs transitions radiatives, mais toutes se font avec le niveau fondamental. Il s'agit donc là de la configuration du laser à 3 niveaux, où l'inversion de population est plus difficile à atteindre. Bien que le verre poreux soit proche du ZBLAN, rien n'indique qu'il en ait toutes les propriétés. De fait ce matériau n'a jamais lasé et l'échantillon utilisé était un essai de l'INO, et n'avait vocation ni à laser ni à être irradié.

L'idée de base était donc de faire un co-pompage optique et radiation ionisante, sur le modèle du graphique 6.2.

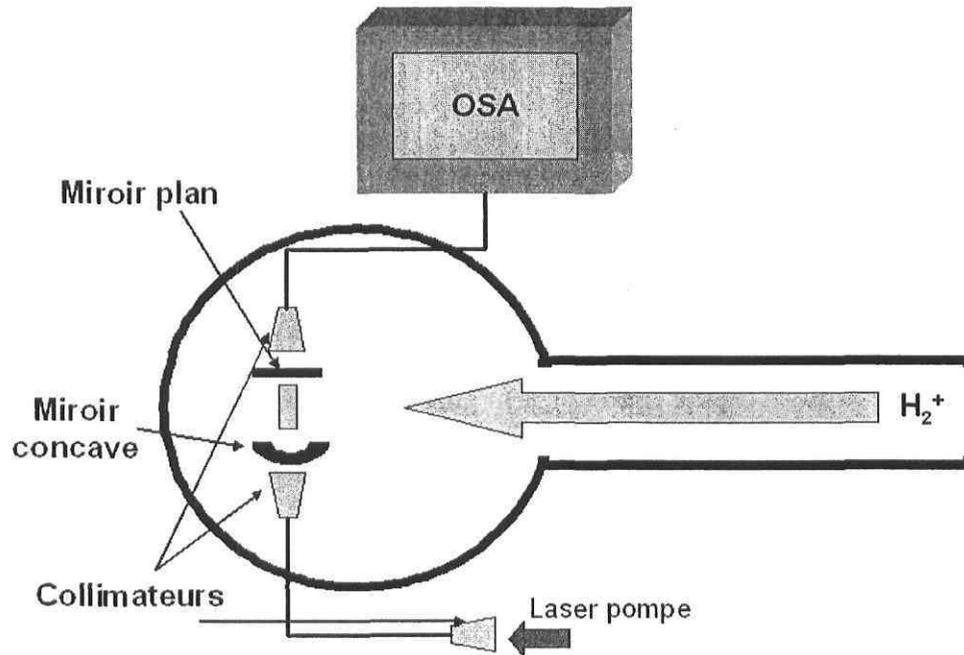


Figure 6.2 : Schéma du laser co-pompe optiquement et par radiation ionisante.

Le problème majeur pour réaliser un tel laser est l'alignement du résonateur. En effet, il s'agit là d'un alignement très subtil, dont la distance entre les miroirs doit être un multiple de la moitié de la longueur d'onde d'émission.

On a d'abord pensé mettre au point le laser pompé optiquement à l'extérieur de la chambre d'analyse de l'accélérateur van de Graaff, et d'ensuite l'y transférer une fois aligné. Mais cette méthode négligeait une donnée qui est généralement négligée : la différence d'indice de réfraction entre l'air et le vide. En effet, l'indice de réfraction de l'air est de $n_{\text{air}}=1.003$ et celui du vide $n_{\text{vide}}=1.000$, ce qui nous donne une différence $\Delta n=0.003$. La distance entre les deux miroirs était de 5 cm, dont 1 cm correspondant à

l'échantillon, il demeurait donc 4 cm de propagation hors de l'échantillon, soit un parcours optique de :

- dans l'air : $L_{air} = 4 \times n_{air} + l \times n_{\text{échantillon}}$ (cm), (6.2)

- dans le vide : $L_{vide} = 4 \times n_{vide} + l \times n_{\text{échantillon}}$ (cm), (6.3)

soit une différence de parcours optique :

$$\Delta L = L_{air} - L_{vide} = 4 \times \Delta n = 120 \mu m. \quad (6.4)$$

Considérant que les longueurs d'onde des lasers envisagés sont de 1064 nm pour le NdIV:ED2 et de 1550 nm pour le ErIV:VP, on comprend vite que le changement de milieu air \rightarrow vide désalignait automatiquement le résonateur. Il aurait donc fallu pouvoir aligner le résonateur dans le vide, ce qui aurait nécessité un appareillage dispendieux qui n'était malheureusement pas disponible.

6.2.3. Étude pour un laser pompé par radiation ionisante

Une expérience a été menée pour mesurer l'émission spontanée des échantillons exposés à une pompe laser et à des radiations ionisantes. Les résultats pour le NdIV:ED2 et l'ErIV:VP sont présentés dans les graphiques 6.3 et 6.4.

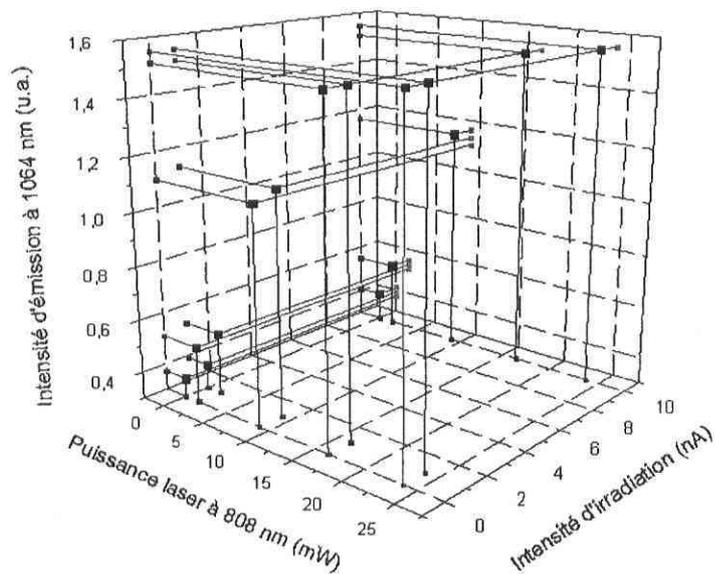


Figure 6.3 : Intensité d'émission IR du NdIV:ED2 exposé à une pompe laser à 808 nm et à une irradiation H_2^+ à 4.2 MeV.

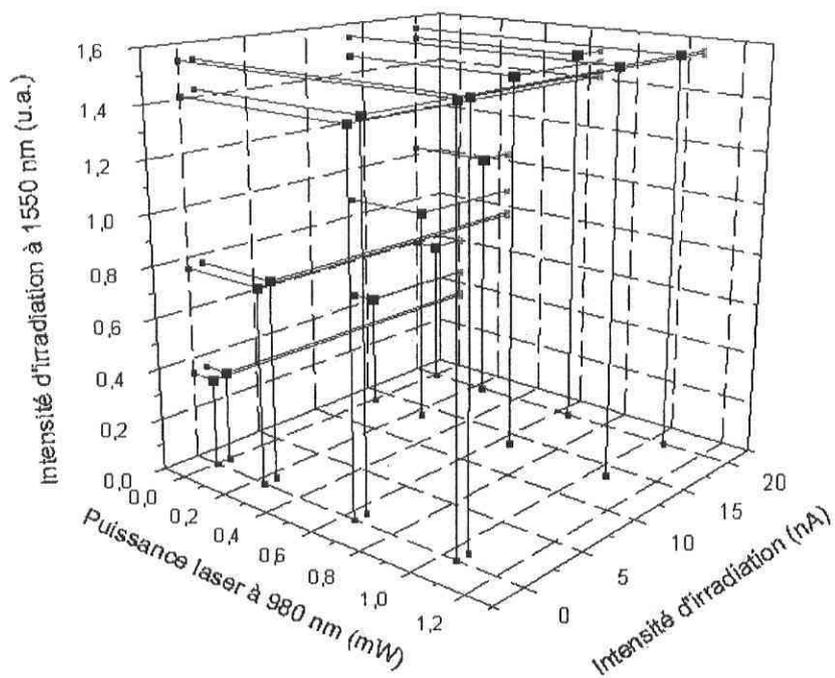


Figure 6.4 : Intensité d'émission IR du ErIV:VP exposé à une pompe laser à 980 nm et à une irradiation H_2^+ à 4.2 MeV.

Dans cette expérience, les caractéristiques dépendant des matériaux sont résumées dans le tableau 6.1.

	NdIV:ED2	ErIV:VP
Transition observée	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$
Longueur d'onde d'émission (nm)	1064 nm	1550 nm
Longueur d'onde de pompe (nm)	880 nm	980 nm

Tableau 6.1 : Caractéristiques dépendantes des matériaux pour l'étude comparative de pompage laser et irradiation H_2^+ .

On peut aussi reprendre les graphiques 6.3 et 6.4 sous forme bidimensionnelle.

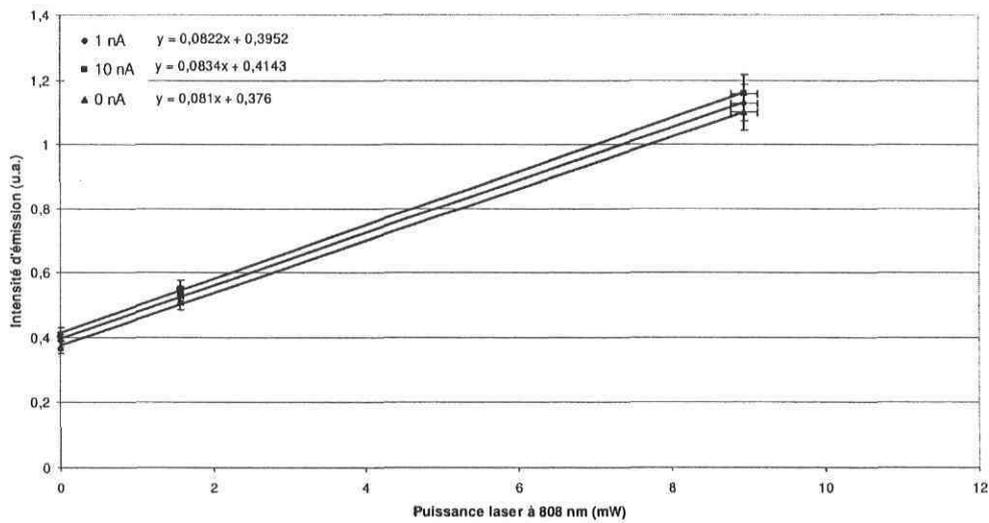


Figure 6.5 : Intensité d'émission du NdIV:ED2 en fonction de la puissance laser, pour différentes intensités d'irradiation.

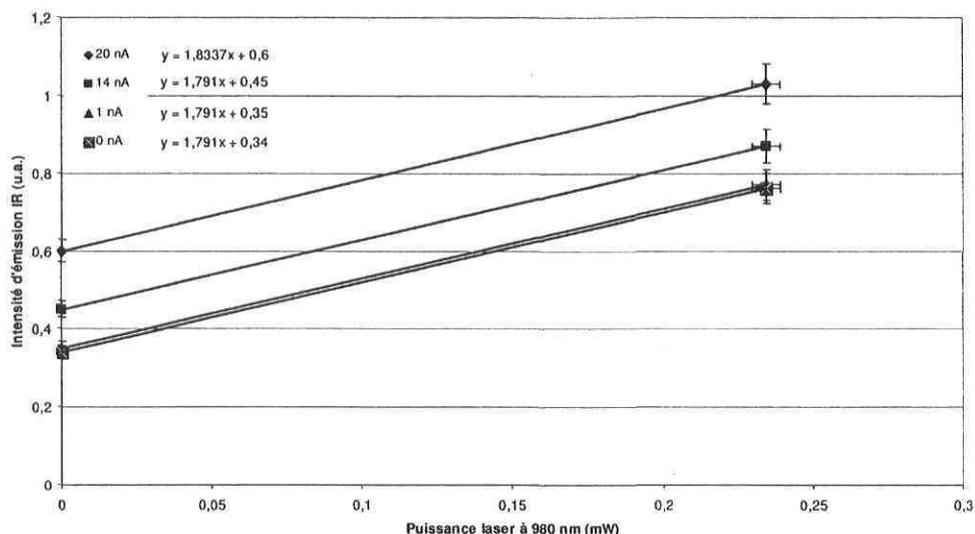


Figure 6.6 : Intensité d'émission du ErIV:VP en fonction de la puissance laser, pour différentes intensités d'irradiation.

Il y a plusieurs remarques intéressantes à faire à partir de ces graphiques. La première nous réfère aux figures 5.6 et 5.16 du chapitre précédent. En effet, les courbes ici présentées sont épurées des points aux limites de saturation du détecteur, et nous obtenons finalement des comportements similaires à ceux du chapitre 5.

Nous voyons que le NdIV:ED2 et le ErIV:VP présentent un comportement linéaire dans les limites de l'expérience, quelle que soit l'intensité du faisceau d'ions. Il n'était pas possible de reprendre cette mesure afin d'obtenir plus de points, ou encore de la reprendre avec une sensibilité inférieure du détecteur, où peut-être aurions-nous pu observer le phénomène de saturation de la figure 5.16. Finalement la figure 5.16 indiquait que l'émission à 1550 nm de ce matériau était à la limite de saturation. Ceci semble indiquer que nous aurions éventuellement pu obtenir l'effet laser sur cet échantillon. En effet, s'il sature il est fort probable que les ions trivalents d'erbium se trouvaient à la limite de l'émission spontanée, et donc de l'inversion de population. L'usage d'un résonateur correctement aligné nous aurait permis de confirmer ou de contredire cette conclusion.

Il demeure cependant un point critique qui nuit à la qualité de ces mesures. En effet, l'objectif était d'obtenir une corrélation exacte, pour l'intensité d'émission des échantillons, entre un pompage optique et une exposition à des ions accélérés. Or il se trouve, comme on l'a vu au chapitre 4, que la profondeur de pénétration des ions accélérés est très courte en comparaison de celle des photons optiques. Il n'était techniquement pas envisageable d'obtenir des échantillons de quelques centaines de micromètres d'épaisseur afin de s'assurer que les deux pompages se fassent dans les mêmes conditions expérimentales.

Finalement, la meilleure solution aurait été d'utiliser des fibres optiques dopées, telles que l'ErIV:ZBLAN ou le NdIV:ZBLAN dont la production industrielle existe, et surtout dont le diamètre correspond aux besoins dimensionnels de cette section. Aussi, il demeure que les lasers dont le milieu de gain est une fibre optique sont aujourd'hui plutôt bien décrits.

6.3. Détecteurs de particules ionisantes à émission infrarouge

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, le spectre optique d'émission des verres dopés de lanthanides est très varié en s'étendant de l'UV proche jusqu'à l'infrarouge lointain. Il est tout à fait possible d'envisager des applications comme détecteurs pour ces matériaux.

Pour les matériaux scintillateurs utilisés comme détecteurs à particules ionisantes, nous pouvons considérer plusieurs critères, ou points critiques :

- un temps de vie de luminescence court est apprécié afin d'assurer une certaine résolution temporelle,

- aussi l'intensité d'émission est importante afin que la détection soit visible pour l'instrumentation utilisée, et aussi pour permettre dans certain cas une discrimination en particule.

Cependant, il est important de noter que les échantillons utilisés dans le présent projet n'avaient pas la vocation d'être utilisés comme détecteurs d'une part, et encore moins comme détecteurs de particules ionisantes d'autre part. Les matériaux décrits dans ces chapitres sont des matériaux initialement produits pour être utilisés dans le domaine des lasers, et donc le long temps de vie de la fluorescence est un avantage pour obtenir l'inversion de population.

À partir des conclusions de cette thèse, il est tout à fait envisageable de développer de nouveaux matériaux qui répondraient aux spécificités des détecteurs. Dans le cas présent l'intérêt est de conserver des longueurs d'onde d'émission dans le visible et l'infrarouge. Pour cela, les lanthanides demeurent tout à fait indiqués. Parmi les échantillons utilisés, toutes les longueurs d'onde d'émission n'ont pas pu être analysées et pourraient être intéressantes, tout comme l'émission à 980 nm de la transition ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ de l'ErIV (cf. figure 3.4).

Un autre paramètre à régler est le rendement entre l'intensité d'émission et l'énergie incidente. Et ce point demeure, tout comme pour la section précédente, la faiblesse de cette thèse.

Cependant, à partir des données obtenues, en considérant :

- les spectres d'émission,
- l'aire sous la courbe,
- l'énergie des photons émis,
- l'énergie des particules incidentes,
- ainsi que leur intensité,

on peut obtenir une valeur très approximative, i.e. un ordre de grandeur, du rendement de ces scintillateurs. Les figures 6.7 et 6.8 montrent le pic à 1550 nm de l'ErIV:VP exposé à un faisceau de ${}^4\text{He}^{++}$ à 20 nA et l'évaluation de l'aire sous la courbe, c'est-à-dire l'intensité totale d'émission de la transition.

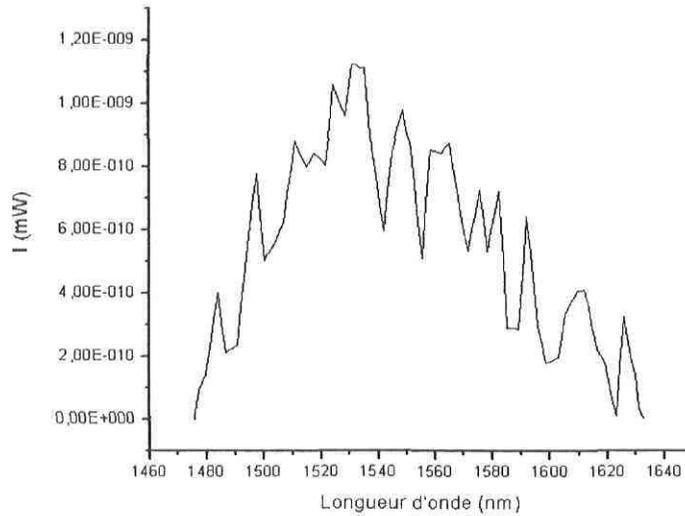


Figure 6.7 : Courbe du pic à 1550 nm du ErIV:VP exposé à ${}^4\text{He}^{++}$ à 4.2 MeV et 50 nA.

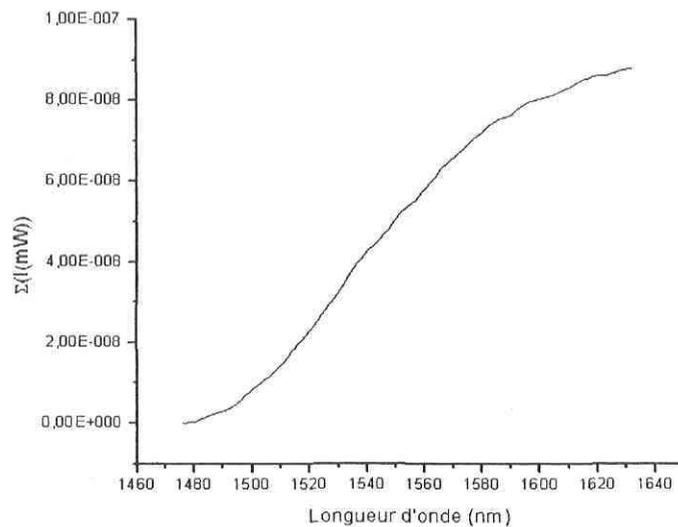


Figure 6.8 : Évaluation de l'aire sous la courbe de la figure 6.7.

De cette évaluation, et en connaissant l'angle solide mesuré, et l'efficacité de couplage, on peut obtenir une estimation de l'intensité totale émise :

$$\Sigma(I) \approx 8.8 \times 10^{-8} \text{ mW},$$

$$d\Omega \approx 0.12 \text{ strad},$$

d'où on obtient l'intensité émise avec l'énergie des photons $E \approx 1.3 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Le faisceau incident à 4 nA et 8.4 MeV a donc un flux de $1.2 \times 10^{10} \text{ He}^{++}/\text{s}$

L'inconvénient de cette mesure est que les incertitudes ne sont pas faciles à évaluer, et que certaines données théoriques ne peuvent pas être vérifiées expérimentalement. Elle ne demeure donc qu'une estimation. Cela dit, cette évaluation a été faite sur différentes mesures et semble reproductible.

Les tableaux 6.2 et 6.3 donnent le rendement photonique par particule incidente aux pics de 1550 nm du ErIV:VP et de 1064 nm du NdIV:ED2 en fonction des matériaux, ainsi que le pourcentage en terme de ratio énergétique. Les figures 6.9 et 6.10 représentent les tableaux 6.2 et 6.3 respectivement.

	H (±30%)	He (±30%)	C (±30%)
ErIV	2.5×10^4	6.4×10^4	5.3×10^4
NdIV	1.9×10^4	1.1×10^5	2.1×10^5

Tableau 6.2 : Rendement de photons par particule ionisante à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.

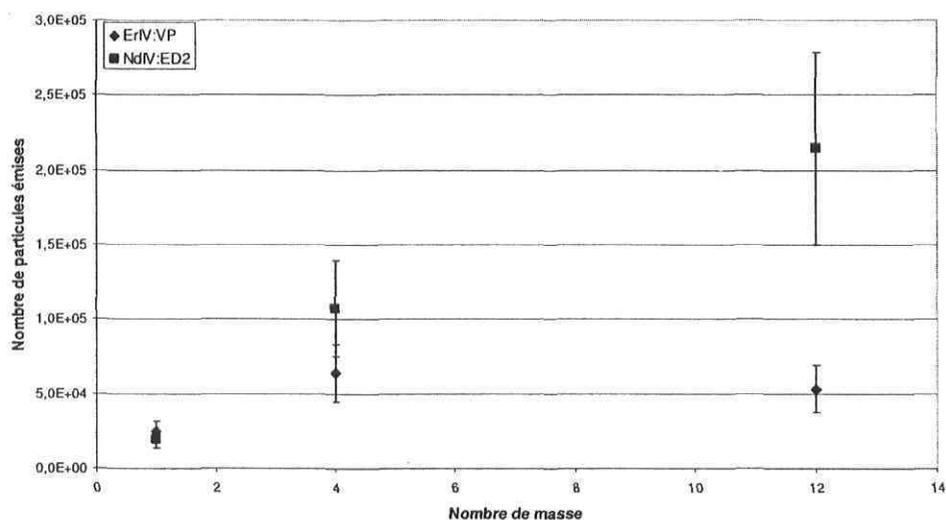


Figure 6.9 : Rendement en particules à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.

	H	He	C
ErIV	0.0050 ± 0.0015	0.0120 ± 0.0035	0.010 ± 0.003
NdIV	0.0050 ± 0.0015	0.030 ± 0.009	0.060 ± 0.018

Tableau 6.3 : Taux de conversion d'énergie à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.

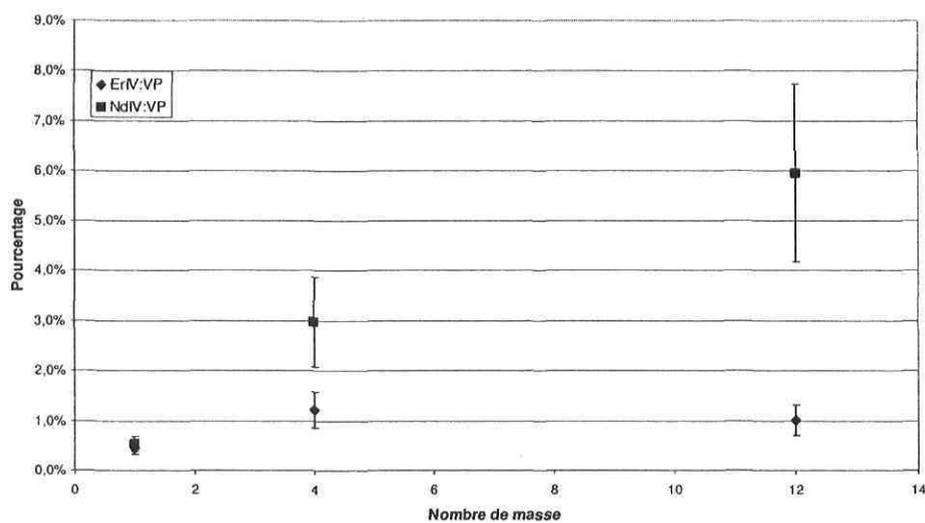


Figure 6.10 : Rendement énergétique à 1550 nm pour le ErIV:VP et à 1064 nm pour le NdIV:VP.

Dans le cas du NdIV:ED2, on voit une augmentation nette de la production de particules optiques en fonction de la masse de la particule incidente. Considérant que plus la masse augmente, moins la particule se propage (cf. chapitre 4), cela n'est pas surprenant : la particule incidente dépose beaucoup plus d'énergie par unité de volume qu'une particule plus légère, donc la radioluminescence est plus élevée, ainsi donc que la fluorescence induite.

Le cas de l'ErIV:VP paraît différent. En fait, il faut noter que l'ion trivalent d'erbium absorbe à 1550 nm (cf. figure 3.6), ce qui apporte une contrainte supplémentaire par rapport à l'ion de néodyme. Si la particule se propage moins loin dans le matériau, les photons émis ont plus de distance à parcourir dans l'échantillon avant de se rendre au collimateur, donc une part non négligeable de ceux-ci peut être absorbée. Aussi, il faut considérer les observations faites au chapitre 5 sur la possibilité de saturation dans l'émission de ce matériau. L'une dans l'autre, ces différentes contraintes expliquent en partie le comportement de l'ion d'erbium par rapport à celui de néodyme.

Une autre donnée intéressante est l'ordre de grandeur de l'émission photonique, soit 10^4 photons produits dans l'infrarouge par particule ionisante incidente. Ce rapport est élevé par rapport aux autres matériaux utilisés comme scintillateurs [16-17]. Il faut cependant garder à l'esprit que ces données demeurent approximatives, et que l'étude quantitative de la production optique des scintillateurs ici présentée garde une incertitude très élevée.

Quoi qu'il en soit, l'avantage d'utiliser des détecteurs de particules ionisantes émettant dans l'infrarouge est la propagation de ces photons dans les matériaux. En effet, si la longueur d'onde de la transition n'est pas absorbante, c'est-à-dire qu'elle ne se désexcite pas vers le niveau fondamental – telle que la transition à 1064 nm du NdIV – et en considérant que les verres n'absorbent pas dans l'infrarouge, on peut envisager la mise au point de détecteurs fibrés, qui sont utilisés pour la résolution spatiale qu'ils offrent.

Une étude de la dépendance en énergie des particules incidentes sur la production photonique des scintillateurs NdIV:VP et ErIV:VP n'a malheureusement pas pu être menée. L'accélérateur van de Graaff perdait en effet toute sa stabilité en dessous de 4.0 MV, et il n'était pas possible de l'opérer à plus de 4.3 MV. Dans ces conditions, il n'était pas envisageable de faire une discrimination adéquate en énergie.

6.4. Références

1. S. Yamamoto, S. Andringa, S. Aoki, *et al.*, IEEE T. Nucl. Sci. **52**, 2992 (2005).
2. K. Saucke, G. Pausch, J. Stein, *et al.*, IEEE T. Nucl. Sci. **52**, 3160, (2005).
3. F.A. Danevich, A.S. Georgadze, V.V. Kobychiev, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **556**, 259 (2006).
4. L. Archambault, A.S. Beddar, L. Gingras, *et al.*, Med. Phys. **33**, 128 (2006).
5. M. Marisaldi, C. Fiorini, C. Labanti, *et al.*, Nucl. Phys. B **150**, 190 (2006).
6. I.T. Muminov, A.K. Muhamedov, B.S. Osmanov, *et al.*, J. Environ. Radioactiv. **84**, 321 (2005).
7. K.L. Giboni, E. Aprile, P. Majewski, *et al.*, IEEE T. Nucl. Sci. **52**, 1800 (2005).
8. T. Sato, D. Satoh, A. Endo, *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **42**, 768 (2005).
9. J.M. Yi, J.H. Je, Y.S. Chu, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **551**, 157 (2005).
10. T. Fortna et G.M. Julian, Bul. Am. Phys. Soc. **20**, 224 (1975).
11. A. Einstein, Phys. Z. **18**, 121 (1917).
12. R. Eisberg et R. Resnick, *Quantum Physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*, (Wiley, New-York, 1985).
13. A.E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, Sausalito, 1986).
14. V.I. Bayanov, *et al.*, Kvantovaya Elektron+ **6**, 902 (1979).
15. R.A. Martin et J.C. Knight, IEEE Photonic Tech. L. **18**, 574 (2006).

16. S.E. Derenzo, *et al.*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **348**, Materials Research Society 39 (1994).
17. J.L. Allain, *et al.*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **348**, Materials Research Society, 105 (1994).

Conclusions

Dans ce projet, nous avons pu étudier le comportement de deux matériaux irradiés par des particules ionisantes, en examinant la fluorescence induite par radioluminescence. Il reste cependant quelques zones d'ombre. La première est imposée par le nombre de matériaux disponibles. En effet, l'absence d'échantillon témoin de verre poreux VP et de ED2 nous amène à déduire certaines réactions par des observations indirectes, telles que la radioluminescence UV-bleue de l'ED2. Cependant, les observations faites permettent tout de même de conclure à l'observation du phénomène.

De même, les contraintes temporelles sur l'accélérateur van de Graaff auront réduit significativement certaines expériences cruciales, telles que l'estimation des rendements photoniques, et les mesures ultimement obtenues donnent des ordres de grandeur. Quoiqu'il en soit, ces estimations sont suffisantes pour susciter un intérêt pour ces matériaux dans des applications potentielles.

Cette thèse amène une réponse à la question de Wojtovicz sur la fluorescence des ions de lanthanides dans les structures non-cristallines : la fluorescence serait en grande partie induite par la radioluminescence. Il s'agit donc là d'un processus conceptuellement simple, mais difficilement abordable théoriquement.

En effet, les théories décrivent parfaitement bien les processus de dépôt d'énergie de particules incidentes dans les matériaux cibles, et plusieurs logiciels libres permettent de simuler ces processus. D'un autre côté, la théorie de Judd et Ofelt explique très bien quantitativement les processus de fluorescence des ions de terres rares dans les matériaux hôtes. Mais entre ces deux descriptions se trouvent les processus d'émission de lumière de matériaux scintillateurs. Or il s'agit là de phénomènes extrêmement complexes répondant à la physique moléculaire des matériaux. Le fait est que les matériaux utilisés ont des structures moléculaires très compliquées, et leurs descriptions demeurent, pour l'instant, au stade empirique, au moins en ce qui concerne la radioluminescence.

Il n'est donc pas possible de pouvoir lier ces différentes théories sans connaître les rendements exacts entre la radiation incidente et l'émission dans l'UV-visible, ainsi que les rendements entre l'émission UV-visible et l'émission infrarouge. Pour ce faire il aurait fallu du matériel beaucoup plus précis que nous aurions dû utiliser avec certaines contraintes difficiles tels que la chambre d'analyse, sous vide, de l'accélérateur van de Graaff. Les observations des spectres d'émission couvrent le spectre optique de 300 à 1700 nm, et la précision était bonne de 300 à 600 nm grâce au spectromètre, et de 700 à 1700 nm avec l'analyseur de spectre optique. Il aurait été intéressant de pouvoir observer les spectres à des longueurs d'onde inférieures à 300 nm, donc dans l'UV où nous aurions eu une idée plus globale de la radioluminescence des matériaux. Il aurait aussi été intéressant de pouvoir observer ces spectres de façon continue et plus rapide afin de s'assurer des intensités relatives des pics. Aussi, les systèmes optiques utilisés présentaient de nombreuses contraintes. Ces systèmes étant fibrés, il fallait conjuguer avec l'absorption des fibres optiques qui n'est pas constante sur un spectre aussi large, aussi avec les différents couplages optiques qui ont engendrés des pertes difficilement évaluables.

Cependant, malgré cette faiblesse, cette thèse demeure une étude poussée de la fluorescence induite par radioluminescence de ces matériaux. Les différents comportements en fonction des particules incidentes, ainsi que des intensités d'irradiations, permettent de valider la théorie que la fluorescence des ions trivalents de terres rares dans les structures non cristallines peut bien être induite par la radioluminescence.

La comparaison expérimentale avec un matériau à structure cristalline tel que le titane-saphir montre bien que les phénomènes observés sont très différents, et donc qu'il ne s'agit pas de propagation d'excitons dans les matériaux étudiés, comme cela avait été postulé par le passé.

L'étude des applications potentielles montre l'intérêt que pourraient soulever ces matériaux. Cette thèse combine deux domaines réputés éloignés de la physique, c'est-à-dire l'optique et le nucléaire. Cependant les applications conjointes de ces deux domaines peuvent se retrouver autant dans l'un que dans l'autre.

En effet, l'application de ces scintillateurs au domaine des détecteurs de particules ionisantes est intéressante en physique nucléaire, puisqu'il permet de produire de l'infrarouge pour analyser les particules incidentes. Considérant les particularités de l'infrarouge dans les fibres optiques, comme la très faible absorption, on y voit clairement un avantage sur les matériaux scintillants émettant dans l'UV et le bleu, là où les matériaux absorbent le plus. D'autre part, le coût des matériaux non absorbants dans l'UV étant prohibitif, le changement de spectre d'émission serait des plus judicieux. Il faut en outre considérer que, grâce à l'exploitation de ces matériaux dans l'industrie photonique, le coût des fibres optiques dopées de lanthanides est aujourd'hui abordable.

Par contre, le développement de nouveaux scintillateurs à émission infrarouge permettrait d'une part d'évaluer et d'adapter le rendement de ceux-ci. En effet, notons que les scintillateurs utilisés dans cette thèse n'ont pas été développés pour cet usage, il s'agissait bien de verres qui, comme tous les verres, scintillent, mais il demeure qu'ils ont très peu été utilisés dans ce cadre, voire pas du tout. Donc, on peut concevoir qu'en dopant des verres scintillateurs, nous pourrions améliorer de façon significative leur rendement.

Dans le domaine de l'optique, on envisageait la possibilité de pomper un laser avec des particules ionisantes. Malheureusement, la technologie à notre disposition ne pouvait en aucune façon permettre de réaliser un tel laser. En effet, il aurait fallu robotiser un résonateur optique, cela en considérant au moins cinq degrés de liberté ainsi que le logiciel. En fait, il aurait fallu non seulement introduire de l'électronique dans la chambre d'analyse du Van de Graaff, mais en plus la modifier totalement pour augmenter son volume ainsi que de permettre l'installation de composantes optiques. Autant dire qu'il aurait simplement fallu la reconstruire. Là encore, considérant que j'étais le dernier utilisateur de cet appareil – celui-ci étant désormais définitivement fermé – il n'était pas

justifiable d'investir dans ce genre de réalisation. C'est pourquoi j'ai préféré mener l'étude de la fluorescence radio-induite afin de valider la possibilité de pomper un laser *via* ce procédé.

Je demeure, après cette étude, absolument convaincu qu'il est possible de pomper un laser avec des particules ionisantes, mais il reste beaucoup à faire pour atteindre cet objectif. En effet, s'il faut utiliser un accélérateur de particules pour atteindre cet effet l'intérêt sera parfaitement nul.

Que ce soit dans une application comme détecteur ou comme pompage laser, il serait intéressant d'utiliser des sources de particules ionisantes, telles que les particules α , plutôt que d'utiliser un accélérateur de particules. Il faut aussi envisager la possibilité d'exciter ces matériaux avec d'autres sources que des ions. En effet, l'exposition aux particules γ et e^- – effectuée à l'Hôtel-Dieu de Québec en collaboration avec Louis Archambault – ne s'est pas révélée un succès lors de cette thèse, les particules se propageaient trop profondément dans le matériau et l'énergie déposée localement était trop faible pour produire la radioluminescence. Des expériences à basse énergie (100 eV) d' e^- ont été menées – au Laboratoire de physique atomique et moléculaire de l'Université Laval avec la collaboration de Sylvain Massey – mais cette fois, l'énergie étant trop faible, les particules restaient en surface ce qui est confirmé par des simulations numériques avec le logiciel libre Casino (cf. annexe 3). De nombreux scintillateurs contemporains, dopés d'ions de terres rares, pourraient éventuellement régler ce problème.

Il est à noter que des scintillateurs dopés de lanthanides existent déjà, mais leur utilisation ne s'est pas rendue jusque dans l'infrarouge. Peut-être que les scintillateurs nécessaires pour réaliser des détecteurs à particules qui émettent dans l'infrarouge existent déjà, mais ne sont pas encore utilisées dans ce cadre, comme il fut fait dans le cadre de ce projet. Si les lanthanides intéressent la communauté scientifique actuelle, il est marquant de constater que ce ne sont pas les mêmes lanthanides qui éveillent l'intérêt selon le domaine. Autant l'optique-photonique est très portée sur l'usage des ions d'erbium, de

néodyme ou d'ytterbium, autant que le nucléaire semble plus intéressé par des ions tels que le cérium ou le terbium.

Il est certain que l'étude des matériaux dopés est loin d'être achevée, et que les développements technologiques, autant en physique optique qu'en physique nucléaire, seront encore longtemps basés sur l'étude de ces ions.

Annexes

Annexe 1 : Simulation Geant4 des différentes interactions produites par une particule gamma de 1.25 MeV dans le VP

La première partie de cette annexe (pages A et B) est la liste des routines et sous-routines appelées par le programme. Il génère l'environnement. Les pages suivantes portent sur les différentes réactions se produisant dans le matériau.

La première séquence de réaction porte sur le gamma. Il subit quatre diffusions Compton, avant d'être absorbé par effet photoélectrique. À ce moment le gamma avait une énergie de 89.7 keV (step 6), il y a une perte de 1.83 keV au moment de l'absorption (step 7). L'électron acquiert la différence d'énergie, soit 87.9 keV, nous le retrouvons dans le listing qui suit, il s'agit alors du step 0 de la grille Track ID 7, Parent 1.

```
HQLinHist::HQLinHist numbin=100 xmin=0 xmax=1e-04 width=1e-06
The random seed is set to 1092208459
```

```
*****
Geant4 version $Name: geant4-06-02 $ (25-June-2004)
      Copyright : Geant4 Collaboration
      Reference  : NIM A 506 (2003), 250-303
      WWW       : http://cern.ch/geant4
*****
```

```
Visualization Manager instantiating...
Visualization Manager initialising...
Registering graphics systems...
```

```
You have successfully chosen to use the following graphics systems.
Current available graphics systems are:
```

```
  ASCII tree (ATree)
  DAWNFILE (DAWNFILE)
  GAGTree (GAGTree)
  G4HepRepFile (HepRepFile)
  RayTracer (RayTracer)
  VRML1FILE (VRML1FILE)
  VRML2FILE (VRML2FILE)
  OpenGLImmediateX (OGLIX)
  OpenGLStoredX (OGLSX)
donaldPhysicsList::SetCuts:CutLength : 10 Ang
/control/saveHistory
/tracking/storeTrajectory 1
/run/verbose 01
/process/verbose 0
/tracking/verbose 1
/event/verbose 0
```

```

/newcomm/setfile test.dat
Output file name now set to test.dat

msc: Model variant of multiple scattering for e-
      Lambda tables from 100 eV to 100 TeV in 120 bins.
      Boundary algorithm is active with facrange= 1e-05
G4AugerData for Element no. 6 are loaded
G4AugerData for Element no. 7 are loaded
G4AugerData for Element no. 8 are loaded
G4AugerData for Element no. 13 are loaded
G4AugerData for Element no. 14 are loaded
G4AugerData for Element no. 18 are loaded
G4AugerData for Element no. 68 are loaded
G4AugerData for Element no. 82 are loaded
AugerTransitionTable complete

LowEnergyIoni: Total cross sections from EEDL database.
               Gamma energy sampled from a parametrised formula.
               Implementation of the continuous dE/dx part.
               At present it can be used for electrons in the energy range
               [250eV,100GeV].
               The process must work with G4LowEnergyBremsstrahlung.

LowEnBrem: Total cross sections from EEDL database.
            Gamma energy sampled from a parameterised formula.
            Implementation of the continuous dE/dx part.
            At present it can be used for electrons in the energy range
            [250eV,100GeV].
            The process must work with G4LowEnergyIonisation.
### All dEdx and Range tables are built #####

eIoni: tables are built for e+
        dE/dx and range tables from 100 eV to 100 TeV in 120 bins.
        Lambda tables from threshold to 100 TeV in 120 bins.
        Step function: finalRange(mm)= 1, dRoverRange= 1, integral: 1
        Delta cross sections from Moller+Bhabha, good description from 1 KeV to
100 GeV.
### All dEdx and Range tables are built #####

eBrem: tables are built for e+
        dE/dx and range tables from 100 eV to 100 TeV in 120 bins.
        Lambda tables from threshold to 100 TeV in 120 bins.
        Total cross sections from a parametrisation based on the EEDL data
library.
        Good description from 1 KeV to 100 GeV, log scale extrapolation above
100 GeV.

annihil: Total cross section from Heitler formula(annihilation into 2
photons).
         gamma energies sampled according Heitler
         PhysicsTables from 10 keV to 10 TeV in 100 bins.

===== Table of registered couples =====

Index : 0      used in the geometry : Yes      recalculation needed : No
Material : Air
Range cuts      : gamma 10 Ang      e- 10 Ang      e+ 10 Ang

```

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

Energy thresholds : gamma 990 eV e- 990 eV e+ 990 eV
 Region(s) which use this couple :
 DefaultRegionForTheWorld

Index : 1 used in the geometry : Yes recalculation needed : No
 Material : verrePND
 Range cuts : gamma 10 Ang e- 10 Ang e+ 10 Ang
 Energy thresholds : gamma 990 eV e- 990 eV e+ 990 eV
 Region(s) which use this couple :
 DefaultRegionForTheWorld

=====

donaldRunAction::BeginOfRunAction entered. Histogram being reset.
 Start Run processing.

 * G4Track Information: Particle = gamma, Track ID = 1, Parent ID = 0

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-800	0	0	1.25	0	0	0	WorldPhysical	initStep
1	-100	0	0	1.25	0	700	700	SlabVariablePhys	Transportation
2	-82.8	0	0	0.282	0	17.2	717	SlabVariablePhys	LowEnCompton
3	-92.5	-17	14.3	0.162	0	24.2	741	SlabVariablePhys	LowEnCompton
4	-58.1	-30.1	-1.66	0.151	0	40.1	782	SlabVariablePhys	LowEnCompton
5	-52.8	-27.8	-5.74	0.128	0	7.11	789	SlabVariablePhys	LowEnCompton
6	-53	-27	-6.22	0.0897	0	0.988	790	SlabVariablePhys	LowEnCompton
7	-51.7	-27.6	-5.49	0	0.00183	1.63	791	SlabVariablePhys	LowEnPhotoElec

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 7, Parent ID = 1

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.7	-27.6	-5.49	0.0879	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-51.7	-27.6	-5.49	0.0842	0.00136	0.00205	0.00205	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.0806	0.000705	0.00304	0.00509	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.48	0.0726	0.00556	0.00573	0.0108	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.49	0.0645	0.00809	0.0118	0.0226	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.49	0.0612	0.00177	0.00277	0.0254	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.49	0.0557	0.00543	0.00868	0.0341	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.0494	0.00629	0.00733	0.0414	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.0471	0.000133	0.000678	0.0421	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	0.0415	0.00564	0.00542	0.0475	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0.0366	0.00491	0.0043	0.0518	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-51.6	-27.6	-5.48	0.0338	0.00116	0.00108	0.0529	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-51.6	-27.6	-5.48	0.0298	0.00395	0.00295	0.0558	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-51.6	-27.6	-5.48	0.0231	0.00264	0.00157	0.0574	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-51.6	-27.6	-5.48	0.0183	0.00148	0.000481	0.0579	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-51.6	-27.6	-5.48	0.0172	0.00114	0.000965	0.0589	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-51.6	-27.6	-5.48	0.013	0.00414	0.000859	0.0597	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-51.6	-27.6	-5.48	0.0122	0.000825	0.000518	0.0602	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-51.6	-27.6	-5.48	0.0115	0.000675	0.00046	0.0607	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-51.6	-27.6	-5.48	0.00975	0.0018	0.000415	0.0611	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-51.6	-27.6	-5.48	0.00774	0.000653	0.000287	0.0614	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-51.6	-27.6	-5.48	0.00661	0.00113	0.0002	0.0616	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-51.6	-27.6	-5.48	0.00631	0.000298	0.000151	0.0617	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-51.6	-27.6	-5.48	0.00499	0.00132	0.000139	0.0619	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-51.6	-27.6	-5.48	0.00465	0.000338	9.18e-05	0.062	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-51.6	-27.6	-5.48	0.00412	0.000526	8.13e-05	0.0621	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-51.6	-27.6	-5.48	0.00327	0.000853	6.62e-05	0.0621	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-51.6	-27.6	-5.48	0.003	0.000267	4.49e-05	0.0622	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-51.6	-27.6	-5.48	0.00234	0.000663	3.92e-05	0.0622	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
29	-51.6	-27.6	-5.48	0.00179	0.000549	2.65e-05	0.0622	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
30	-51.6	-27.6	-5.48	0.00149	0.000298	1.8e-05	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
31	-51.6	-27.6	-5.48	0.00113	0.00036	1.41e-05	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
32	-51.6	-27.6	-5.48	0.000893	0.000239	1e-05	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
33	-51.6	-27.6	-5.48	0.000591	0.000301	7.69e-06	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
34	-51.6	-27.6	-5.48	0.000305	0.000287	5.28e-06	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
35	-51.6	-27.6	-5.48	0.000254	5.12e-05	3.54e-06	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
36	-51.6	-27.6	-5.48	0.00011	0.000143	3.29e-06	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
37	-51.6	-27.6	-5.48	0	0.00011	2.67e-06	0.0623	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 16, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.6	-27.6	-5.48	0.00137	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-51.6	-27.6	-5.48	0.000955	0.00041	1.26e-05	1.26e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.000901	5.41e-05	8.27e-06	2.08e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.48	0.000819	8.29e-05	7.77e-06	2.86e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.48	0.000694	0.000124	7.04e-06	3.57e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.48	0.000587	0.000107	6.03e-06	4.17e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.48	0.000538	4.86e-05	5.25e-06	4.69e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.000327	0.000211	4.91e-06	5.18e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.000143	0.000184	3.66e-06	5.55e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	6.86e-06	0.000136	2.8e-06	5.83e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0	6.86e-06	1.48e-06	5.98e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 15, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.6	-27.6	-5.48	0.00328	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-51.6	-27.6	-5.48	0.0029	0.000383	4.53e-05	4.53e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.0025	0.000403	3.7e-05	8.23e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.48	0.00215	0.000347	2.93e-05	0.000112	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.48	0.00176	0.000394	2.34e-05	0.000135	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.48	0.00147	0.00029	1.76e-05	0.000152	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.48	0.00136	0.000102	1.38e-05	0.000166	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.00108	0.00028	1.25e-05	0.000179	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.000732	0.000351	9.51e-06	0.000188	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	0.000437	0.000295	6.33e-06	0.000195	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0.000296	0.000141	4.27e-06	0.000199	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
11	-51.6	-27.6	-5.48	0.000101	0.000195	3.49e-06	0.000202	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
12	-51.6	-27.6	-5.48	7.99e-05	2.06e-05	2.63e-06	0.000205	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
13	-51.6	-27.6	-5.48	7.84e-05	1.57e-06	2.55e-06	0.000208	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
14	-51.6	-27.6	-5.48	4.49e-05	3.35e-05	2.54e-06	0.00021	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
15	-51.6	-27.6	-5.48	0	4.49e-05	2.39e-06	0.000213	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 14, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.6	-27.6	-5.48	0.0041	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-51.6	-27.6	-5.48	0.0032	0.000899	6.55e-05	6.55e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.00278	0.00042	4.34e-05	0.000109	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.48	0.0025	0.00028	3.46e-05	0.000143	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.48	0.0022	0.000297	2.93e-05	0.000173	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.48	0.00191	0.000289	2.42e-05	0.000197	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.48	0.0018	0.000111	1.98e-05	0.000217	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.0014	0.000402	1.82e-05	0.000235	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.00124	0.000157	1.3e-05	0.000248	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	0.00116	8.34e-05	1.12e-05	0.000259	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0.000751	0.000408	1.03e-05	0.000269	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
11	-51.6	-27.6	-5.48	0.000463	0.000288	6.49e-06	0.000276	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
12	-51.6	-27.6	-5.48	0.000392	7.11e-05	4.43e-06	0.00028	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
13	-51.6	-27.6	-5.48	0.000211	0.000181	4.01e-06	0.000284	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
14	-51.6	-27.6	-5.48	0.000109	0.000102	3.09e-06	0.000287	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
15	-51.6	-27.6	-5.48	0	0.000109	2.67e-06	0.00029	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 13, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.6	-27.6	-5.48	0.00162	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-51.6	-27.6	-5.48	0.00153	9.03e-05	1.58e-05	1.58e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.00125	0.000278	1.46e-05	3.04e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.48	0.00112	0.000129	1.13e-05	4.17e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.48	0.00103	9.33e-05	9.93e-06	5.16e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.48	0.000791	0.00024	9e-06	6.06e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.48	0.000715	7.64e-05	6.81e-06	6.74e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.000503	0.000212	6.2e-06	7.36e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.000305	0.000197	4.68e-06	7.83e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	0.000192	0.000114	3.54e-06	8.18e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0	0.000192	3.01e-06	8.48e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 12, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
-------	-------	-------	-------	-----------	---------	----------	-----------	------------	----------

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

0	-51.6	-27.6	-5.48	0.00218	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-51.6	-27.6	-5.48	0.00176	0.000423	2.39e-05	2.39e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.00169	6.54e-05	1.76e-05	4.15e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.48	0.00141	0.000281	1.67e-05	5.82e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.48	0.00127	0.000145	1.31e-05	7.14e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.48	0.00123	3.47e-05	1.15e-05	8.28e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.48	0.00111	0.000125	1.11e-05	9.39e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.000855	0.000254	9.76e-06	0.000104	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.000656	0.000199	7.35e-06	0.000111	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	0.000625	3.02e-05	5.74e-06	0.000117	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0.000591	3.44e-05	5.52e-06	0.000122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-51.6	-27.6	-5.48	0.000377	0.000214	5.27e-06	0.000128	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-51.6	-27.6	-5.48	0.000302	7.43e-05	3.92e-06	0.000131	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-51.6	-27.6	-5.48	0.000187	0.000115	3.53e-06	0.000135	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-51.6	-27.6	-5.48	0	0.000187	2.99e-06	0.000138	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 11, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.6	-27.6	-5.49	0.0016	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-51.6	-27.6	-5.49	0.00141	0.000199	1.55e-05	1.55e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.49	0.00141	4.91e-07	1.3e-05	2.86e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.49	0.0011	0.000304	1.3e-05	4.16e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.49	0.000833	0.000268	9.69e-06	5.13e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.49	0.000746	8.77e-05	7.17e-06	5.85e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.49	0.000569	0.000177	6.44e-06	6.49e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.49	0.000514	5.51e-05	5.12e-06	7e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.49	0.000216	0.000298	4.75e-06	7.48e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.49	7.33e-05	0.000142	3.11e-06	7.79e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.49	0	7.33e-05	2.52e-06	8.04e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 10, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.6	-27.6	-5.48	0.00241	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-51.6	-27.6	-5.48	0.00202	0.000391	2.77e-05	2.77e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.00166	0.000356	2.13e-05	4.9e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.48	0.00123	0.000431	1.62e-05	6.52e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.48	0.000992	0.000236	1.1e-05	7.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.48	0.000791	0.000201	8.61e-06	8.49e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.48	0.000761	3.03e-05	6.81e-06	9.17e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.00049	0.000271	6.56e-06	9.82e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.000481	8.28e-06	4.6e-06	0.000103	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	0.000375	0.000106	4.54e-06	0.000107	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0.000182	0.000193	3.91e-06	0.000111	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-51.6	-27.6	-5.48	0	0.000182	2.97e-06	0.000114	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 9, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.6	-27.6	-5.48	0.00288	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-51.6	-27.6	-5.48	0.00263	0.000243	3.66e-05	3.66e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-51.6	-27.6	-5.48	0.00244	0.000197	3.18e-05	6.84e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-51.6	-27.6	-5.49	0.00198	0.000458	2.82e-05	9.66e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-51.6	-27.6	-5.49	0.00179	0.000187	2.07e-05	0.000117	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-51.6	-27.6	-5.49	0.00141	0.000383	1.8e-05	0.000135	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-51.6	-27.6	-5.48	0.00123	0.000181	1.31e-05	0.000148	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-51.6	-27.6	-5.48	0.000811	0.000416	1.1e-05	0.000159	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-51.6	-27.6	-5.48	0.000773	3.86e-05	6.98e-06	0.000166	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-51.6	-27.6	-5.48	0.00058	0.000193	6.66e-06	0.000173	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-51.6	-27.6	-5.48	0.000535	4.45e-05	5.19e-06	0.000178	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-51.6	-27.6	-5.48	0.000424	0.000111	4.89e-06	0.000183	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-51.6	-27.6	-5.48	0.000335	8.96e-05	4.19e-06	0.000187	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-51.6	-27.6	-5.48	0.000153	0.000182	3.69e-06	0.000191	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-51.6	-27.6	-5.48	0	0.000153	2.84e-06	0.000194	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 8, Parent ID = 7

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-51.7	-27.6	-5.49	0.00233	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-51.7	-27.6	-5.49	0.00197	0.000358	2.63e-05	2.63e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-51.7	-27.6	-5.49	0.00175	0.00022	2.06e-05	4.69e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-51.7	-27.6	-5.49	0.00147	0.000284	1.75e-05	6.44e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-51.7	-27.6	-5.49	0.00109	0.000375	1.38e-05	7.81e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

5	-51.7	-27.6	-5.49	0.000889	0.000201	9.58e-06	8.77e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-51.7	-27.6	-5.49	0.000854	3.45e-05	7.65e-06	9.54e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-51.7	-27.6	-5.49	0.00072	0.000135	7.35e-06	0.000103	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-51.7	-27.6	-5.49	0.000436	0.000284	6.23e-06	0.000109	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-51.7	-27.6	-5.49	0.000217	0.000219	4.26e-06	0.000113	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-51.7	-27.6	-5.49	0	0.000217	3.12e-06	0.000116	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 6, Parent ID = 1

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-53	-27	-6.22	0.0384	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-53	-27	-6.22	0.0315	0.00191	0.00324	0.00324	0.00324	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-53	-27	-6.23	0.0283	0.0032	0.00261	0.00584	0.00584	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-53	-27	-6.23	0.0224	0.00591	0.00214	0.00799	0.00799	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-53	-27	-6.23	0.0201	0.00233	0.00139	0.00938	0.00938	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-53	-27	-6.23	0.0159	0.00292	0.000918	0.0103	0.0103	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-53	-27	-6.23	0.015	0.000954	0.000746	0.011	0.011	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-53	-27	-6.23	0.0102	0.00479	0.000666	0.0117	0.0117	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-53	-27	-6.23	0.00983	0.000358	0.00033	0.012	0.012	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-53	-27	-6.23	0.00921	0.000612	0.000309	0.0124	0.0124	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-53	-27	-6.23	0.00817	0.00105	0.000275	0.0126	0.0126	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
11	-53	-27	-6.23	0.00681	0.00136	0.000221	0.0128	0.0128	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
12	-53	-27	-6.23	0.00562	0.00119	0.000159	0.013	0.013	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
13	-53	-27	-6.23	0.00501	0.000617	0.000113	0.0131	0.0131	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
14	-53	-27	-6.23	0.00399	0.00102	9.25e-05	0.0132	0.0132	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
15	-53	-27	-6.23	0.00354	0.000452	6.26e-05	0.0133	0.0133	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
16	-53	-27	-6.23	0.00313	0.000406	5.12e-05	0.0133	0.0133	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
17	-53	-27	-6.23	0.00303	9.89e-05	4.19e-05	0.0134	0.0134	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
18	-53	-27	-6.23	0.00248	0.000556	3.98e-05	0.0134	0.0134	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
19	-53	-27	-6.23	0.00235	0.000125	2.89e-05	0.0134	0.0134	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
20	-53	-27	-6.23	0.00195	0.000402	2.67e-05	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
21	-53	-27	-6.23	0.0016	0.000348	2.03e-05	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
22	-53	-27	-6.23	0.00132	0.000284	1.55e-05	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
23	-53	-27	-6.23	0.00122	0.000101	1.2e-05	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
24	-53	-27	-6.23	0.000874	0.000342	1.09e-05	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
25	-53	-27	-6.23	0.000766	0.000108	7.52e-06	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
26	-53	-27	-6.23	0.000716	5e-05	6.6e-06	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
27	-53	-27	-6.23	0.000628	8.8e-05	6.2e-06	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
28	-53	-27	-6.23	0.000388	0.00024	5.54e-06	0.0135	0.0135	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
29	-53	-27	-6.23	0.000305	8.29e-05	3.98e-06	0.0136	0.0136	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
30	-53	-27	-6.23	0.000194	0.000111	3.54e-06	0.0136	0.0136	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
31	-53	-27	-6.23	0.000127	6.73e-05	3.02e-06	0.0136	0.0136	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
32	-53	-27	-6.23	0	0.000127	2.74e-06	0.0136	0.0136	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 18, Parent ID = 6

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-53	-27	-6.23	0.00124	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-53	-27	-6.23	0.000833	0.000407	1.12e-05	1.12e-05	1.12e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-53	-27	-6.23	0.000673	0.00016	7.17e-06	1.83e-05	1.83e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-53	-27	-6.23	0.000614	5.88e-05	5.87e-06	2.42e-05	2.42e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-53	-27	-6.23	0.000366	0.000248	5.44e-06	2.96e-05	2.96e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-53	-27	-6.23	0.000227	0.000138	3.86e-06	3.35e-05	3.35e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-53	-27	-6.23	0.000212	1.5e-05	3.17e-06	3.67e-05	3.67e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-53	-27	-6.23	8.05e-06	0.000204	3.1e-06	3.98e-05	3.98e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-53	-27	-6.23	0	8.05e-06	1.54e-06	4.13e-05	4.13e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 17, Parent ID = 6

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-53	-27	-6.22	0.00494	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-53	-27	-6.22	0.0045	0.000444	9.04e-05	9.04e-05	9.04e-05	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-53	-27	-6.22	0.00362	0.000878	7.69e-05	0.000167	0.000167	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-53	-27	-6.22	0.00336	0.000255	5.32e-05	0.00022	0.00022	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-53	-27	-6.22	0.00334	2.49e-05	4.71e-05	0.000268	0.000268	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-53	-27	-6.22	0.00305	0.000288	4.65e-05	0.000314	0.000314	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-53	-27	-6.22	0.00258	0.00047	4.02e-05	0.000354	0.000354	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-53	-27	-6.22	0.00239	0.000195	3.08e-05	0.000385	0.000385	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-53	-27	-6.22	0.00218	0.000204	2.73e-05	0.000413	0.000413	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-53	-27	-6.22	0.00211	7.02e-05	2.39e-05	0.000436	0.000436	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-53	-27	-6.22	0.0018	0.000309	2.28e-05	0.000459	0.000459	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
11	-53	-27	-6.22	0.00134	0.000461	1.82e-05	0.000477	0.000477	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
12	-53	-27	-6.22	0.000926	0.000417	1.23e-05	0.00049	0.00049	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
13	-53	-27	-6.22	0.000751	0.000175	7.99e-06	0.000498	0.000498	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
14	-53	-27	-6.22	0.000535	0.000216	6.48e-06	0.000504	0.000504	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
15	-53	-27	-6.22	0.000331	0.000204	4.89e-06	0.000509	0.000509	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

16	-53	-27	-6.22	0.000178	0.000153	3.68e-06	0.000513	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-53	-27	-6.22	7.7e-05	0.000101	2.95e-06	0.000516	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-53	-27	-6.22	2.74e-05	4.96e-05	2.53e-06	0.000518	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-53	-27	-6.22	2.45e-05	2.94e-06	2.27e-06	0.000521	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-53	-27	-6.22	5.21e-06	1.92e-05	2.23e-06	0.000523	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-53	-27	-6.22	0	5.21e-06	1.37e-06	0.000524	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 5, Parent ID = 1

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-52.8	-27.8	-5.74	0.0226	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-52.8	-27.8	-5.74	0.0193	0.00329	0.00141	0.00141	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-52.8	-27.8	-5.74	0.0179	0.00137	0.00106	0.00247	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-52.8	-27.8	-5.74	0.0158	0.00217	0.000927	0.0034	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-52.8	-27.8	-5.74	0.0132	0.00252	0.000731	0.00413	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-52.8	-27.8	-5.74	0.0118	0.0014	0.000532	0.00466	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-52.8	-27.8	-5.74	0.0109	0.00097	0.000434	0.0051	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-52.8	-27.8	-5.74	0.00994	0.000921	0.000372	0.00547	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-52.8	-27.8	-5.74	0.0089	0.00104	0.000316	0.00578	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-52.8	-27.8	-5.74	0.00695	0.00195	0.000258	0.00604	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-52.8	-27.8	-5.74	0.00585	0.00111	0.000165	0.00621	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-52.8	-27.8	-5.74	0.00499	0.000857	0.000121	0.00633	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-52.8	-27.8	-5.74	0.00468	0.000313	9.19e-05	0.00642	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-52.8	-27.8	-5.74	0.00417	0.000504	8.22e-05	0.0065	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-52.8	-27.8	-5.74	0.0037	0.000474	6.76e-05	0.00657	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-52.8	-27.8	-5.74	0.00349	0.000211	5.51e-05	0.00663	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-52.8	-27.8	-5.74	0.0032	0.000285	5e-05	0.00668	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-52.8	-27.8	-5.74	0.00284	0.000362	4.35e-05	0.00672	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-52.8	-27.8	-5.74	0.00239	0.000454	3.58e-05	0.00676	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-52.8	-27.8	-5.74	0.00193	0.000461	2.73e-05	0.00678	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-52.8	-27.8	-5.74	0.00167	0.000257	2e-05	0.0068	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-52.8	-27.8	-5.74	0.00141	0.00026	1.64e-05	0.00682	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-52.8	-27.8	-5.74	0.001	0.000404	1.31e-05	0.00683	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-52.8	-27.8	-5.74	0.000737	0.000268	8.73e-06	0.00684	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-52.8	-27.8	-5.74	0.000667	6.95e-05	6.37e-06	0.00685	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-52.8	-27.8	-5.74	0.000628	3.9e-05	5.83e-06	0.00685	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-52.8	-27.8	-5.74	0.000425	0.000203	5.54e-06	0.00686	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-52.8	-27.8	-5.74	0.000154	0.00027	4.2e-06	0.00686	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-52.8	-27.8	-5.74	0	0.000154	2.85e-06	0.00687	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 4, Parent ID = 1

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-58.1	-30.1	-1.66	0.0109	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-58.1	-30.1	-1.66	0.00853	0.00235	0.000373	0.000373	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-58.1	-30.1	-1.66	0.00812	0.000413	0.000239	0.000612	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-58.1	-30.1	-1.66	0.00748	0.000634	0.000219	0.000831	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-58.1	-30.1	-1.66	0.00607	0.00141	0.000189	0.00102	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-58.1	-30.1	-1.66	0.0051	0.000977	0.00013	0.00115	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-58.1	-30.1	-1.66	0.00477	0.000331	9.55e-05	0.00125	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-58.1	-30.1	-1.66	0.0037	0.00106	8.5e-05	0.00133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-58.1	-30.1	-1.66	0.00328	0.000423	5.53e-05	0.00139	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-58.1	-30.1	-1.66	0.00317	0.00011	4.52e-05	0.00143	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-58.1	-30.1	-1.66	0.00284	0.000336	4.28e-05	0.00147	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-58.1	-30.1	-1.66	0.00225	0.000588	3.58e-05	0.00151	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-58.1	-30.1	-1.66	0.00164	0.000613	2.5e-05	0.00153	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-58.1	-30.1	-1.66	0.00138	0.000257	1.59e-05	0.00155	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-58.1	-30.1	-1.66	0.00108	0.000298	1.27e-05	0.00156	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-58.1	-30.1	-1.66	0.000847	0.000233	9.48e-06	0.00157	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-58.1	-30.1	-1.66	0.000635	0.000211	7.29e-06	0.00158	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-58.1	-30.1	-1.66	0.000542	9.34e-05	5.59e-06	0.00159	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-58.1	-30.1	-1.66	0.000313	0.000228	4.94e-06	0.00159	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-58.1	-30.1	-1.66	0.000258	5.59e-05	3.58e-06	0.00159	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-58.1	-30.1	-1.66	7.44e-05	0.000183	3.31e-06	0.0016	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-58.1	-30.1	-1.66	0	7.44e-05	2.52e-06	0.0016	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 3, Parent ID = 1

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.3	0.12	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.3	0.103	0.0178	0.0288	0.0288	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.3	0.0949	0.00664	0.017	0.0458	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.3	0.0932	0.000471	0.00151	0.0473	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.3	0.0822	0.0109	0.0184	0.0657	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.3	0.0718	0.0105	0.0148	0.0804	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.3	0.0622	0.0096	0.0116	0.092	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

7	-92.6	-17	14.3	0.0607	0.000429	0.000514	0.0925	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.3	0.0543	0.00501	0.00747	0.1	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-92.6	-17	14.3	0.05	0.00429	0.007	0.107	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-92.6	-17	14.3	0.0379	0.00392	0.00336	0.11	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-92.6	-17	14.4	0.0322	0.00569	0.00364	0.114	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-92.6	-17	14.4	0.0272	0.005	0.0027	0.117	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-92.6	-17	14.4	0.0236	0.00233	0.00175	0.118	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-92.6	-17	14.4	0.0165	0.00112	0.000748	0.119	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-92.6	-17	14.4	0.0139	0.00133	0.000501	0.12	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-92.6	-17	14.4	0.0125	0.0014	0.00058	0.12	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-92.6	-17	14.4	0.0111	0.00139	0.000478	0.121	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-92.6	-17	14.4	0.0102	0.000937	0.000386	0.121	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-92.6	-17	14.4	0.00832	0.00184	0.000329	0.121	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-92.6	-17	14.4	0.00772	0.0006	0.000229	0.122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-92.6	-17	14.4	0.00678	0.000948	0.0002	0.122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-92.6	-17	14.4	0.00623	0.000541	0.000158	0.122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-92.6	-17	14.4	0.00569	0.000546	0.000136	0.122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-92.6	-17	14.4	0.00516	0.000531	0.000116	0.122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-92.6	-17	14.4	0.00467	0.000489	9.74e-05	0.122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-92.6	-17	14.4	0.00405	0.000619	8.2e-05	0.122	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-92.6	-17	14.4	0.0034	0.000649	6.42e-05	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-92.6	-17	14.4	0.00186	4.95e-05	1.14e-05	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
29	-92.6	-17	14.4	0.00141	0.000451	1.9e-05	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
30	-92.6	-17	14.4	0.00136	4.81e-05	1.31e-05	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
31	-92.6	-17	14.4	0.00122	0.000147	1.25e-05	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
32	-92.6	-17	14.4	0.000919	0.000296	1.09e-05	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
33	-92.6	-17	14.4	0.00077	0.000149	7.93e-06	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
34	-92.6	-17	14.4	0.00074	3.03e-05	6.63e-06	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
35	-92.6	-17	14.4	0.000631	0.000109	6.39e-06	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
36	-92.6	-17	14.4	0.000317	0.000314	5.56e-06	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
37	-92.6	-17	14.4	7.18e-05	0.000245	3.6e-06	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
38	-92.6	-17	14.4	6.37e-06	6.54e-05	2.51e-06	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
39	-92.6	-17	14.4	0	6.37e-06	1.45e-06	0.123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 27, Parent ID = 3

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.4	0.00149	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-92.6	-17	14.4	0.00113	0.000364	1.41e-05	1.41e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.4	0.000941	0.000185	9.95e-06	2.4e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.4	0.000814	0.000128	8.13e-06	3.21e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.4	0.000652	0.000161	7e-06	3.91e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.4	0.000501	0.000151	5.72e-06	4.49e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.4	0.00038	0.000121	4.67e-06	4.95e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.4	0.000185	0.000195	3.94e-06	5.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.4	0	0.000185	2.98e-06	5.64e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 26, Parent ID = 3

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.4	0.00124	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-92.6	-17	14.4	0.000947	0.00029	1.11e-05	1.11e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.4	0.000917	3.01e-05	8.19e-06	1.93e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.4	0.000835	8.24e-05	7.91e-06	2.72e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.4	0.000717	0.000118	7.18e-06	3.44e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.4	0.000708	8.33e-06	6.21e-06	4.06e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.4	0.000666	4.24e-05	6.14e-06	4.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.4	0.000629	3.71e-05	5.82e-06	5.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.4	0.000478	0.000151	5.54e-06	5.81e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-92.6	-17	14.4	0.000347	0.000131	4.52e-06	6.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-92.6	-17	14.4	0.000339	7.21e-06	3.76e-06	6.64e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-92.6	-17	14.4	0.000277	6.25e-05	3.72e-06	7.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-92.6	-17	14.4	0.000247	2.98e-05	3.4e-06	7.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-92.6	-17	14.4	0.000232	1.53e-05	3.26e-06	7.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-92.6	-17	14.4	0.000102	0.00013	3.19e-06	8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-92.6	-17	14.4	0	0.000102	2.64e-06	8.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 25, Parent ID = 3

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.4	0.00601	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-92.6	-17	14.4	0.00557	0.000443	0.000127	0.000127	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.4	0.00484	0.000725	0.000111	0.000239	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.4	0.00397	0.00087	8.73e-05	0.000326	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.4	0.00358	0.000389	6.22e-05	0.000388	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.4	0.00327	0.000311	5.23e-05	0.00044	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

6	-92.6	-17	14.4	0.00268	0.000594	4.5e-05	0.000485	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.4	0.00196	0.000722	3.27e-05	0.000518	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.4	0.00167	0.000287	2.04e-05	0.000539	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-92.6	-17	14.4	0.00142	0.000254	1.64e-05	0.000555	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-92.6	-17	14.4	0.00114	0.000278	1.32e-05	0.000568	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-92.6	-17	14.4	0.000909	0.000229	1.01e-05	0.000578	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-92.6	-17	14.4	0.000615	0.000294	7.83e-06	0.000586	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-92.6	-17	14.4	0.000564	5.11e-05	5.44e-06	0.000591	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-92.6	-17	14.4	0.000267	0.000297	5.08e-06	0.000596	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-92.6	-17	14.4	0.000161	0.000106	3.35e-06	0.0006	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-92.6	-17	14.4	7.66e-05	8.46e-05	2.88e-06	0.000603	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-92.6	-17	14.4	3.18e-05	4.48e-05	2.53e-06	0.000605	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-92.6	-17	14.4	4.98e-06	2.68e-05	2.31e-06	0.000608	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-92.6	-17	14.4	0	4.98e-06	1.35e-06	0.000609	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 24, Parent ID = 3

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.4	0.00125	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.4	0.000979	0.000274	1.13e-05	1.13e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.4	0.000689	0.00029	8.49e-06	1.98e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.4	0.000555	0.000134	6e-06	2.58e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.4	0.000551	4.13e-06	5.03e-06	3.08e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.4	0.000431	0.000121	5e-06	3.58e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.4	0.000405	2.58e-05	4.23e-06	4.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.4	0.00026	0.000145	4.08e-06	4.41e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.4	0	0.00026	3.32e-06	4.75e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 23, Parent ID = 3

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.3	0.00823	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.3	0.00678	0.00145	0.000224	0.000224	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.3	0.00595	0.00083	0.000158	0.000382	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.3	0.00545	0.000498	0.000125	0.000507	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.3	0.00495	0.000505	0.000107	0.000615	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.3	0.0044	0.000544	9.05e-05	0.000705	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.4	0.0026	0.000446	4.44e-05	0.00075	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.4	0.00197	0.000628	3.12e-05	0.000781	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.4	0.00164	0.000338	2.07e-05	0.000802	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-92.6	-17	14.4	0.00138	0.000251	1.59e-05	0.000818	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-92.6	-17	14.4	0.00119	0.000197	1.28e-05	0.00083	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-92.6	-17	14.4	0.000853	0.000333	1.06e-05	0.000841	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-92.6	-17	14.4	0.000695	0.000158	7.34e-06	0.000848	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-92.6	-17	14.4	0.000534	0.000161	6.04e-06	0.000854	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-92.6	-17	14.4	0.000274	0.00026	4.88e-06	0.000859	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-92.6	-17	14.4	9.54e-05	0.000179	3.39e-06	0.000863	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-92.6	-17	14.4	6.57e-05	2.97e-05	2.61e-06	0.000865	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-92.6	-17	14.4	1.99e-05	4.58e-05	2.49e-06	0.000868	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-92.6	-17	14.4	8.15e-06	1.18e-05	2.17e-06	0.00087	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-92.6	-17	14.4	0	8.15e-06	1.55e-06	0.000871	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 28, Parent ID = 23

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.4	0.00136	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.4	0.00124	0.000112	1.25e-05	1.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.4	0.00117	7.7e-05	1.12e-05	2.36e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.4	0.00083	0.000337	1.04e-05	3.4e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.4	0.000628	0.000202	7.14e-06	4.12e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.4	0.00052	0.000108	5.54e-06	4.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.4	0.000451	6.94e-05	4.79e-06	5.15e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.4	0.000333	0.000117	4.35e-06	5.58e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.4	0.000297	3.67e-05	3.69e-06	5.95e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-92.6	-17	14.4	4.84e-05	0.000248	3.5e-06	6.3e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-92.6	-17	14.4	0	4.84e-05	2.41e-06	6.54e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 22, Parent ID = 3

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.3	0.00137	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.3	0.00111	0.000264	1.27e-05	1.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.3	0.000905	0.000206	9.79e-06	2.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.3	0.000701	0.000204	7.8e-06	3.03e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

4	-92.6	-17	14.3	0.000464	0.000237	6.09e-06	3.64e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.3	0.000301	0.000163	4.43e-06	4.08e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.3	0	0.000301	3.52e-06	4.43e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 21, Parent ID = 3									

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.3	0.00103	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.3	0.000845	0.000188	9e-06	9e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.3	0.00073	0.000115	7.27e-06	1.63e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.3	0.000697	3.34e-05	6.32e-06	2.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.3	0.000522	0.000175	6.06e-06	2.86e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.3	0.000242	0.00028	4.8e-06	3.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.3	0.000216	2.66e-05	3.24e-06	3.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.3	9.88e-05	0.000117	3.11e-06	3.98e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.3	0	9.88e-05	2.62e-06	4.24e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 20, Parent ID = 3									

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.3	0.00125	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.3	0.000941	0.000309	1.13e-05	1.13e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.3	0.000824	0.000117	8.13e-06	1.94e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.3	0.000801	2.3e-05	7.08e-06	2.65e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.3	0.000684	0.000116	6.89e-06	3.34e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.3	0.000522	0.000162	5.96e-06	3.93e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.3	0.000277	0.000245	4.81e-06	4.41e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.3	0.000109	0.000168	3.4e-06	4.75e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.3	3.49e-05	7.41e-05	2.66e-06	5.02e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-92.6	-17	14.3	0	3.49e-05	2.33e-06	5.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 19, Parent ID = 3									

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-92.6	-17	14.3	0.00122	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-92.6	-17	14.3	0.00103	0.000185	1.09e-05	1.09e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-92.6	-17	14.3	0.000941	9.02e-05	8.99e-06	1.99e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-92.6	-17	14.3	0.000762	0.000179	8.13e-06	2.8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-92.6	-17	14.3	0.000656	0.000107	6.57e-06	3.46e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-92.6	-17	14.3	0.000553	0.000103	5.74e-06	4.03e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-92.6	-17	14.3	0.000491	6.21e-05	5.01e-06	4.53e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-92.6	-17	14.3	0.000298	0.000193	4.6e-06	4.99e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-92.6	-17	14.3	0.000159	0.000139	3.51e-06	5.34e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-92.6	-17	14.3	7.1e-06	0.000152	2.87e-06	5.63e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-92.6	-17	14.3	0	7.1e-06	1.49e-06	5.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 2, Parent ID = 1									

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.8	0	0	0.968	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.8	0.000949	-0.00113	0.965	0.00132	0.00692	0.00692	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.8	0.0024	-0.00283	0.96	0.00321	0.0148	0.0217	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.7	0.0139	-0.00927	0.925	0.0116	0.0496	0.0713	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.7	0.0149	-0.0106	0.922	0.00133	0.00546	0.0767	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.6	0.0335	-0.0171	0.903	0.018	0.0791	0.156	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.6	0.0336	-0.0182	0.9	0.00133	0.00638	0.162	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.6	0.0368	-0.0237	0.877	0.0108	0.0482	0.21	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.6	0.0382	-0.0281	0.871	0.00381	0.016	0.226	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.5	0.0224	-0.0746	0.846	0.0243	0.109	0.335	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.4	0.0274	-0.0752	0.83	0.0122	0.053	0.388	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.4	0.0357	-0.0811	0.82	0.00802	0.0353	0.423	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.3	0.0507	-0.0861	0.798	0.0122	0.0572	0.481	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.2	0.0994	-0.118	0.762	0.0307	0.137	0.618	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-82.1	0.139	-0.172	0.735	0.0265	0.122	0.74	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-82	0.156	-0.195	0.714	0.0151	0.0652	0.805	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-82	0.155	-0.199	0.71	0.00168	0.0115	0.817	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.9	0.113	-0.223	0.672	0.0362	0.147	0.964	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.9	0.115	-0.227	0.666	0.00491	0.0221	0.986	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.9	0.115	-0.227	0.664	4.4e-05	0.000153	0.986	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.9	0.115	-0.227	0.651	2.42e-05	4.83e-05	0.986	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-81.9	0.115	-0.228	0.648	0.00163	0.0079	0.994	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-81.8	0.117	-0.239	0.632	0.0109	0.0386	1.03	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-81.7	0.132	-0.24	0.607	0.0236	0.0983	1.13	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-81.6	0.136	-0.248	0.577	0.0296	0.133	1.26	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

25	-81.6	0.129	-0.257	0.563	0.012	0.0494	1.31	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-81.5	0.139	-0.284	0.538	0.0105	0.0482	1.36	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-81.5	0.147	-0.303	0.522	0.013	0.0559	1.42	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-81.5	0.138	-0.316	0.515	0.00572	0.0263	1.44	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
29	-81.4	0.133	-0.334	0.506	0.00734	0.0377	1.48	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
30	-81.4	0.14	-0.358	0.489	0.0155	0.0596	1.54	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
31	-81.3	0.145	-0.368	0.471	0.0144	0.0555	1.6	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
32	-81.3	0.144	-0.376	0.352	0.00229	0.0121	1.61	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
33	-81.3	0.156	-0.381	0.327	0.0154	0.0534	1.66	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
34	-81.3	0.157	-0.382	0.323	0.00305	0.0124	1.67	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
35	-81.2	0.19	-0.387	0.306	0.0152	0.0513	1.73	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
36	-81.2	0.189	-0.39	0.302	0.00205	0.00439	1.73	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
37	-81.2	0.189	-0.39	0.299	0.000614	0.00145	1.73	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
38	-81.2	0.188	-0.393	0.297	0.00119	0.00587	1.74	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
39	-81.2	0.188	-0.397	0.293	0.00254	0.00596	1.74	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
40	-81.2	0.179	-0.403	0.287	0.00518	0.0209	1.76	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
41	-81.2	0.178	-0.408	0.284	0.00232	0.00667	1.77	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
42	-81.2	0.17	-0.42	0.271	0.00662	0.0236	1.79	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
43	-81.2	0.168	-0.425	0.268	0.00133	0.00563	1.8	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
44	-81.2	0.163	-0.433	0.262	0.0038	0.013	1.81	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
45	-81.1	0.156	-0.446	0.257	0.00438	0.0175	1.83	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
46	-81.1	0.146	-0.454	0.247	0.00526	0.0153	1.85	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
47	-81.1	0.143	-0.459	0.239	0.00244	0.00825	1.85	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
48	-81.1	0.138	-0.468	0.235	0.00345	0.0118	1.87	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
49	-81.1	0.134	-0.472	0.229	0.0045	0.00642	1.87	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
50	-81.1	0.122	-0.485	0.222	0.00349	0.0178	1.89	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
51	-81.1	0.111	-0.491	0.212	0.00311	0.0142	1.9	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
52	-81.1	0.0996	-0.493	0.205	0.00567	0.0117	1.92	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
53	-81.1	0.0682	-0.488	0.187	0.0154	0.0358	1.95	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
54	-81.1	0.043	-0.522	0.165	0.0208	0.0591	2.01	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
55	-81.1	0.0534	-0.532	0.155	0.00738	0.017	2.03	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
56	-81.1	0.0723	-0.533	0.147	0.00764	0.0209	2.05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
57	-81.1	0.0909	-0.541	0.133	0.012	0.0258	2.07	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
58	-81.1	0.0953	-0.542	0.13	0.00197	0.00526	2.08	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
59	-81.2	0.11	-0.542	0.114	0.0158	0.0326	2.11	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
60	-81.2	0.111	-0.541	0.111	0.000772	0.00152	2.11	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
61	-81.2	0.115	-0.541	0.108	0.00198	0.00391	2.12	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
62	-81.2	0.117	-0.539	0.0976	0.00236	0.00404	2.12	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
63	-81.2	0.118	-0.538	0.0944	0.00105	0.00285	2.13	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
64	-81.2	0.119	-0.519	0.0824	0.012	0.0188	2.14	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
65	-81.2	0.12	-0.506	0.0716	0.0108	0.0148	2.16	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
66	-81.2	0.12	-0.505	0.0643	0.000562	0.000906	2.16	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
67	-81.2	0.113	-0.502	0.0575	0.0068	0.00949	2.17	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
68	-81.2	0.116	-0.498	0.0484	0.00905	0.00776	2.18	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
69	-81.2	0.114	-0.495	0.0438	0.00462	0.0057	2.18	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
70	-81.2	0.113	-0.495	0.0372	0.00657	0.00475	2.19	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
71	-81.2	0.112	-0.498	0.0326	0.00462	0.00353	2.19	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
72	-81.2	0.112	-0.498	0.0309	0.00015	0.000141	2.19	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
73	-81.2	0.11	-0.497	0.026	0.00487	0.00251	2.19	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
74	-81.2	0.109	-0.498	0.024	0.00197	0.00183	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
75	-81.2	0.108	-0.499	0.0199	0.00414	0.00158	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
76	-81.2	0.108	-0.5	0.0173	0.00264	0.00112	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
77	-81.2	0.109	-0.501	0.0165	0.00076	0.000864	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
78	-81.2	0.108	-0.501	0.0149	0.00155	0.000795	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
79	-81.2	0.108	-0.502	0.0115	0.00346	0.000663	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
80	-81.2	0.108	-0.502	0.0103	0.00119	0.000411	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
81	-81.2	0.108	-0.503	0.00924	0.00105	0.000337	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
82	-81.2	0.108	-0.503	0.00824	0.001	0.000277	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
83	-81.2	0.108	-0.503	0.00741	0.000834	0.000225	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
84	-81.2	0.108	-0.503	0.00554	0.000427	0.000146	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
85	-81.2	0.108	-0.503	0.00467	0.000872	0.00011	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
86	-81.2	0.108	-0.503	0.00402	0.000652	8.19e-05	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
87	-81.2	0.108	-0.503	0.00377	0.000244	6.33e-05	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
88	-81.2	0.108	-0.503	0.00227	0.000319	2.39e-05	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
89	-81.2	0.108	-0.503	0.00214	0.00013	2.53e-05	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
90	-81.2	0.108	-0.503	0.00181	0.00033	2.32e-05	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
91	-81.2	0.108	-0.503	0.00149	0.000317	1.83e-05	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
92	-81.2	0.108	-0.503	0.00105	0.000438	1.41e-05	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
93	-81.2	0.108	-0.503	0.000936	0.000116	9.2e-06	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
94	-81.2	0.108	-0.503	0.000822	0.000114	8.08e-06	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
95	-81.2	0.108	-0.503	0.000552	0.00027	7.07e-06	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
96	-81.2	0.108	-0.503	0.000268	0.000284	5e-06	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
97	-81.2	0.108	-0.503	0.000197	7.05e-05	3.36e-06	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
98	-81.2	0.108	-0.503	0	0.000197	3.03e-06	2.2	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 94, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.108	-0.503	0.00119	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.108	-0.503	0.000993	0.000192	1.06e-05	1.06e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

2	-81.2	0.108	-0.503	0.000738	0.000255	8.62e-06	1.92e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.108	-0.503	0.000505	0.000233	6.38e-06	2.56e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.108	-0.503	0.000403	0.000102	4.69e-06	3.03e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.108	-0.503	0.000138	0.000265	4.07e-06	3.43e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.108	-0.503	0	0.000138	2.78e-06	3.71e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 93, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.108	-0.503	0.00144	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.2	0.108	-0.503	0.0013	0.000142	1.35e-05	1.35e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.2	0.108	-0.503	0.000983	0.000314	1.18e-05	2.52e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.2	0.108	-0.503	0.000893	9.03e-05	8.53e-06	3.38e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.2	0.108	-0.503	0.000627	0.000265	7.69e-06	4.15e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.2	0.108	-0.503	0.000576	5.13e-05	5.53e-06	4.7e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.2	0.108	-0.503	0.00027	0.000306	5.17e-06	5.22e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.2	0.108	-0.503	6.53e-05	0.000204	3.37e-06	5.55e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.2	0.108	-0.503	0	6.53e-05	2.49e-06	5.8e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 92, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.112	-0.498	0.00161	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.2	0.112	-0.498	0.00145	0.00017	1.57e-05	1.57e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.2	0.112	-0.498	0.0014	4.19e-05	1.35e-05	2.92e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.2	0.112	-0.498	0.00104	0.000366	1.3e-05	4.22e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.2	0.112	-0.498	0.000793	0.000244	9.05e-06	5.12e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.2	0.112	-0.498	0.000575	0.000218	6.83e-06	5.81e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.2	0.112	-0.498	0.00046	0.000116	5.16e-06	6.32e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.2	0.112	-0.498	0.000428	3.15e-05	4.41e-06	6.76e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.2	0.112	-0.498	0.000185	0.000243	4.22e-06	7.19e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.2	0.112	-0.498	9.6e-05	8.95e-05	2.98e-06	7.48e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-81.2	0.112	-0.498	0	9.6e-05	2.61e-06	7.75e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 91, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.12	-0.505	0.00679	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.2	0.12	-0.505	0.00611	0.000686	0.000159	0.000159	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.2	0.12	-0.505	0.0057	0.000407	0.000131	0.00029	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.2	0.12	-0.505	0.00569	1.54e-05	0.000116	0.000406	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.2	0.12	-0.505	0.00498	0.000703	0.000116	0.000521	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.2	0.12	-0.505	0.0046	0.000382	9.17e-05	0.000613	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.2	0.12	-0.505	0.00377	0.000826	7.99e-05	0.000693	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.2	0.12	-0.505	0.0029	0.00087	5.7e-05	0.00075	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.2	0.12	-0.505	0.00274	0.000163	3.71e-05	0.000787	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.2	0.12	-0.505	0.00263	0.00011	3.39e-05	0.000821	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-81.2	0.12	-0.505	0.00236	0.000276	3.18e-05	0.000853	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
11	-81.2	0.12	-0.505	0.00186	0.000495	2.68e-05	0.00088	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
12	-81.2	0.12	-0.505	0.00162	0.000245	1.9e-05	0.000899	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
13	-81.2	0.12	-0.505	0.00142	0.000191	1.57e-05	0.000914	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
14	-81.2	0.12	-0.505	0.00123	0.000189	1.33e-05	0.000928	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
15	-81.2	0.12	-0.505	0.00107	0.000162	1.11e-05	0.000939	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
16	-81.2	0.12	-0.505	0.000799	0.000273	9.4e-06	0.000948	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
17	-81.2	0.12	-0.505	0.000542	0.000257	6.88e-06	0.000955	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
18	-81.2	0.12	-0.505	0.000448	9.46e-05	4.94e-06	0.00096	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
19	-81.2	0.12	-0.505	0.000192	0.000255	4.33e-06	0.000964	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
20	-81.2	0.12	-0.505	0.000114	7.87e-05	3.01e-06	0.000967	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
21	-81.2	0.12	-0.505	6.94e-05	4.43e-05	2.68e-06	0.00097	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
22	-81.2	0.12	-0.505	0	6.94e-05	2.5e-06	0.000972	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 90, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.118	-0.538	0.00218	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.2	0.118	-0.538	0.00214	3.32e-05	2.38e-05	2.38e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.2	0.118	-0.538	0.00195	0.000187	2.33e-05	4.7e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.2	0.118	-0.538	0.00161	0.000349	2.04e-05	6.74e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.2	0.118	-0.538	0.00115	0.000455	1.55e-05	8.3e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.2	0.118	-0.538	0.000848	0.000303	1.02e-05	9.32e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.2	0.118	-0.538	0.000814	3.35e-05	7.29e-06	0.0001	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.2	0.118	-0.538	0.000796	1.82e-05	7.01e-06	0.000107	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.2	0.118	-0.538	0.000713	8.29e-05	6.85e-06	0.000114	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.2	0.118	-0.538	0.000624	8.91e-05	6.18e-06	0.000121	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

10	-81.2	0.118	-0.538	0.000374	0.00025	5.51e-06	0.000126	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.2	0.118	-0.538	0.000301	7.34e-05	3.91e-06	0.00013	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.2	0.118	-0.538	0.000205	9.57e-05	3.52e-06	0.000133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.2	0.118	-0.538	0	0.000205	3.07e-06	0.000137	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 89, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.117	-0.539	0.00754	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.117	-0.539	0.00709	0.000448	0.000191	0.000191	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.117	-0.539	0.00599	0.0011	0.000171	0.000363	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.117	-0.539	0.00576	0.000231	0.000127	0.00049	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.117	-0.539	0.00498	0.000782	0.000118	0.000608	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.117	-0.54	0.00399	0.00099	9.17e-05	0.0007	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.117	-0.54	0.00318	0.00081	6.27e-05	0.000762	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.117	-0.54	0.0027	0.000485	4.3e-05	0.000805	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.117	-0.54	0.00231	0.000389	3.3e-05	0.000838	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.2	0.117	-0.54	0.00178	0.000527	2.6e-05	0.000864	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.2	0.117	-0.54	0.0017	8.51e-05	1.79e-05	0.000882	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.2	0.117	-0.54	0.00138	0.000316	1.68e-05	0.000899	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.2	0.117	-0.54	0.00108	0.000303	1.28e-05	0.000912	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.2	0.117	-0.54	0.000853	0.000225	9.46e-06	0.000921	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.2	0.117	-0.54	0.000734	0.000119	7.34e-06	0.000928	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.2	0.117	-0.54	0.000679	5.53e-05	6.34e-06	0.000935	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.2	0.117	-0.54	0.000498	0.000181	5.91e-06	0.000941	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.2	0.117	-0.54	0.000177	0.000321	4.65e-06	0.000945	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.2	0.117	-0.54	0	0.000177	2.94e-06	0.000948	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 88, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.115	-0.541	0.00145	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.115	-0.541	0.00124	0.000209	1.36e-05	1.36e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.115	-0.541	0.000927	0.000313	1.12e-05	2.47e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.115	-0.541	0.000644	0.000282	8e-06	3.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.115	-0.541	0.000563	8.14e-05	5.66e-06	3.84e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.115	-0.541	0.00025	0.000313	5.08e-06	4.34e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.115	-0.541	0.000197	5.26e-05	3.27e-06	4.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.115	-0.541	0.000176	2.13e-05	3.03e-06	4.98e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.115	-0.541	7.56e-05	0.000101	2.94e-06	5.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.2	0.115	-0.541	1.52e-05	6.03e-05	2.53e-06	5.52e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.2	0.115	-0.541	1.32e-05	2.07e-06	2.05e-06	5.73e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.2	0.115	-0.541	0	1.32e-05	1.94e-06	5.92e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 87, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.111	-0.541	0.00197	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.111	-0.541	0.00186	0.00011	2.06e-05	2.06e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.111	-0.541	0.00159	0.00027	1.9e-05	3.95e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.111	-0.541	0.00133	0.000259	1.53e-05	5.48e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.111	-0.541	0.00131	1.64e-05	1.21e-05	6.7e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.111	-0.541	0.00104	0.000269	1.19e-05	7.89e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.111	-0.541	0.000706	0.000336	9.1e-06	8.8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.111	-0.541	0.000534	0.000172	6.13e-06	9.41e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.111	-0.541	0.000402	0.000132	4.88e-06	9.9e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.2	0.111	-0.541	0.000288	0.000114	4.06e-06	0.000103	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.2	0.111	-0.541	0.000261	2.65e-05	3.45e-06	0.000107	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.2	0.111	-0.541	0.000177	8.44e-05	3.32e-06	0.00011	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.2	0.111	-0.541	9.57e-05	8.1e-05	2.94e-06	0.000113	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.2	0.111	-0.541	6.13e-05	3.45e-05	2.61e-06	0.000115	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.2	0.111	-0.541	0	6.13e-05	2.47e-06	0.000118	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 86, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.0953	-0.542	0.00113	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.0953	-0.542	0.00094	0.00019	9.98e-06	9.98e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.0953	-0.542	0.000613	0.000327	8.12e-06	1.81e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.0953	-0.542	0.000352	0.000261	5.43e-06	2.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.0953	-0.542	0.000329	2.25e-05	3.79e-06	2.73e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.0953	-0.542	0.000184	0.000145	3.67e-06	3.1e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.0953	-0.542	0.000129	5.5e-05	2.98e-06	3.4e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.0953	-0.542	0	0.000129	2.75e-06	3.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 85, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.0909	-0.541	0.00192	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.1	0.0909	-0.541	0.00176	0.00016	2e-05	2e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.1	0.0909	-0.541	0.00157	0.000193	1.77e-05	3.76e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.1	0.0909	-0.541	0.00135	0.000225	1.51e-05	5.27e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.1	0.0909	-0.541	0.0011	0.000246	1.23e-05	6.51e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.1	0.0909	-0.541	0.00096	0.000139	9.68e-06	7.48e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.1	0.0909	-0.541	0.000643	0.000317	8.31e-06	8.31e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.1	0.0909	-0.541	0.000591	5.23e-05	5.65e-06	8.87e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.1	0.0909	-0.541	0.00032	0.000271	5.27e-06	9.4e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.1	0.0909	-0.541	0.00028	3.96e-05	3.62e-06	9.76e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-81.1	0.0909	-0.541	1.52e-06	0.000279	3.42e-06	0.000101	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
11	-81.1	0.0909	-0.541	0	1.52e-06	8.1e-07	0.000102	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 84, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.0723	-0.533	0.00123	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.1	0.0723	-0.533	0.000982	0.000252	1.11e-05	1.11e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.1	0.0723	-0.533	0.000625	0.000356	8.51e-06	1.96e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.1	0.0723	-0.533	0.000586	3.94e-05	5.52e-06	2.51e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.1	0.0723	-0.533	0.00039	0.000196	5.24e-06	3.04e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.1	0.0723	-0.533	8.2e-05	0.000308	3.99e-06	3.44e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.1	0.0723	-0.533	3.38e-05	4.83e-05	2.56e-06	3.69e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.1	0.0722	-0.533	2.8e-05	5.81e-06	2.32e-06	3.92e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.1	0.0722	-0.533	2.16e-05	6.32e-06	2.27e-06	4.15e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.1	0.0722	-0.533	1.71e-05	4.59e-06	2.2e-06	4.37e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-81.1	0.0722	-0.533	1.28e-05	4.24e-06	2.1e-06	4.58e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
11	-81.1	0.0722	-0.533	7.61e-06	5.21e-06	1.92e-06	4.77e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
12	-81.1	0.0722	-0.533	0	7.61e-06	1.52e-06	4.92e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 83, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.0534	-0.532	0.00224	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.1	0.0534	-0.532	0.00185	0.00039	2.49e-05	2.49e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.1	0.0534	-0.532	0.00141	0.00044	1.89e-05	4.37e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.1	0.0534	-0.532	0.0011	0.000311	1.31e-05	5.68e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.1	0.0534	-0.532	0.000837	0.000261	9.67e-06	6.65e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.1	0.0534	-0.532	0.000655	0.000183	7.2e-06	7.37e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.1	0.0534	-0.532	0.000572	8.24e-05	5.73e-06	7.94e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.1	0.0534	-0.532	0.000386	0.000186	5.14e-06	8.46e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.1	0.0534	-0.532	0.000312	7.41e-05	3.97e-06	8.86e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.1	0.0534	-0.532	3.51e-05	0.000277	3.58e-06	9.21e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-81.1	0.0534	-0.532	0	3.51e-05	2.33e-06	9.45e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 82, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.043	-0.522	0.00155	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.1	0.043	-0.522	0.00142	0.000124	1.48e-05	1.48e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.1	0.043	-0.522	0.00127	0.000155	1.32e-05	2.8e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.1	0.043	-0.522	0.00115	0.000118	1.14e-05	3.94e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.1	0.043	-0.522	0.000856	0.000292	1.02e-05	4.96e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.1	0.043	-0.522	0.000524	0.000332	7.37e-06	5.7e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.1	0.043	-0.522	0.000233	0.000292	4.82e-06	6.18e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.1	0.043	-0.522	0	0.000233	3.19e-06	6.5e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 81, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.0682	-0.488	0.00198	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.1	0.0682	-0.488	0.00153	0.000458	2.08e-05	2.08e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.1	0.0682	-0.488	0.00107	0.000457	1.45e-05	3.54e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.1	0.0682	-0.488	0.000792	0.000277	9.36e-06	4.47e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.1	0.0682	-0.488	0.000597	0.000195	6.82e-06	5.15e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.1	0.0682	-0.488	0.000271	0.000326	5.32e-06	5.69e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.1	0.0682	-0.488	6.42e-05	0.000207	3.37e-06	6.02e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.1	0.0682	-0.488	0	6.42e-05	2.48e-06	6.27e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 80, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.0996	-0.493	0.00134	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.0996	-0.493	0.0013	4.31e-05	1.23e-05	1.23e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.0996	-0.493	0.000988	0.000313	1.18e-05	2.42e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.0996	-0.493	0.000685	0.000303	8.57e-06	3.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.0996	-0.493	0.000524	0.000161	5.96e-06	3.87e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.0996	-0.493	0.00041	0.000114	4.82e-06	4.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.0996	-0.493	0.000213	0.000197	4.11e-06	4.76e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.0996	-0.493	8.53e-05	0.000128	3.1e-06	5.07e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.1	0.0996	-0.493	9.94e-06	7.53e-05	2.57e-06	5.33e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.1	0.0996	-0.493	1.13e-06	8.82e-06	1.63e-06	5.49e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.1	0.0996	-0.493	0	1.13e-06	6.97e-07	5.56e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 79, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.111	-0.491	0.0068	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.111	-0.491	0.0065	0.0003	0.000159	0.000159	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.111	-0.491	0.00565	0.000842	0.000146	0.000305	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.111	-0.491	0.00462	0.00103	0.000114	0.000419	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.111	-0.491	0.0039	0.000721	8.06e-05	0.0005	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.111	-0.491	0.00337	0.00053	6.03e-05	0.00056	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.111	-0.491	0.00303	0.000343	4.73e-05	0.000608	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.111	-0.491	0.00248	0.000552	3.97e-05	0.000647	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.1	0.111	-0.491	0.00198	0.000494	2.89e-05	0.000676	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.1	0.111	-0.491	0.00163	0.000349	2.08e-05	0.000697	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.1	0.111	-0.491	0.00147	0.000163	1.59e-05	0.000713	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.1	0.111	-0.491	0.00128	0.000187	1.38e-05	0.000727	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.1	0.111	-0.491	0.00101	0.000279	1.16e-05	0.000738	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.1	0.111	-0.491	0.000859	0.000146	8.74e-06	0.000747	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.1	0.111	-0.491	0.000529	0.00033	7.39e-06	0.000755	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.1	0.111	-0.491	0.000456	7.3e-05	4.85e-06	0.000759	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.1	0.111	-0.491	0.000202	0.000255	4.39e-06	0.000764	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.1	0.111	-0.491	2.38e-05	0.000178	3.05e-06	0.000767	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.1	0.111	-0.491	4.19e-07	2.34e-05	2.23e-06	0.000769	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.1	0.111	-0.491	0	4.19e-07	4.25e-07	0.00077	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 78, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.122	-0.485	0.00386	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.122	-0.485	0.00315	0.00071	5.91e-05	5.91e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.122	-0.485	0.003	0.000149	4.22e-05	0.000101	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.122	-0.485	0.00239	0.000607	3.91e-05	0.00014	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.122	-0.485	0.00226	0.000135	2.74e-05	0.000168	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.122	-0.485	0.00193	0.000325	2.51e-05	0.000193	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.122	-0.485	0.00177	0.000163	2.01e-05	0.000213	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.122	-0.485	0.00145	0.000316	1.77e-05	0.000231	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.1	0.122	-0.485	0.00142	2.92e-05	1.36e-05	0.000244	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.1	0.122	-0.485	0.00106	0.000363	1.33e-05	0.000258	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.1	0.122	-0.485	0.000988	7.15e-05	9.27e-06	0.000267	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.1	0.122	-0.485	0.000624	0.000364	8.57e-06	0.000275	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.1	0.122	-0.485	0.000498	0.000126	5.51e-06	0.000281	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.1	0.122	-0.485	0.00022	0.000279	4.65e-06	0.000286	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.1	0.122	-0.485	1.05e-05	0.000209	3.13e-06	0.000289	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.1	0.122	-0.485	9.07e-07	9.56e-06	1.7e-06	0.00029	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.1	0.122	-0.485	0	9.07e-07	6.25e-07	0.000291	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 77, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.134	-0.472	0.00137	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.134	-0.472	0.00121	0.000164	1.26e-05	1.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.134	-0.472	0.000917	0.000291	1.08e-05	2.34e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.134	-0.472	0.000893	2.42e-05	7.91e-06	3.14e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.134	-0.472	0.000595	0.000298	7.69e-06	3.9e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.134	-0.472	0.000478	0.000117	5.3e-06	4.43e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.134	-0.472	0.00026	0.000219	4.52e-06	4.89e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.134	-0.472	6.93e-05	0.00019	3.32e-06	5.22e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.1	0.134	-0.472	0	6.93e-05	2.5e-06	5.47e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 76, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	Stepleng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.138	-0.468	0.00102	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.138	-0.468	0.000903	0.000116	8.87e-06	8.87e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.138	-0.468	0.000558	0.000345	7.79e-06	1.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.138	-0.468	0.000481	7.72e-05	5.04e-06	2.17e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.138	-0.468	0.00023	0.000251	4.54e-06	2.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.138	-0.468	1.94e-05	0.00021	3.18e-06	2.94e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.138	-0.468	6.88e-06	1.26e-05	2.16e-06	3.16e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.138	-0.468	0	6.88e-06	1.48e-06	3.31e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 75, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	Stepleng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.143	-0.459	0.00514	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.143	-0.459	0.00428	0.000863	9.69e-05	9.69e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.143	-0.458	0.00369	0.000594	7.06e-05	0.000168	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.143	-0.458	0.00328	0.000401	5.48e-05	0.000222	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.143	-0.458	0.00277	0.000515	4.53e-05	0.000268	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.143	-0.458	0.00269	7.75e-05	3.44e-05	0.000302	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.143	-0.458	0.00228	0.000414	3.29e-05	0.000335	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.143	-0.458	0.00217	0.000111	2.55e-05	0.00036	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.1	0.143	-0.458	0.00188	0.000283	2.37e-05	0.000384	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.1	0.143	-0.458	0.00169	0.000198	1.94e-05	0.000403	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.1	0.143	-0.458	0.00148	0.000207	1.66e-05	0.00042	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.1	0.143	-0.458	0.00136	0.000124	1.39e-05	0.000434	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.1	0.143	-0.458	0.00103	0.000329	1.25e-05	0.000446	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.1	0.143	-0.458	0.000759	0.000268	8.95e-06	0.000455	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.1	0.143	-0.458	0.000749	9.45e-06	6.55e-06	0.000462	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.1	0.143	-0.458	0.000402	0.000347	6.47e-06	0.000468	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.1	0.143	-0.458	0.000188	0.000214	4.07e-06	0.000473	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.1	0.143	-0.458	1.42e-05	0.000174	2.99e-06	0.000476	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.1	0.143	-0.458	0	1.42e-05	2e-06	0.000478	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 74, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	Stepleng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.146	-0.454	0.0045	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.146	-0.454	0.00367	0.00083	7.7e-05	7.7e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.146	-0.454	0.00301	0.000661	5.45e-05	0.000132	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.146	-0.454	0.00238	0.000635	3.94e-05	0.000171	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.146	-0.454	0.00215	0.000223	2.72e-05	0.000198	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.146	-0.454	0.00198	0.00017	2.34e-05	0.000221	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.146	-0.454	0.00162	0.00036	2.08e-05	0.000242	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.146	-0.454	0.00152	0.000101	1.58e-05	0.000258	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.1	0.146	-0.454	0.00118	0.000339	1.45e-05	0.000273	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.1	0.146	-0.454	0.00089	0.000293	1.05e-05	0.000283	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.1	0.146	-0.454	0.000849	4.09e-05	7.67e-06	0.000291	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.1	0.146	-0.454	0.0007	0.00015	7.31e-06	0.000298	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.1	0.146	-0.454	0.000624	7.55e-05	6.08e-06	0.000304	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.1	0.146	-0.454	0.000429	0.000195	5.51e-06	0.00031	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.1	0.146	-0.454	0.000419	9.69e-06	4.22e-06	0.000314	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.1	0.146	-0.454	0.000341	7.77e-05	4.16e-06	0.000318	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.1	0.146	-0.454	0.000111	0.00023	3.73e-06	0.000322	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.1	0.146	-0.454	5.78e-05	5.32e-05	2.67e-06	0.000324	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.1	0.146	-0.454	3.74e-05	2.04e-05	2.45e-06	0.000327	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.1	0.146	-0.454	2.89e-05	8.51e-06	2.34e-06	0.000329	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.1	0.146	-0.454	0	2.89e-05	2.28e-06	0.000332	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 73, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	Stepleng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.1	0.156	-0.446	0.001	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.1	0.156	-0.446	0.000968	3.62e-05	8.73e-06	8.73e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.1	0.156	-0.446	0.000615	0.000353	8.39e-06	1.71e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.1	0.156	-0.446	0.000285	0.00033	5.45e-06	2.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.1	0.156	-0.446	0.000212	7.31e-05	3.44e-06	2.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.1	0.156	-0.446	0.000125	8.69e-05	3.1e-06	2.91e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.1	0.156	-0.446	4.19e-05	8.31e-05	2.73e-06	3.18e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.1	0.156	-0.446	0	4.19e-05	2.37e-06	3.42e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 72, Parent ID = 2

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

```
*****
Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm)  KinE(MeV)  dE(MeV)  Stepleng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -81.2  0.163  -0.433  0.00232    0          0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -81.2  0.163  -0.433  0.00198    0.000345  2.62e-05  2.62e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -81.2  0.163  -0.433  0.0016    0.000378  2.07e-05  4.7e-05   SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -81.2  0.163  -0.433  0.00131    0.000289  1.55e-05  6.24e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -81.2  0.163  -0.433  0.000912   0.000399  1.19e-05  7.44e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -81.2  0.163  -0.433  0.000631   0.000281  7.87e-06  8.23e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -81.2  0.163  -0.433  0.000406   0.000225  5.56e-06  8.78e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -81.2  0.163  -0.433  0.000293   0.000113  4.09e-06  9.19e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -81.2  0.163  -0.433  2.55e-05   0.000268  3.48e-06  9.54e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
9      -81.2  0.163  -0.433  2.28e-05   2.7e-06   2.25e-06  9.76e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
10     -81.2  0.163  -0.433  1.42e-05   8.56e-06  2.21e-06  9.99e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
11     -81.2  0.163  -0.433  0          1.42e-05  2e-06     0.000102  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
```

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 71, Parent ID = 2

```
*****
Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm)  KinE(MeV)  dE(MeV)  Stepleng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -81.2  0.168  -0.425  0.0012    0          0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -81.2  0.168  -0.425  0.00113   6.86e-05  1.07e-05  1.07e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -81.2  0.168  -0.425  0.00111   1.94e-05  9.99e-06  2.07e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -81.2  0.168  -0.425  0.000839  0.000273  9.8e-06   3.05e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -81.2  0.168  -0.425  0.00066  0.000179  7.22e-06  3.77e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -81.2  0.168  -0.425  0.000468  0.000191  5.77e-06  4.35e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -81.2  0.168  -0.425  0.000217  0.000251  4.46e-06  4.8e-05   SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -81.2  0.168  -0.425  0.000136  8.14e-05  3.12e-06  5.11e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -81.2  0.168  -0.425  9.01e-05  4.56e-05  2.77e-06  5.38e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
9      -81.2  0.168  -0.425  0          9.01e-05  2.59e-06  5.64e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
```

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 70, Parent ID = 2

```
*****
Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm)  KinE(MeV)  dE(MeV)  Stepleng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -81.2  0.17   -0.42  0.00623    0          0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -81.2  0.17   -0.42  0.00556    0.00067  0.000136  0.000136  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -81.2  0.17   -0.42  0.00491    0.000647  0.000111  0.000247  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -81.2  0.17   -0.42  0.00485    6.36e-05  8.94e-05  0.000336  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -81.2  0.17   -0.42  0.00415    0.000696  8.74e-05  0.000424  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -81.2  0.17   -0.42  0.00389    0.000261  6.7e-05   0.000491  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -81.2  0.17   -0.42  0.00308    0.000809  6e-05    0.000551  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -81.2  0.17   -0.42  0.0029  0.000182  4.08e-05  0.000591  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -81.2  0.17   -0.42  0.00214    0.000753  3.7e-05   0.000628  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
9      -81.2  0.17   -0.42  0.00171    0.00043  2.33e-05  0.000652  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
10     -81.2  0.17   -0.42  0.00122    0.000495  1.7e-05   0.000669  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
11     -81.2  0.17   -0.42  0.00108    0.00014  1.09e-05  0.00068  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
12     -81.2  0.17   -0.42  0.000919  0.000161  9.48e-06  0.000689  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
13     -81.2  0.17   -0.42  0.000581  0.000338  7.93e-06  0.000697  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
14     -81.2  0.17   -0.42  0.000458  0.000123  5.2e-06   0.000702  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
15     -81.2  0.17   -0.42  0.000396  6.24e-05  4.4e-06   0.000707  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
16     -81.2  0.17   -0.42  0.000268  0.000128  4.03e-06  0.000711  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
17     -81.2  0.17   -0.42  0.000155  0.000113  3.36e-06  0.000714  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
18     -81.2  0.17   -0.42  0          0.000155  2.85e-06  0.000717  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
```

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 69, Parent ID = 2

```
*****
Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm)  KinE(MeV)  dE(MeV)  Stepleng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -81.2  0.178  -0.408  0.00115    0          0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -81.2  0.178  -0.408  0.00083  0.000325  1.02e-05  1.02e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -81.2  0.178  -0.408  0.000787  4.29e-05  7.14e-06  1.74e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -81.2  0.178  -0.408  0.000753  3.32e-05  6.77e-06  2.42e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -81.2  0.178  -0.408  0.000616  0.000137  6.5e-06   3.07e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -81.2  0.178  -0.408  0.000468  0.000148  5.45e-06  3.61e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -81.2  0.178  -0.408  0.000375  9.33e-05  4.46e-06  4.06e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -81.2  0.178  -0.408  0.000274  0.0001  3.91e-06  4.45e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -81.2  0.178  -0.408  0.000178  9.61e-05  3.39e-06  4.79e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
9      -81.2  0.178  -0.408  0.000102  7.63e-05  2.95e-06  5.08e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
10     -81.2  0.178  -0.408  1.85e-05  8.35e-05  2.64e-06  5.35e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
11     -81.2  0.178  -0.408  0          1.85e-05  2.14e-06  5.56e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
```

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 68, Parent ID = 2

```
*****
Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm)  KinE(MeV)  dE(MeV)  Stepleng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -81.2  0.179  -0.403  0.001    0          0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -81.2  0.179  -0.403  0.000689  0.000314  8.71e-06  8.71e-06  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
```

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

2	-81.2	0.179	-0.403	0.00039	0.000299	5.99e-06	1.47e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.179	-0.403	0.000146	0.000244	4e-06	1.87e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.179	-0.403	4.89e-05	9.7e-05	2.81e-06	2.15e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.179	-0.403	2.69e-05	2.2e-05	2.41e-06	2.39e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.179	-0.403	9.28e-06	1.76e-05	2.26e-06	2.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.179	-0.403	0	9.28e-06	1.6e-06	2.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 67, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.188	-0.397	0.0013	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.188	-0.397	0.000942	0.000359	1.18e-05	1.18e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.188	-0.397	0.000869	7.3e-05	8.14e-06	2e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.188	-0.397	0.000724	0.000144	7.48e-06	2.74e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.188	-0.397	0.000656	6.82e-05	6.27e-06	3.37e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.188	-0.397	0.000469	0.000187	5.75e-06	3.95e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.188	-0.397	0.000173	0.000296	4.47e-06	4.39e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.188	-0.397	5.74e-05	0.000115	2.93e-06	4.69e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.188	-0.397	0	5.74e-05	2.45e-06	4.93e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 66, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.188	-0.393	0.00103	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.188	-0.393	0.000868	0.000162	8.98e-06	8.98e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.188	-0.393	0.000701	0.000167	7.47e-06	1.64e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.188	-0.393	0.000439	0.000261	6.08e-06	2.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.188	-0.393	0.000217	0.000222	4.28e-06	2.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.188	-0.393	0.000109	0.000109	3.12e-06	2.99e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.188	-0.393	3.58e-05	7.29e-05	2.66e-06	3.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.188	-0.393	2.4e-06	3.34e-05	2.33e-06	3.49e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.188	-0.393	0	2.4e-06	1.02e-06	3.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 65, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.189	-0.39	0.0019	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.189	-0.39	0.00171	0.000192	1.96e-05	1.96e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.189	-0.39	0.0015	0.000205	1.69e-05	3.65e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.189	-0.39	0.00122	0.000286	1.42e-05	5.08e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.189	-0.39	0.00112	9.3e-05	1.09e-05	6.17e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.189	-0.39	0.000942	0.000182	9.93e-06	7.16e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.189	-0.39	0.000591	0.000352	8.14e-06	7.98e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.189	-0.39	0.000478	0.000112	5.27e-06	8.5e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.189	-0.39	0.000383	9.55e-05	4.52e-06	8.95e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.2	0.189	-0.39	0.000152	0.000231	3.96e-06	9.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.2	0.189	-0.39	0	0.000152	2.84e-06	9.63e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 64, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.2	0.189	-0.39	0.00176	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.189	-0.39	0.00163	0.000134	1.76e-05	1.76e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.189	-0.39	0.00129	0.000336	1.58e-05	3.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.189	-0.39	0.000955	0.000336	1.17e-05	4.52e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.189	-0.39	0.00071	0.000245	8.26e-06	5.34e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.189	-0.39	0.000563	0.000147	6.16e-06	5.96e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.189	-0.39	0.000412	0.00015	5.08e-06	6.47e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.189	-0.39	0.000377	3.51e-05	4.13e-06	6.88e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.189	-0.39	0.000332	4.57e-05	3.93e-06	7.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.2	0.189	-0.39	0.000263	6.89e-05	3.68e-06	7.64e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.2	0.189	-0.39	3.98e-05	0.000223	3.33e-06	7.97e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.2	0.189	-0.39	3.93e-05	4.72e-07	2.36e-06	8.21e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.2	0.189	-0.39	2.98e-05	9.51e-06	2.36e-06	8.44e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.2	0.189	-0.39	2.83e-05	1.44e-06	2.29e-06	8.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.2	0.189	-0.39	1.67e-05	1.17e-05	2.28e-06	8.9e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.2	0.189	-0.39	7e-06	9.68e-06	2.09e-06	9.11e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.2	0.189	-0.39	0	7e-06	1.49e-06	9.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 63, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
-------	-------	-------	-------	-----------	---------	----------	-----------	------------	----------

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

0	-81.2	0.19	-0.387	0.00171	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.2	0.19	-0.387	0.0013	0.000408	1.7e-05	1.7e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.2	0.19	-0.387	0.00104	0.000259	1.19e-05	2.88e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.2	0.19	-0.387	0.000999	4.6e-05	9.12e-06	3.79e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.2	0.19	-0.387	0.000629	0.00037	8.67e-06	4.66e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.2	0.19	-0.387	0.000441	0.000187	5.55e-06	5.22e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.2	0.19	-0.387	0.000324	0.000117	4.3e-06	5.65e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.2	0.19	-0.387	9.07e-05	0.000234	3.64e-06	6.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.2	0.19	-0.387	0	9.07e-05	2.59e-06	6.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 62, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.157	-0.382	0.00152	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.157	-0.382	0.00121	0.00031	1.45e-05	1.45e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.157	-0.382	0.00117	4.15e-05	1.09e-05	2.54e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.157	-0.382	0.000871	0.000302	1.04e-05	3.58e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.157	-0.382	0.000789	8.2e-05	7.5e-06	4.33e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.157	-0.382	0.000475	0.000314	6.79e-06	5.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.157	-0.382	0.000229	0.000246	4.5e-06	5.46e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.157	-0.382	0.000193	3.58e-05	3.17e-06	5.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.157	-0.382	2.43e-05	0.000169	3.01e-06	6.08e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.157	-0.382	1.81e-05	6.22e-06	2.23e-06	6.3e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.157	-0.382	2.7e-06	1.54e-05	2.13e-06	6.52e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.157	-0.382	0	2.7e-06	1.07e-06	6.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 61, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.156	-0.381	0.00899	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.156	-0.381	0.00824	0.000749	0.000263	0.000263	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.156	-0.381	0.00737	0.000868	0.000225	0.000488	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.156	-0.381	0.00623	0.00115	0.000184	0.000672	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.156	-0.381	0.00537	0.000864	0.000136	0.000808	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.156	-0.381	0.00502	0.000344	0.000104	0.000912	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.156	-0.381	0.00462	0.000397	9.3e-05	0.001	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.156	-0.381	0.0038	0.000826	8.06e-05	0.00109	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.156	-0.381	0.00343	0.00037	5.76e-05	0.00114	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.156	-0.381	0.00303	0.000402	4.86e-05	0.00119	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.156	-0.381	0.00266	0.000367	3.97e-05	0.00123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.156	-0.381	0.00228	0.000382	3.23e-05	0.00126	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.3	0.156	-0.381	0.00204	0.000234	2.55e-05	0.00129	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.3	0.156	-0.381	0.00159	0.000457	2.17e-05	0.00131	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.3	0.156	-0.381	0.00144	0.00015	1.53e-05	0.00133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.3	0.156	-0.381	0.00102	0.000418	1.34e-05	0.00134	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.3	0.156	-0.381	0.000789	0.000229	8.86e-06	0.00135	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.3	0.156	-0.381	0.000716	7.29e-05	6.79e-06	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.3	0.156	-0.381	0.000429	0.000287	6.2e-06	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.3	0.156	-0.381	0.000407	2.16e-05	4.22e-06	0.00137	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.3	0.156	-0.381	0.000356	5.18e-05	4.1e-06	0.00137	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-81.3	0.156	-0.381	4.75e-05	0.000308	3.81e-06	0.00137	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-81.3	0.156	-0.381	2.96e-06	4.45e-05	2.4e-06	0.00138	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-81.3	0.156	-0.381	0	2.96e-06	1.12e-06	0.00138	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 60, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.144	-0.376	0.117	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.138	-0.392	0.106	0.00971	0.0171	0.0171	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.137	-0.394	0.103	0.00104	0.00185	0.019	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.138	-0.41	0.0914	0.0104	0.0195	0.0385	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.127	-0.424	0.0789	0.0125	0.0178	0.0563	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.127	-0.427	0.0658	0.0031	0.00338	0.0597	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.128	-0.43	0.0605	0.0027	0.00245	0.0621	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.13	-0.437	0.0533	0.00528	0.00748	0.0696	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.129	-0.439	0.0495	0.00278	0.00202	0.0716	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.126	-0.442	0.0424	0.00504	0.00456	0.0762	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.128	-0.443	0.0387	0.00362	0.00447	0.0806	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.129	-0.444	0.0355	0.00326	0.00379	0.0844	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.3	0.131	-0.447	0.0323	0.00315	0.00323	0.0877	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.3	0.133	-0.447	0.0291	0.00318	0.00273	0.0904	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.3	0.133	-0.448	0.0269	0.00046	0.000378	0.0908	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.3	0.134	-0.446	0.0248	0.00219	0.00196	0.0927	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.3	0.134	-0.444	0.0197	0.00383	0.00165	0.0944	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.3	0.134	-0.443	0.0157	0.00395	0.0011	0.0955	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.3	0.134	-0.443	0.014	0.00172	0.000727	0.0962	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

19	-81.3	0.133	-0.443	0.00994	0.00406	0.000588	0.0968	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.3	0.133	-0.443	0.0078	0.00105	0.00024	0.097	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-81.3	0.133	-0.443	0.00723	0.000571	0.000203	0.0972	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-81.3	0.133	-0.443	0.00624	0.000987	0.000177	0.0974	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-81.3	0.133	-0.443	0.0048	0.00144	0.000136	0.0975	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-81.3	0.133	-0.443	0.00416	0.000643	8.6e-05	0.0976	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-81.3	0.133	-0.443	0.00342	0.000733	6.71e-05	0.0977	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-81.3	0.133	-0.443	0.00273	0.000689	4.85e-05	0.0977	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-81.3	0.133	-0.443	0.00254	0.000196	3.37e-05	0.0978	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-81.3	0.133	-0.443	0.00227	0.000271	3.01e-05	0.0978	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
29	-81.3	0.133	-0.443	0.00177	0.000498	2.53e-05	0.0978	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
30	-81.3	0.133	-0.443	0.00139	0.000382	1.77e-05	0.0978	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
31	-81.3	0.133	-0.443	0.00102	0.000366	1.28e-05	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
32	-81.3	0.133	-0.443	0.000993	2.93e-05	8.91e-06	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
33	-81.3	0.133	-0.443	0.000978	1.49e-05	8.62e-06	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
34	-81.3	0.133	-0.443	0.000715	0.000263	8.48e-06	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
35	-81.3	0.133	-0.443	0.000579	0.000136	6.2e-06	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
36	-81.3	0.133	-0.443	0.000474	0.000105	5.19e-06	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
37	-81.3	0.133	-0.443	0.000262	0.000212	4.5e-06	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
38	-81.3	0.133	-0.443	0	0.000262	3.33e-06	0.0979	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 105, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.133	-0.443	0.00109	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.3	0.133	-0.443	0.00094	0.000152	9.6e-06	9.6e-06	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.3	0.133	-0.443	0.000772	0.000168	8.12e-06	1.77e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.3	0.133	-0.443	0.000597	0.000175	6.65e-06	2.44e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.3	0.133	-0.443	0.000461	0.000136	5.31e-06	2.97e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.3	0.133	-0.443	0.000454	6.2e-06	4.41e-06	3.41e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.3	0.133	-0.443	0.000215	0.00024	4.38e-06	3.85e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.3	0.133	-0.443	0.000114	0.0001	3.11e-06	4.16e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.3	0.133	-0.443	0	0.000114	2.69e-06	4.43e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 104, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.134	-0.444	0.00126	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.3	0.134	-0.444	0.000991	0.000268	1.14e-05	1.14e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.3	0.134	-0.444	0.000647	0.000344	8.6e-06	2e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.3	0.134	-0.444	0.000529	0.000118	5.68e-06	2.56e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.3	0.134	-0.444	0.00032	0.000209	4.85e-06	3.05e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.3	0.134	-0.444	8.12e-05	0.000239	3.62e-06	3.41e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.3	0.134	-0.444	1.03e-05	7.08e-05	2.55e-06	3.67e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.3	0.134	-0.444	0	1.03e-05	1.68e-06	3.83e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 103, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.133	-0.448	0.00174	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.3	0.133	-0.448	0.00161	0.000129	1.74e-05	1.74e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.3	0.133	-0.447	0.00116	0.000453	1.56e-05	3.3e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.3	0.133	-0.447	0.001	0.000157	1.03e-05	4.33e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.3	0.133	-0.447	0.000765	0.000238	8.71e-06	5.2e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.3	0.133	-0.447	0.000586	0.000179	6.59e-06	5.86e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.3	0.133	-0.447	0.000462	0.000124	5.24e-06	6.38e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.3	0.133	-0.447	0.000382	7.98e-05	4.42e-06	6.83e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.3	0.133	-0.447	0.000231	0.000151	3.95e-06	7.22e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.3	0.133	-0.447	0.000166	6.49e-05	3.18e-06	7.54e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
10	-81.3	0.133	-0.447	0	0.000166	2.9e-06	7.83e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 102, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.126	-0.442	0.0021	0	0	0	0	SlabVariablePhys initStep
1	-81.3	0.126	-0.442	0.00178	0.000329	2.27e-05	2.27e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
2	-81.3	0.126	-0.442	0.00161	0.00017	1.78e-05	4.05e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
3	-81.3	0.126	-0.442	0.00119	0.00042	1.55e-05	5.61e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
4	-81.3	0.126	-0.442	0.00117	1.15e-05	1.06e-05	6.66e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
5	-81.3	0.126	-0.442	0.000967	0.000208	1.05e-05	7.71e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
6	-81.3	0.126	-0.442	0.000636	0.000331	8.37e-06	8.55e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
7	-81.3	0.126	-0.442	0.000443	0.000194	5.6e-06	9.11e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
8	-81.3	0.126	-0.442	0.00014	0.000302	4.3e-06	9.54e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni
9	-81.3	0.126	-0.442	0	0.00014	2.79e-06	9.82e-05	0	SlabVariablePhys LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 101, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.129	-0.439	0.00101	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.129	-0.439	0.000694	0.000319	8.81e-06	8.81e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.129	-0.439	0.000653	4.08e-05	6.03e-06	1.48e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.129	-0.439	0.000397	0.000256	5.73e-06	2.06e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.129	-0.439	0.00023	0.000167	4.04e-06	2.46e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.129	-0.439	8.96e-05	0.00014	3.18e-06	2.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.129	-0.439	3.99e-06	8.56e-05	2.59e-06	3.04e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.129	-0.439	0	3.99e-06	1.25e-06	3.16e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 100, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.13	-0.437	0.00194	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.13	-0.437	0.00169	0.000247	2.01e-05	2.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.13	-0.437	0.00154	0.00015	1.67e-05	3.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.13	-0.437	0.0014	0.000136	1.47e-05	5.15e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.13	-0.437	0.00135	5.71e-05	1.3e-05	6.46e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.13	-0.437	0.00107	0.000275	1.24e-05	7.69e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.13	-0.437	0.00106	1.29e-05	9.4e-06	8.63e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.13	-0.437	0.000982	7.78e-05	9.27e-06	9.56e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.13	-0.437	0.000957	2.5e-05	8.52e-06	0.000104	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.13	-0.437	0.000722	0.000235	8.28e-06	0.000112	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.13	-0.437	0.000625	9.62e-05	6.25e-06	0.000119	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.13	-0.437	0.000491	0.000135	5.52e-06	0.000124	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.3	0.13	-0.437	0.000397	9.36e-05	4.6e-06	0.000129	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.3	0.13	-0.437	0.000376	2.04e-05	4.04e-06	0.000133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.3	0.13	-0.437	0.000304	7.27e-05	3.92e-06	0.000137	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.3	0.13	-0.437	6.47e-05	0.000239	3.53e-06	0.00014	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.3	0.13	-0.437	1.57e-05	4.9e-05	2.48e-06	0.000143	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.3	0.13	-0.437	0	1.57e-05	2.06e-06	0.000145	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 99, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.128	-0.43	0.00255	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.128	-0.43	0.00248	6.73e-05	3.03e-05	3.03e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.128	-0.43	0.00215	0.00033	2.91e-05	5.94e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.128	-0.43	0.0019	0.000257	2.34e-05	8.28e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.128	-0.43	0.00176	0.000135	1.95e-05	0.000102	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.128	-0.43	0.00145	0.000316	1.76e-05	0.00012	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.128	-0.43	0.00123	0.000213	1.35e-05	0.000134	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.128	-0.43	0.00109	0.000143	1.11e-05	0.000145	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.128	-0.43	0.000917	0.000173	9.58e-06	0.000154	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.128	-0.43	0.000865	5.21e-05	7.91e-06	0.000162	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.128	-0.43	0.000569	0.000296	7.45e-06	0.00017	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.128	-0.43	0.000331	0.000239	5.12e-06	0.000175	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.3	0.128	-0.43	0.00013	0.0002	3.67e-06	0.000178	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.3	0.128	-0.43	2.8e-05	0.000102	2.75e-06	0.000181	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.3	0.128	-0.43	9.9e-06	1.81e-05	2.27e-06	0.000183	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.3	0.128	-0.43	1.12e-06	8.78e-06	1.63e-06	0.000185	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.3	0.128	-0.43	0	1.12e-06	6.94e-07	0.000186	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 98, Parent ID = 60

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.127	-0.427	0.0101	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.127	-0.427	0.00871	0.00137	0.000324	0.000324	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.127	-0.427	0.00805	0.000652	0.000248	0.000572	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.127	-0.427	0.00703	0.00103	0.000216	0.000788	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.127	-0.427	0.00624	0.000789	0.000169	0.000956	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.128	-0.427	0.00498	0.000202	0.0001	0.00106	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.128	-0.427	0.0036	0.000214	9.15e-05	0.00115	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.128	-0.427	0.0032	0.000402	5.27e-05	0.0012	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.128	-0.427	0.00267	0.000534	4.34e-05	0.00124	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.128	-0.427	0.00198	0.000687	3.25e-05	0.00128	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.128	-0.427	0.0017	0.000275	2.08e-05	0.0013	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.128	-0.427	0.00129	0.000411	1.69e-05	0.00131	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.3	0.128	-0.427	0.000949	0.000344	1.17e-05	0.00133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.3	0.128	-0.427	0.000651	0.000298	8.21e-06	0.00133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.3	0.128	-0.427	0.000509	0.000141	5.71e-06	0.00134	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

15	-81.3	0.128	-0.427	0.000485	2.47e-05	4.72e-06	0.00134	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.3	0.128	-0.427	0.000362	0.000123	4.56e-06	0.00135	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.3	0.128	-0.427	0.000307	5.51e-05	3.84e-06	0.00135	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.3	0.128	-0.427	2.28e-05	0.000284	3.55e-06	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.3	0.128	-0.427	1.98e-05	3.04e-06	2.21e-06	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.3	0.128	-0.427	1.24e-05	7.36e-06	2.16e-06	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-81.3	0.128	-0.427	4.06e-06	8.38e-06	1.89e-06	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-81.3	0.128	-0.427		0 4.06e-06	1.26e-06	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 107, Parent ID = 98

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.128	-0.427	0.00116	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.128	-0.427	0.00105	0.000113	1.03e-05	1.03e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.128	-0.427	0.000976	7.19e-05	9.15e-06	1.95e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.128	-0.427	0.000836	0.00014	8.46e-06	2.79e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.128	-0.427	0.000828	7.51e-06	7.19e-06	3.51e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.128	-0.427	0.000504	0.000324	7.12e-06	4.22e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.128	-0.427	0.000315	0.000189	4.69e-06	4.69e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.128	-0.427	0.000141	0.000174	3.59e-06	5.05e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.128	-0.427	6.69e-05	7.45e-05	2.8e-06	5.33e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.128	-0.427	4.41e-05	2.27e-05	2.49e-06	5.58e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.128	-0.427	6.67e-06	3.75e-05	2.38e-06	5.82e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.128	-0.427		0 6.67e-06	1.47e-06	5.96e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 106, Parent ID = 98

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.128	-0.427	0.00106	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.128	-0.427	0.000699	0.000362	9.29e-06	9.29e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.128	-0.427	0.000622	7.74e-05	6.07e-06	1.54e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.128	-0.427	0.000537	8.51e-05	5.49e-06	2.09e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.128	-0.427	0.000248	0.000289	4.9e-06	2.58e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.128	-0.427	6.76e-05	0.00018	3.26e-06	2.9e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.128	-0.427	3.13e-05	3.63e-05	2.5e-06	3.15e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.128	-0.427	7.8e-07	3.05e-05	2.3e-06	3.38e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.128	-0.427		0 7.8e-07	5.8e-07	3.44e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 97, Parent ID = 60

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.138	-0.41	0.00137	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.138	-0.41	0.00104	0.00033	1.26e-05	1.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.138	-0.41	0.000729	0.000308	9.05e-06	2.16e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.138	-0.41	0.000684	4.57e-05	6.31e-06	2.79e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.138	-0.41	0.000495	0.000188	5.95e-06	3.39e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.138	-0.41	0.000286	0.000209	4.63e-06	3.85e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.138	-0.41	6.26e-05	0.000224	3.45e-06	4.2e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.138	-0.41	5.53e-05	7.3e-06	2.47e-06	4.45e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.138	-0.41	9.48e-06	4.58e-05	2.44e-06	4.69e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.138	-0.41	1.02e-06	8.46e-06	1.61e-06	4.85e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.138	-0.41		0 1.02e-06	6.64e-07	4.92e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 96, Parent ID = 60

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.137	-0.394	0.00151	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.137	-0.394	0.00147	3.47e-05	1.43e-05	1.43e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.137	-0.394	0.00143	4.81e-05	1.39e-05	2.82e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.137	-0.394	0.00105	0.000374	1.33e-05	4.14e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.137	-0.394	0.000852	0.0002	9.19e-06	5.06e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.137	-0.394	0.00063	0.000221	7.33e-06	5.8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.137	-0.394	0.00058	5.04e-05	5.56e-06	6.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.137	-0.394	0.000459	0.000121	5.2e-06	6.87e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.137	-0.394	0.000247	0.000212	4.41e-06	7.31e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.137	-0.394		0 0.000247	3.26e-06	7.64e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 95, Parent ID = 60

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.138	-0.392	0.00137	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.138	-0.392	0.00116	0.000217	1.27e-05	1.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

2	-81.3	0.138	-0.392	0.00103	0.000122	1.03e-05	2.29e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.138	-0.392	0.000956	7.77e-05	9.02e-06	3.19e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.138	-0.392	0.000746	0.000211	8.27e-06	4.02e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.138	-0.392	0.000494	0.000252	6.44e-06	4.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.138	-0.392	0.000278	0.000216	4.62e-06	5.13e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.138	-0.392	0.000142	0.000136	3.4e-06	5.47e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.138	-0.392	0	0.000142	2.8e-06	5.75e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 59, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.3	0.145	-0.368	0.00378	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.3	0.145	-0.368	0.00319	0.000594	5.72e-05	5.72e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.3	0.145	-0.368	0.00296	0.000232	4.31e-05	0.0001	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.3	0.145	-0.368	0.00272	0.000241	3.82e-05	0.000139	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.3	0.145	-0.368	0.00247	0.000245	3.34e-05	0.000172	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.3	0.145	-0.368	0.00212	0.000347	2.88e-05	0.000201	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.3	0.145	-0.368	0.00185	0.000275	2.3e-05	0.000224	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.3	0.145	-0.368	0.00149	0.00036	1.89e-05	0.000243	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.3	0.145	-0.368	0.00102	0.000468	1.4e-05	0.000257	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.3	0.145	-0.368	0.000831	0.000189	8.89e-06	0.000266	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.3	0.145	-0.368	0.000756	7.56e-05	7.15e-06	0.000273	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.3	0.145	-0.368	0.000746	9.89e-06	6.52e-06	0.000279	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.3	0.145	-0.368	0.000618	0.000128	6.44e-06	0.000286	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.3	0.145	-0.368	0.00039	0.000228	5.47e-06	0.000291	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.3	0.145	-0.368	0.000305	8.56e-05	4e-06	0.000295	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.3	0.145	-0.368	0.000179	0.000126	3.54e-06	0.000299	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.3	0.145	-0.368	0	0.000179	2.95e-06	0.000302	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 58, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.4	0.14	-0.358	0.00121	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.4	0.14	-0.358	0.000915	0.000298	1.09e-05	1.09e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.4	0.14	-0.358	0.000582	0.000333	7.89e-06	1.87e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.4	0.14	-0.358	0.000318	0.000263	5.21e-06	2.4e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.4	0.14	-0.358	0	0.000318	3.61e-06	2.76e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 57, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.4	0.133	-0.334	0.00161	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.4	0.133	-0.334	0.0015	0.000102	1.55e-05	1.55e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.4	0.133	-0.334	0.00112	0.00038	1.42e-05	2.98e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.4	0.133	-0.334	0.00102	0.000104	9.92e-06	3.97e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.4	0.133	-0.334	0.000774	0.000246	8.89e-06	4.86e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.4	0.133	-0.334	0.000657	0.000117	6.67e-06	5.53e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.4	0.133	-0.334	0.000385	0.000271	5.75e-06	6.1e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.4	0.133	-0.334	0.000337	4.84e-05	3.97e-06	6.5e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.4	0.133	-0.334	0.000132	0.000205	3.71e-06	6.87e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.4	0.133	-0.334	3.81e-05	9.39e-05	2.76e-06	7.14e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.4	0.133	-0.334	2.17e-05	1.64e-05	2.35e-06	7.38e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.4	0.133	-0.334	4.03e-06	1.77e-05	2.2e-06	7.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.4	0.133	-0.334	0	4.03e-06	1.26e-06	7.73e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 56, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.5	0.138	-0.316	0.00147	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.5	0.138	-0.316	0.00134	0.000125	1.38e-05	1.38e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.5	0.138	-0.316	0.00127	7.08e-05	1.23e-05	2.61e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.5	0.138	-0.316	0.00104	0.00023	1.15e-05	3.76e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.5	0.138	-0.316	0.000741	0.000302	9.11e-06	4.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.5	0.138	-0.316	0.000421	0.000321	6.4e-06	5.32e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.5	0.138	-0.316	0.000399	2.18e-05	4.17e-06	5.73e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.5	0.138	-0.316	7.39e-05	0.000325	4.05e-06	6.14e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.5	0.138	-0.316	7.37e-05	1.99e-07	2.52e-06	6.39e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.5	0.138	-0.316	8.96e-06	6.47e-05	2.52e-06	6.64e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.5	0.138	-0.316	0	8.96e-06	1.59e-06	6.8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 55, Parent ID = 2

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.5	0.147	-0.303	0.0032	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.5	0.147	-0.303	0.00291	0.000289	4.33e-05	4.33e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.5	0.147	-0.303	0.00265	0.000254	3.72e-05	8.05e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.5	0.147	-0.303	0.0022	0.000448	3.22e-05	0.000113	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.5	0.147	-0.303	0.00159	0.000614	2.43e-05	0.000137	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.5	0.147	-0.303	0.00121	0.00038	1.53e-05	0.000152	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.5	0.147	-0.303	0.000978	0.000234	1.08e-05	0.000163	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.5	0.147	-0.303	0.000922	5.51e-05	8.47e-06	0.000172	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.5	0.147	-0.303	0.000748	0.000174	7.96e-06	0.00018	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.5	0.147	-0.303	0.000522	0.000227	6.46e-06	0.000186	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.5	0.147	-0.303	0.00042	0.000102	4.8e-06	0.000191	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.5	0.147	-0.303	0.000156	0.000263	4.17e-06	0.000195	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.5	0.147	-0.303	6.51e-05	9.11e-05	2.86e-06	0.000198	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.5	0.147	-0.303	0	6.51e-05	2.48e-06	0.0002	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 54, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.5	0.139	-0.284	0.015	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.5	0.139	-0.284	0.0137	0.00133	0.000669	0.000669	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.5	0.138	-0.284	0.0114	0.00233	0.000565	0.00123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.5	0.138	-0.284	0.0101	0.0013	0.000402	0.00164	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.5	0.138	-0.284	0.00823	0.00182	0.000323	0.00196	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.5	0.138	-0.284	0.00711	0.00113	0.000224	0.00218	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.5	0.138	-0.284	0.00565	0.00145	0.000172	0.00235	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.5	0.138	-0.284	0.0053	0.000355	0.000114	0.00247	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.5	0.137	-0.284	0.00464	0.000665	0.000102	0.00257	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.5	0.137	-0.284	0.00386	0.00078	8.09e-05	0.00265	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.5	0.137	-0.284	0.00362	0.000231	5.91e-05	0.00271	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.5	0.137	-0.284	0.00351	0.00011	5.33e-05	0.00276	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.5	0.137	-0.284	0.0032	0.000316	5.06e-05	0.00282	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.5	0.137	-0.284	0.00242	0.000777	4.34e-05	0.00286	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.5	0.137	-0.284	0.00196	0.000465	2.79e-05	0.00289	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.5	0.137	-0.284	0.00185	0.000105	2.04e-05	0.00291	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.5	0.137	-0.284	0.00168	0.000169	1.89e-05	0.00293	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.5	0.137	-0.284	0.00165	3.59e-05	1.66e-05	0.00294	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.5	0.137	-0.284	0.00148	0.000168	1.61e-05	0.00296	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.5	0.137	-0.284	0.00115	0.00033	1.39e-05	0.00297	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.5	0.137	-0.284	0.00101	0.000143	1.02e-05	0.00298	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-81.5	0.137	-0.284	0.000668	0.000339	8.75e-06	0.00299	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-81.5	0.137	-0.284	0.00059	7.82e-05	5.83e-06	0.003	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-81.5	0.137	-0.284	0.00051	7.99e-05	5.27e-06	0.003	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-81.5	0.137	-0.284	0.000469	4.12e-05	4.73e-06	0.00301	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-81.5	0.137	-0.284	0.000361	0.000107	4.46e-06	0.00301	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-81.5	0.137	-0.284	0.000265	9.58e-05	3.84e-06	0.00302	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-81.5	0.137	-0.284	0.000233	3.27e-05	3.35e-06	0.00302	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-81.5	0.137	-0.284	0	0.000233	3.19e-06	0.00302	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 53, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.6	0.129	-0.257	0.00113	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.6	0.129	-0.257	0.0009	0.000232	1e-05	1e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.6	0.129	-0.257	0.000623	0.000278	7.76e-06	1.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.6	0.129	-0.257	0.000561	6.14e-05	5.5e-06	2.33e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.6	0.129	-0.257	0.000311	0.00025	5.07e-06	2.83e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.6	0.129	-0.257	0.000161	0.00015	3.57e-06	3.19e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.6	0.129	-0.257	1.01e-06	0.00016	2.88e-06	3.48e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.6	0.129	-0.257	0	1.01e-06	6.6e-07	3.54e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 52, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.6	0.136	-0.248	0.00114	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.6	0.136	-0.248	0.00093	0.000207	1.01e-05	1.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.6	0.136	-0.248	0.000928	1.61e-06	8.03e-06	1.81e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.6	0.136	-0.248	0.000739	0.000189	8.01e-06	2.61e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.6	0.136	-0.248	0.000558	0.000181	6.39e-06	3.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.6	0.136	-0.248	0.000245	0.000313	5.05e-06	3.75e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.6	0.136	-0.248	0.000141	0.000104	3.25e-06	4.08e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.6	0.136	-0.248	0	0.000141	2.8e-06	4.36e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 51, Parent ID = 2

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.7	0.132	-0.24	0.00155	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.7	0.132	-0.24	0.00152	2.92e-05	1.48e-05	1.48e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.7	0.132	-0.24	0.00145	6.72e-05	1.45e-05	2.93e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.7	0.132	-0.24	0.00114	0.000317	1.36e-05	4.29e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.7	0.132	-0.24	0.00089	0.000248	1.01e-05	5.3e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.7	0.132	-0.24	0.000745	0.000145	7.67e-06	6.07e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.7	0.132	-0.24	0.000744	9.1e-07	6.43e-06	6.71e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.7	0.132	-0.24	0.000485	0.000259	6.42e-06	7.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.7	0.132	-0.24	0.000329	0.000156	4.56e-06	7.81e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.7	0.132	-0.24	4.92e-05	0.000279	3.66e-06	8.18e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.7	0.132	-0.24	1.04e-05	3.88e-05	2.41e-06	8.42e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.7	0.132	-0.24	8.8e-07	9.51e-06	1.69e-06	8.59e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.7	0.132	-0.24	0	8.8e-07	6.16e-07	8.65e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 50, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.8	0.117	-0.239	0.00501	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.8	0.117	-0.239	0.00447	0.000533	9.25e-05	9.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.8	0.117	-0.239	0.00389	0.000588	7.62e-05	0.000169	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.8	0.117	-0.239	0.00353	0.000352	5.99e-05	0.000229	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.8	0.117	-0.239	0.00319	0.000341	5.11e-05	0.00028	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.8	0.117	-0.239	0.00301	0.000189	4.33e-05	0.000323	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.8	0.117	-0.239	0.00252	0.000482	3.92e-05	0.000362	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.8	0.117	-0.239	0.00226	0.000265	2.98e-05	0.000392	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.8	0.117	-0.239	0.00224	2.21e-05	2.51e-05	0.000417	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.8	0.117	-0.239	0.00191	0.000326	2.48e-05	0.000442	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.8	0.117	-0.239	0.00153	0.000381	1.97e-05	0.000462	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.8	0.117	-0.239	0.00105	0.00048	1.46e-05	0.000476	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.8	0.117	-0.239	0.00102	2.44e-05	9.17e-06	0.000485	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.8	0.116	-0.239	0.000847	0.000178	8.93e-06	0.000494	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.8	0.116	-0.239	0.000697	0.00015	7.28e-06	0.000502	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.8	0.116	-0.239	0.000433	0.000264	6.06e-06	0.000508	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.8	0.116	-0.239	0.000299	0.000133	4.24e-06	0.000512	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.8	0.116	-0.239	2.55e-05	0.000274	3.51e-06	0.000515	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.8	0.116	-0.239	9.39e-06	1.61e-05	2.25e-06	0.000518	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.8	0.116	-0.239	1e-06	8.38e-06	1.6e-06	0.000519	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.8	0.116	-0.239	0	1e-06	6.58e-07	0.00052	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 49, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.9	0.115	-0.228	0.00112	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.9	0.115	-0.228	0.00108	3.44e-05	9.85e-06	9.85e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.9	0.115	-0.228	0.000972	0.000111	9.5e-06	1.94e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.9	0.115	-0.228	0.000882	9.04e-05	8.42e-06	2.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.9	0.115	-0.228	0.000775	0.000107	7.59e-06	3.54e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.9	0.115	-0.228	0.000717	5.83e-05	6.68e-06	4.2e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.9	0.115	-0.228	0.000607	0.000109	6.21e-06	4.83e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.9	0.115	-0.228	0.000359	0.000248	5.39e-06	5.36e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.9	0.115	-0.228	0.000275	8.46e-05	3.83e-06	5.75e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.9	0.115	-0.228	2.27e-05	0.000252	3.39e-06	6.09e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.9	0.115	-0.228	1.9e-05	3.68e-06	2.21e-06	6.31e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.9	0.115	-0.228	1.76e-05	1.41e-06	2.15e-06	6.52e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.9	0.115	-0.228	1.13e-05	6.34e-06	2.12e-06	6.73e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.9	0.115	-0.228	2.89e-06	8.37e-06	1.79e-06	6.91e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.9	0.115	-0.228	0	2.89e-06	1.11e-06	7.02e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 48, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.9	0.115	-0.227	0.0127	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.9	0.115	-0.227	0.0102	0.000843	0.000247	0.000247	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.9	0.115	-0.228	0.00988	0.000349	0.000333	0.00058	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.9	0.115	-0.228	0.00836	0.00152	0.000313	0.000892	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.9	0.116	-0.228	0.0076	0.000759	0.000231	0.00112	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.9	0.116	-0.228	0.00643	0.00118	0.000194	0.00132	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.9	0.116	-0.228	0.00539	0.00104	0.000144	0.00146	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.9	0.116	-0.228	0.0045	0.000884	0.000105	0.00157	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.9	0.116	-0.228	0.00416	0.000342	7.7e-05	0.00164	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.9	0.116	-0.228	0.00378	0.000377	6.73e-05	0.00171	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.9	0.116	-0.228	0.00357	0.000211	5.73e-05	0.00177	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.9	0.116	-0.228	0.00279	0.000784	5.2e-05	0.00182	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.9	0.116	-0.228	0.00236	0.000429	3.48e-05	0.00185	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

13	-81.9	0.116	-0.228	0.00199	0.000368	2.69e-05	0.00188	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-81.9	0.116	-0.228	0.00154	0.00045	2.09e-05	0.0019	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-81.9	0.116	-0.228	0.00112	0.000422	1.47e-05	0.00192	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-81.9	0.116	-0.228	0.000823	0.000298	9.89e-06	0.00193	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-81.9	0.116	-0.228	0.000808	1.48e-05	7.08e-06	0.00193	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-81.9	0.116	-0.228	0.000754	5.4e-05	6.95e-06	0.00194	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-81.9	0.116	-0.228	0.000635	0.000118	6.5e-06	0.00195	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-81.9	0.116	-0.228	0.000436	0.000199	5.59e-06	0.00195	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-81.9	0.116	-0.228	0.000288	0.000148	4.26e-06	0.00196	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-81.9	0.116	-0.228	9.92e-05	0.000188	3.45e-06	0.00196	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-81.9	0.116	-0.228	1.5e-05	8.41e-05	2.62e-06	0.00196	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-81.9	0.116	-0.228	1.78e-06	1.33e-05	2.04e-06	0.00197	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-81.9	0.116	-0.228	0	1.78e-06	8.75e-07	0.00197	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 108, Parent ID = 48

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.9	0.115	-0.227	0.00164	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.9	0.115	-0.227	0.00131	0.000329	1.6e-05	1.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.9	0.115	-0.227	0.00111	0.000197	1.2e-05	2.8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.9	0.115	-0.227	0.000968	0.000146	9.82e-06	3.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.9	0.115	-0.227	0.000737	0.000231	8.38e-06	4.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.9	0.115	-0.227	0.000699	3.85e-05	6.37e-06	5.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.9	0.115	-0.227	0.000536	0.000163	6.07e-06	5.86e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.9	0.115	-0.227	0.000304	0.000232	4.9e-06	6.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.9	0.115	-0.227	0.000129	0.000175	3.54e-06	6.7e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.9	0.115	-0.227	0	0.000129	2.74e-06	6.98e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 47, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.9	0.115	-0.227	0.00169	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.9	0.115	-0.227	0.00129	0.000402	1.66e-05	1.66e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.9	0.115	-0.227	0.000912	0.000374	1.17e-05	2.83e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.9	0.115	-0.227	0.00069	0.000222	7.87e-06	3.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.9	0.115	-0.227	0.000533	0.000158	6e-06	4.22e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.9	0.115	-0.227	0.000419	0.000113	4.87e-06	4.7e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.9	0.115	-0.227	0.00038	3.89e-05	4.17e-06	5.12e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.9	0.115	-0.227	0.00024	0.00014	3.94e-06	5.51e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.9	0.115	-0.227	1.15e-05	0.000229	3.23e-06	5.84e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.9	0.115	-0.227	0	1.15e-05	1.81e-06	6.02e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 46, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.9	0.115	-0.227	0.00137	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.9	0.115	-0.227	0.0011	0.000265	1.26e-05	1.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.9	0.115	-0.227	0.000745	0.000357	9.7e-06	2.23e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.9	0.115	-0.227	0.000434	0.000311	6.43e-06	2.87e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.9	0.115	-0.227	0.000351	8.29e-05	4.25e-06	3.3e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.9	0.115	-0.227	0.000181	0.00017	3.78e-06	3.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.9	0.115	-0.227	0.000122	5.82e-05	2.96e-06	3.97e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.9	0.115	-0.227	5.83e-05	6.41e-05	2.72e-06	4.24e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.9	0.115	-0.227	5.17e-05	6.56e-06	2.45e-06	4.49e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.9	0.115	-0.227	2.8e-06	4.89e-05	2.42e-06	4.73e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.9	0.115	-0.227	0	2.8e-06	1.09e-06	4.84e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 45, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-81.9	0.113	-0.223	0.00219	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-81.9	0.113	-0.223	0.00209	9.22e-05	2.4e-05	2.4e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-81.9	0.113	-0.223	0.00167	0.000421	2.25e-05	4.65e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-81.9	0.113	-0.223	0.00121	0.000461	1.64e-05	6.29e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-81.9	0.113	-0.223	0.00102	0.000189	1.08e-05	7.38e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-81.9	0.113	-0.223	0.000973	5e-05	8.91e-06	8.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-81.9	0.113	-0.223	0.000801	0.000172	8.43e-06	9.11e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-81.9	0.113	-0.223	0.000731	6.97e-05	6.89e-06	9.8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-81.9	0.113	-0.223	0.000712	1.87e-05	6.32e-06	0.000104	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-81.9	0.113	-0.223	0.000651	6.16e-05	6.18e-06	0.00011	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-81.9	0.113	-0.223	0.000571	7.99e-05	5.71e-06	0.000116	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-81.9	0.113	-0.223	0.000396	0.000175	5.13e-06	0.000121	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-81.9	0.113	-0.223	0.000102	0.000294	4.03e-06	0.000125	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-81.9	0.113	-0.223	2.2e-05	7.95e-05	2.63e-06	0.000128	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

```

14  -81.9  0.113  -0.223      0  2.2e-05  2.2e-06  0.00013 SlabVariablePhys LowEnergyIoni
*****
* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 44, Parent ID = 2
*****

Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV)  StepLeng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -82   0.155  -0.199  0.00207      0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -82   0.155  -0.199  0.00179  0.000283  2.21e-05  2.21e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -82   0.155  -0.199  0.00144  0.000341  1.8e-05   4.01e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -82   0.155  -0.199  0.0014  4.19e-05  1.35e-05  5.36e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -82   0.155  -0.199  0.00126  0.000146  1.3e-05   6.66e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -82   0.155  -0.199  0.00108  0.000173  1.13e-05  7.8e-05   SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -82   0.155  -0.199  0.00102  6.84e-05  9.52e-06  8.75e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -82   0.155  -0.199  0.000745  0.000271  8.84e-06  9.63e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -82   0.155  -0.199  0.000655  8.96e-05  6.43e-06  0.000103  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
9      -82   0.155  -0.199  0.000372  0.000283  5.74e-06  0.000109  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
10     -82   0.155  -0.199  6.01e-05  0.000312  3.9e-06   0.000112  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
11     -82   0.155  -0.199  4.68e-05  1.32e-05  2.46e-06  0.000115  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
12     -82   0.155  -0.199  2.79e-05  1.89e-05  2.4e-06   0.000117  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
13     -82   0.155  -0.199  1.38e-05  1.41e-05  2.27e-06  0.00012  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
14     -82   0.155  -0.199  0          1.38e-05  1.98e-06  0.000122  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 43, Parent ID = 2
*****

Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV)  StepLeng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -82   0.156  -0.195  0.00543      0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -82   0.156  -0.195  0.00486  0.000577  0.000107  0.000107  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -82   0.156  -0.195  0.0031  0.000153  1.17e-05  0.000118  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -82   0.156  -0.195  0.00278  0.000315  4.12e-05  0.00016  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -82   0.156  -0.195  0.00237  0.000416  3.47e-05  0.000194  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -82   0.156  -0.195  0.00223  0.000144  2.7e-05   0.000221  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -82   0.156  -0.195  0.00208  0.000146  2.46e-05  0.000246  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -82   0.156  -0.195  0.0018  0.000279  2.23e-05  0.000268  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -82   0.156  -0.195  0.00146  0.000343  1.82e-05  0.000286  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
9      -82   0.156  -0.195  0.00127  0.000189  1.37e-05  0.0003  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
10     -82   0.156  -0.195  0.000895  0.000373  1.15e-05  0.000312  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
11     -82   0.156  -0.195  0.000635  0.00026  7.72e-06  0.000319  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
12     -82   0.156  -0.195  0.000496  0.000139  5.59e-06  0.000325  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
13     -82   0.156  -0.195  0.000364  0.000132  4.64e-06  0.000329  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
14     -82   0.156  -0.195  0.000295  6.93e-06  3.85e-06  0.000333  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
15     -82   0.156  -0.195  0.000118  0.000177  3.49e-06  0.000337  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
16     -82   0.156  -0.195  3.78e-06  0.000115  2.7e-06   0.00034  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
17     -82   0.156  -0.195  0          3.78e-06  1.23e-06  0.000341  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 109, Parent ID = 43
*****

Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV)  StepLeng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -82   0.156  -0.195  0.0016      0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -82   0.156  -0.195  0.00126  0.000345  1.55e-05  1.55e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -82   0.156  -0.195  0.0011  0.000156  1.13e-05  2.68e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -82   0.156  -0.195  0.00102  8.09e-05  9.68e-06  3.65e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -82   0.156  -0.195  0.000889  0.00013  8.88e-06  4.54e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -82   0.156  -0.195  0.000868  2.14e-05  7.66e-06  5.31e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -82   0.156  -0.195  0.000571  0.000297  7.47e-06  6.05e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -82   0.156  -0.195  0.000388  0.000183  5.13e-06  6.57e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -82   0.156  -0.195  0.000198  0.00019  3.98e-06  6.96e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
9      -82   0.156  -0.195  0          0.000198  3.03e-06  7.27e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 42, Parent ID = 2
*****

Step#  X(mm)  Y(mm)  Z(mm) KinE(MeV)  dE(MeV)  StepLeng  TrackLeng  NextVolume  ProcName
0      -82.1  0.139  -0.172  0.00113      0          0          0          SlabVariablePhys  initStep
1      -82.1  0.139  -0.172  0.00093  0.000196  9.94e-06  9.94e-06  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
2      -82.1  0.139  -0.172  0.000873  5.65e-05  8.03e-06  1.8e-05   SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
3      -82.1  0.139  -0.172  0.000711  0.000162  7.52e-06  2.55e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
4      -82.1  0.139  -0.172  0.000453  0.000258  6.17e-06  3.17e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
5      -82.1  0.139  -0.172  0.000329  0.000124  4.37e-06  3.6e-05   SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
6      -82.1  0.139  -0.172  5.4e-05  0.000275  3.67e-06  3.97e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
7      -82.1  0.139  -0.172  3.27e-05  2.13e-05  2.43e-06  4.21e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
8      -82.1  0.139  -0.172  0          3.27e-05  2.31e-06  4.44e-05  SlabVariablePhys  LowEnergyIoni
*****
* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 41, Parent ID = 2
*****

```

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.2	0.0994	-0.118	0.00497	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.2	0.0995	-0.118	0.00415	0.000812	9.12e-05	9.12e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.2	0.0994	-0.118	0.00385	0.000303	6.71e-05	0.000158	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.2	0.0994	-0.118	0.00335	0.000503	5.9e-05	0.000217	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.2	0.0995	-0.118	0.00265	0.000704	4.68e-05	0.000264	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.2	0.0995	-0.118	0.00218	0.00047	3.2e-05	0.000296	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.2	0.0995	-0.118	0.00171	0.000466	2.38e-05	0.00032	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.2	0.0995	-0.118	0.00161	9.55e-05	1.69e-05	0.000337	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.2	0.0995	-0.118	0.00143	0.000188	1.57e-05	0.000353	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.2	0.0995	-0.118	0.00117	0.000253	1.33e-05	0.000366	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.2	0.0995	-0.118	0.00114	3.8e-05	1.04e-05	0.000376	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.2	0.0995	-0.118	0.000803	0.000333	1e-05	0.000386	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.2	0.0995	-0.118	0.000789	1.37e-05	6.91e-06	0.000393	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.2	0.0995	-0.118	0.000454	0.000335	6.79e-06	0.0004	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-82.2	0.0995	-0.118	0.000383	7.09e-05	4.37e-06	0.000404	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-82.2	0.0995	-0.118	0.000366	1.63e-05	3.96e-06	0.000408	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-82.2	0.0995	-0.118	0.00017	0.000196	3.87e-06	0.000412	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-82.2	0.0995	-0.118	0.000137	3.34e-05	2.92e-06	0.000415	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-82.2	0.0995	-0.118	7.13e-05	6.58e-05	2.78e-06	0.000418	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-82.2	0.0995	-0.118	5.25e-05	1.88e-05	2.51e-06	0.00042	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-82.2	0.0995	-0.118	0	5.25e-05	2.43e-06	0.000423	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 40, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.3	0.0507	-0.0861	0.00983	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.3	0.051	-0.0861	0.00867	0.00116	0.00031	0.00031	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.3	0.0512	-0.0861	0.0076	0.00107	0.000246	0.000556	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.3	0.0513	-0.0861	0.00691	0.000689	0.000194	0.00075	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.3	0.0514	-0.0861	0.00615	0.000763	0.000163	0.000914	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.3	0.0515	-0.0861	0.00549	0.000656	0.000133	0.00105	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.3	0.0515	-0.0862	0.00427	0.00122	0.000109	0.00115	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.3	0.0515	-0.0862	0.00373	0.000536	7.02e-05	0.00123	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.3	0.0515	-0.0863	0.00328	0.00045	5.59e-05	0.00128	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.3	0.0515	-0.0863	0.0028	0.00048	4.52e-05	0.00133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.3	0.0515	-0.0863	0.00258	0.00022	3.5e-05	0.00136	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.3	0.0515	-0.0863	0.00231	0.000268	3.08e-05	0.00139	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.3	0.0515	-0.0863	0.00228	3.23e-05	2.61e-05	0.00142	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.3	0.0515	-0.0863	0.00181	0.000472	2.55e-05	0.00144	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-82.3	0.0515	-0.0863	0.00154	0.000267	1.83e-05	0.00146	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-82.3	0.0515	-0.0863	0.00121	0.00033	1.47e-05	0.00148	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-82.3	0.0516	-0.0863	0.00119	2.47e-05	1.08e-05	0.00149	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-82.3	0.0516	-0.0863	0.000964	0.000221	1.06e-05	0.0015	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-82.3	0.0516	-0.0863	0.000696	0.000268	8.35e-06	0.00151	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-82.3	0.0516	-0.0863	0.000381	0.000315	6.05e-06	0.00151	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-82.3	0.0516	-0.0863	0.000275	0.000106	3.95e-06	0.00152	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-82.3	0.0516	-0.0863	1.18e-05	0.000263	3.39e-06	0.00152	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-82.3	0.0516	-0.0863	4.04e-07	1.14e-05	1.84e-06	0.00152	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-82.3	0.0516	-0.0863	0	4.04e-07	4.17e-07	0.00152	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 39, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.4	0.0357	-0.0811	0.00198	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.4	0.0357	-0.0811	0.00187	0.00011	2.08e-05	2.08e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.4	0.0357	-0.0811	0.00165	0.000221	1.92e-05	3.99e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.4	0.0357	-0.0811	0.00145	0.0002	1.61e-05	5.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.4	0.0357	-0.0811	0.0011	0.000349	1.36e-05	6.96e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.4	0.0357	-0.0811	0.000805	0.000294	9.67e-06	7.92e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.4	0.0357	-0.0811	0.000737	6.8e-05	6.92e-06	8.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.4	0.0357	-0.0811	0.000551	0.000186	6.37e-06	9.25e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.4	0.0357	-0.0811	0.000389	0.000161	5e-06	9.75e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.4	0.0357	-0.0811	0.000324	6.51e-05	3.99e-06	0.000102	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.4	0.0357	-0.0811	0.000141	0.000183	3.64e-06	0.000105	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.4	0.0357	-0.0811	0	0.000141	2.79e-06	0.000108	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 38, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.4	0.0274	-0.0752	0.00376	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.4	0.0274	-0.0752	0.00289	0.00087	5.66e-05	5.66e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.4	0.0275	-0.0751	0.0027	0.000186	3.68e-05	9.34e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.4	0.0275	-0.0751	0.00246	0.000241	3.31e-05	0.000127	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.4	0.0275	-0.0751	0.00209	0.000372	2.86e-05	0.000155	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.4	0.0275	-0.0751	0.00165	0.000434	2.24e-05	0.000178	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

6	-82.4	0.0275	-0.0751	0.0014	0.000255	1.62e-05	0.000194	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.4	0.0275	-0.0751	0.00132	7.79e-05	1.3e-05	0.000207	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.4	0.0275	-0.0751	0.00132	2.91e-06	1.21e-05	0.000219	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.4	0.0275	-0.0751	0.000996	0.000323	1.2e-05	0.000231	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.4	0.0275	-0.0751	0.000854	0.000142	8.65e-06	0.00024	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.4	0.0275	-0.0751	0.000528	0.000326	7.35e-06	0.000247	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.4	0.0275	-0.0751	0.000242	0.000286	4.84e-06	0.000252	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.4	0.0275	-0.0751	0	0.000242	3.23e-06	0.000255	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 37, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.5	0.0224	-0.0746	0.00115	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.5	0.0224	-0.0746	0.00112	2.93e-05	1.02e-05	1.02e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.5	0.0224	-0.0746	0.000874	0.000246	9.88e-06	2.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.5	0.0224	-0.0746	0.000666	0.000208	7.52e-06	2.76e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.5	0.0224	-0.0746	0.000539	0.000127	5.82e-06	3.34e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.5	0.0224	-0.0746	0.000335	0.000203	4.91e-06	3.83e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.5	0.0224	-0.0746	0.000128	0.000208	3.7e-06	4.2e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.5	0.0224	-0.0746	8.9e-06	0.000119	2.74e-06	4.48e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.5	0.0224	-0.0746	0	8.9e-06	1.58e-06	4.63e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 36, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.6	0.0382	-0.0281	0.00231	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.6	0.0382	-0.0281	0.00197	0.000342	2.6e-05	2.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.6	0.0382	-0.0281	0.00189	8.37e-05	2.06e-05	4.67e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.6	0.0382	-0.0281	0.00156	0.000329	1.94e-05	6.61e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.6	0.0382	-0.0281	0.00123	0.000322	1.49e-05	8.1e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.6	0.0383	-0.0281	0.00122	1.74e-05	1.11e-05	9.21e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.6	0.0383	-0.0281	0.000964	0.000254	1.09e-05	0.000103	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.6	0.0382	-0.0281	0.000648	0.000316	8.34e-06	0.000111	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.6	0.0382	-0.0281	0.000413	0.000234	5.68e-06	0.000117	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.6	0.0382	-0.0281	0.000215	0.000198	4.13e-06	0.000121	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.6	0.0383	-0.0281	0.000202	1.38e-05	3.11e-06	0.000124	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.6	0.0382	-0.0281	0.00013	7.13e-05	3.05e-06	0.000127	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.6	0.0382	-0.0281	9.98e-05	3.04e-05	2.75e-06	0.00013	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.6	0.0382	-0.0281	0	9.98e-05	2.63e-06	0.000133	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 35, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.6	0.0368	-0.0237	0.0119	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.6	0.0367	-0.0235	0.011	0.000863	0.000438	0.000438	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.6	0.0366	-0.0231	0.00931	0.00172	0.000382	0.000819	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.6	0.0367	-0.023	0.00866	0.000643	0.00028	0.0011	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.6	0.0368	-0.0229	0.00834	0.000321	0.000246	0.00135	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.6	0.0368	-0.0229	0.00414	0.000474	9.98e-05	0.00145	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.6	0.0367	-0.0228	0.00366	0.000481	6.68e-05	0.00151	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.6	0.0367	-0.0228	0.00332	0.000338	5.42e-05	0.00157	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.6	0.0367	-0.0228	0.00328	4.05e-05	4.62e-05	0.00161	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.6	0.0367	-0.0227	0.00304	0.000248	4.53e-05	0.00166	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00227	0.00077	3.99e-05	0.0017	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00227	6.91e-05	2.53e-05	0.00172	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00209	0.000107	2.42e-05	0.00175	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00177	0.000326	2.25e-05	0.00177	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00156	0.000208	1.77e-05	0.00179	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00155	3.76e-06	1.49e-05	0.0018	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00138	0.000174	1.49e-05	0.00182	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-82.6	0.0368	-0.0227	0.00136	1.54e-05	1.27e-05	0.00183	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-82.6	0.0368	-0.0227	0.0012	0.000163	1.26e-05	0.00184	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-82.6	0.0368	-0.0227	0.000953	0.000248	1.07e-05	0.00185	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-82.6	0.0368	-0.0227	0.000929	2.41e-05	8.24e-06	0.00186	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-82.6	0.0368	-0.0227	0.000661	0.000268	8.02e-06	0.00187	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-82.6	0.0368	-0.0227	0.000363	0.000297	5.78e-06	0.00187	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-82.6	0.0368	-0.0227	0.000192	0.000171	3.85e-06	0.00188	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-82.6	0.0368	-0.0227	1.11e-05	0.000181	3.01e-06	0.00188	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-82.6	0.0368	-0.0227	0	1.11e-05	1.77e-06	0.00188	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 110, Parent ID = 35

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.6	0.0368	-0.0229	0.00373	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

1	-82.6	0.0367	-0.0229	0.00327	0.000455	5.58e-05	5.58e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.6	0.0367	-0.0229	0.00308	0.000186	4.5e-05	0.000101	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.6	0.0367	-0.0229	0.00252	0.000569	4.09e-05	0.000142	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.6	0.0367	-0.0229	0.00209	0.000428	2.96e-05	0.000171	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.6	0.0367	-0.023	0.00197	0.00012	2.24e-05	0.000194	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.6	0.0367	-0.023	0.00163	0.000338	2.06e-05	0.000214	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.6	0.0367	-0.023	0.00123	0.000396	1.59e-05	0.00023	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.6	0.0367	-0.023	0.00107	0.000158	1.11e-05	0.000241	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.6	0.0367	-0.023	0.001	7.22e-05	9.42e-06	0.000251	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.6	0.0367	-0.023	0.000828	0.000174	8.71e-06	0.000259	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.6	0.0367	-0.023	0.000553	0.000276	7.13e-06	0.000267	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.6	0.0367	-0.023	0.000488	6.48e-05	5.01e-06	0.000272	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.6	0.0367	-0.023	0.000342	0.000146	4.58e-06	0.000276	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-82.6	0.0367	-0.023	3.08e-05	0.000311	3.73e-06	0.00028	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-82.6	0.0367	-0.023	0	3.08e-05	2.3e-06	0.000282	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 34, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.6	0.0336	-0.0182	0.00104	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.6	0.0336	-0.0182	0.000902	0.000133	9.04e-06	9.04e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.6	0.0336	-0.0182	0.000538	0.000364	7.78e-06	1.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.6	0.0336	-0.0182	0.000466	7.19e-05	4.91e-06	2.17e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.6	0.0336	-0.0182	0.000222	0.000244	4.45e-06	2.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.6	0.0336	-0.0182	0.000163	5.9e-05	3.14e-06	2.93e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.6	0.0336	-0.0182	7.91e-05	8.44e-05	2.89e-06	3.22e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.6	0.0336	-0.0182	1.59e-05	6.32e-05	2.54e-06	3.47e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.6	0.0336	-0.0182	4.8e-06	1.11e-05	2.07e-06	3.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.6	0.0336	-0.0182	0	4.8e-06	1.33e-06	3.81e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 33, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.6	0.0335	-0.0171	0.00187	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.6	0.0335	-0.0171	0.00156	0.000308	1.92e-05	1.92e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.6	0.0335	-0.0171	0.00124	0.000327	1.5e-05	3.41e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.6	0.0335	-0.0171	0.000989	0.000246	1.11e-05	4.52e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.6	0.0335	-0.0171	0.00094	4.86e-05	8.58e-06	5.38e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.6	0.0335	-0.0171	0.000761	0.000179	8.12e-06	6.19e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.6	0.0335	-0.0171	0.000475	0.000286	6.56e-06	6.85e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.6	0.0335	-0.0171	0.000348	0.000126	4.5e-06	7.3e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.6	0.0335	-0.0171	0.000263	8.59e-05	3.77e-06	7.68e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.6	0.0335	-0.0171	8.8e-05	0.000175	3.33e-06	8.01e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.6	0.0335	-0.0171	6.23e-06	8.18e-05	2.58e-06	8.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.6	0.0335	-0.0171	0	6.23e-06	1.44e-06	8.41e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 32, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.7	0.0149	-0.0106	0.00106	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.7	0.0149	-0.0106	0.000907	0.000157	9.31e-06	9.31e-06	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.7	0.0149	-0.0106	0.000709	0.000198	7.82e-06	1.71e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.7	0.0149	-0.0106	0.000485	0.000224	6.15e-06	2.33e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.7	0.0149	-0.0106	0.000353	0.000132	4.56e-06	2.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.7	0.0149	-0.0106	0.000345	7.79e-06	3.79e-06	3.16e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.7	0.0149	-0.0106	3.94e-05	0.000306	3.75e-06	3.54e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.7	0.0149	-0.0106	1.37e-05	2.57e-05	2.36e-06	3.77e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.7	0.0149	-0.0106	0	1.37e-05	1.97e-06	3.97e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

* G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 31, Parent ID = 2

Step#	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	KinE(MeV)	dE(MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.7	0.0139	-0.00927	0.0232	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.7	0.0126	-0.00866	0.0214	0.00184	0.00149	0.00149	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.7	0.0117	-0.00842	0.0186	0.0028	0.00128	0.00276	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.7	0.0108	-0.00871	0.0167	0.00186	0.000989	0.00375	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.7	0.0104	-0.00855	0.0144	0.00092	0.000567	0.00432	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.7	0.00983	-0.00874	0.013	0.00143	0.000624	0.00494	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.7	0.0094	-0.00882	0.0102	0.00283	0.000515	0.00546	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.7	0.00909	-0.00875	0.00933	0.00085	0.00033	0.00579	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.7	0.00887	-0.00892	0.00855	0.000779	0.000281	0.00607	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.7	0.00881	-0.00915	0.00727	0.00128	0.00024	0.00631	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.7	0.00889	-0.00928	0.00612	0.00115	0.000179	0.00649	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.7	0.00883	-0.0094	0.00587	0.000242	0.000132	0.00662	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

12	-82.7	0.00876	-0.00948	0.00549	0.000381	0.000122	0.00674	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.7	0.00868	-0.00942	0.00474	0.000754	0.000109	0.00685	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
14	-82.7	0.00867	-0.00944	0.00327	0.000315	3.05e-05	0.00688	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
15	-82.7	0.00868	-0.00948	0.00279	0.00048	4.49e-05	0.00693	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
16	-82.7	0.00865	-0.0095	0.00252	0.000268	3.48e-05	0.00696	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
17	-82.7	0.00862	-0.0095	0.00196	0.000563	2.97e-05	0.00699	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
18	-82.7	0.0086	-0.00949	0.00182	0.000138	2.04e-05	0.00701	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
19	-82.7	0.00859	-0.00948	0.00171	0.000106	1.84e-05	0.00703	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
20	-82.7	0.0086	-0.00947	0.00142	0.000297	1.7e-05	0.00705	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
21	-82.7	0.00861	-0.00947	0.000996	0.000421	1.32e-05	0.00706	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
22	-82.7	0.0086	-0.00947	0.000724	0.000272	8.65e-06	0.00707	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
23	-82.7	0.00859	-0.00947	0.000489	0.000234	6.26e-06	0.00708	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
24	-82.7	0.00859	-0.00947	0.000217	0.000272	4.59e-06	0.00708	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
25	-82.7	0.00859	-0.00947	0.000105	0.000112	3.12e-06	0.00708	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
26	-82.7	0.00859	-0.00947	3.32e-05	7.2e-05	2.65e-06	0.00709	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
27	-82.7	0.00859	-0.00947	2.88e-06	3.03e-05	2.32e-06	0.00709	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
28	-82.7	0.00859	-0.00947	0	2.88e-06	1.1e-06	0.00709	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 112, Parent ID = 31

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.7	0.00867	-0.00944	0.00116	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.7	0.00866	-0.00944	0.00112	3.42e-05	1.03e-05	1.03e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.7	0.00867	-0.00944	0.00101	0.000111	9.9e-06	2.02e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.7	0.00867	-0.00943	0.000848	0.000163	8.79e-06	2.9e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.7	0.00867	-0.00944	0.000593	0.000254	7.29e-06	3.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.7	0.00867	-0.00944	0.000339	0.000255	5.29e-06	4.15e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.7	0.00867	-0.00944	0.000182	0.000157	3.72e-06	4.53e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.7	0.00867	-0.00943	2.82e-05	0.000153	2.96e-06	4.82e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.7	0.00867	-0.00944	1.68e-05	1.14e-05	2.27e-06	5.05e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.7	0.00867	-0.00944	1.93e-06	1.49e-05	2.1e-06	5.26e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.7	0.00867	-0.00944	0	1.93e-06	9.12e-07	5.35e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 111, Parent ID = 31

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.7	0.0104	-0.00855	0.00135	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.7	0.0104	-0.00854	0.00132	3.08e-05	1.24e-05	1.24e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.7	0.0104	-0.00854	0.00116	0.000159	1.2e-05	2.44e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.7	0.0104	-0.00854	0.000934	0.000223	1.03e-05	3.46e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.7	0.0104	-0.00853	0.000564	0.00037	8.06e-06	4.27e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.7	0.0104	-0.00853	0.000477	8.72e-05	5.09e-06	4.78e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.7	0.0104	-0.00853	0.000329	0.000148	4.52e-06	5.23e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.7	0.0104	-0.00854	0.000153	0.000176	3.67e-06	5.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.7	0.0104	-0.00854	0	0.000153	2.84e-06	5.88e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 30, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.8	0.0024	-0.00283	0.00257	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.8	0.00241	-0.00286	0.00223	0.000343	3.06e-05	3.06e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.8	0.00239	-0.00288	0.00216	6.92e-05	2.46e-05	5.52e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.8	0.00238	-0.0029	0.0018	0.000354	2.35e-05	7.87e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.8	0.00238	-0.00292	0.00146	0.00034	1.82e-05	9.69e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.8	0.00237	-0.00293	0.00112	0.000344	1.37e-05	0.000111	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.8	0.00237	-0.00293	0.0011	1.92e-05	9.86e-06	0.00012	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
7	-82.8	0.00236	-0.00293	0.00102	8.25e-05	9.67e-06	0.00013	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.8	0.00235	-0.00293	0.000782	0.000235	8.85e-06	0.000139	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.8	0.00236	-0.00293	0.000591	0.000191	6.73e-06	0.000146	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
10	-82.8	0.00236	-0.00293	0.000296	0.000295	5.27e-06	0.000151	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
11	-82.8	0.00236	-0.00293	0.000259	3.66e-05	3.5e-06	0.000154	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
12	-82.8	0.00236	-0.00294	0.000146	0.000114	3.32e-06	0.000158	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
13	-82.8	0.00236	-0.00294	0	0.000146	2.81e-06	0.000161	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

 * G4Track Information: Particle = e-, Track ID = 29, Parent ID = 2

Step#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	KinE (MeV)	dE (MeV)	StepLeng	TrackLeng	NextVolume	ProcName
0	-82.8	0.000949	-0.00113	0.00118	0	0	0	SlabVariablePhys	initStep
1	-82.8	0.000956	-0.00113	0.00104	0.000133	1.05e-05	1.05e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
2	-82.8	0.000965	-0.00113	0.00075	0.000293	9.11e-06	1.96e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
3	-82.8	0.00097	-0.00112	0.000653	9.69e-05	6.47e-06	2.6e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
4	-82.8	0.000967	-0.00113	0.000464	0.000189	5.72e-06	3.18e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
5	-82.8	0.000966	-0.00113	0.000435	2.85e-05	4.43e-06	3.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
6	-82.8	0.000965	-0.00113	0.000221	0.000214	4.26e-06	4.04e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

FLUORESCENCE INDUITE PAR RADIOLUMINESCENCE ET APPLICATIONS

7	-82.8	0.000965	-0.00112	8.95e-05	0.000131	3.14e-06	4.36e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
8	-82.8	0.000964	-0.00112	1.23e-05	7.73e-05	2.59e-06	4.62e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni
9	-82.8	0.000964	-0.00112	0	1.23e-05	1.88e-06	4.8e-05	SlabVariablePhys	LowEnergyIoni

Run terminated.

Run Summary

Number of events processed : 1
User=0.3s Real=0.36s Sys=0.03s
donaldRunAction::EndOfRunAction entered. Histogram being written.
G4 kernel has come to Quit state.
Graphics systems deleted.
Visualization Manager deleting...

Annexe 2 : Calculs SRIM2003

Cette annexe présente les calculs SRIM2003 pour l'ErIV:VP et le Ti:Sa. Des simulations de propagations d'ions H, He et C sont présentées, ainsi que des calculs des portées de ces ions, ainsi les ionisations et les créations de phonons. L'analyse pour le cas du NdIV:ED2 est présentée dans la section 4.3.2. et les figures suivantes ont été utilisées pour la comparaison effectuée dans la section 4.2.3..

Annexe 2.1. : ErIV:VP

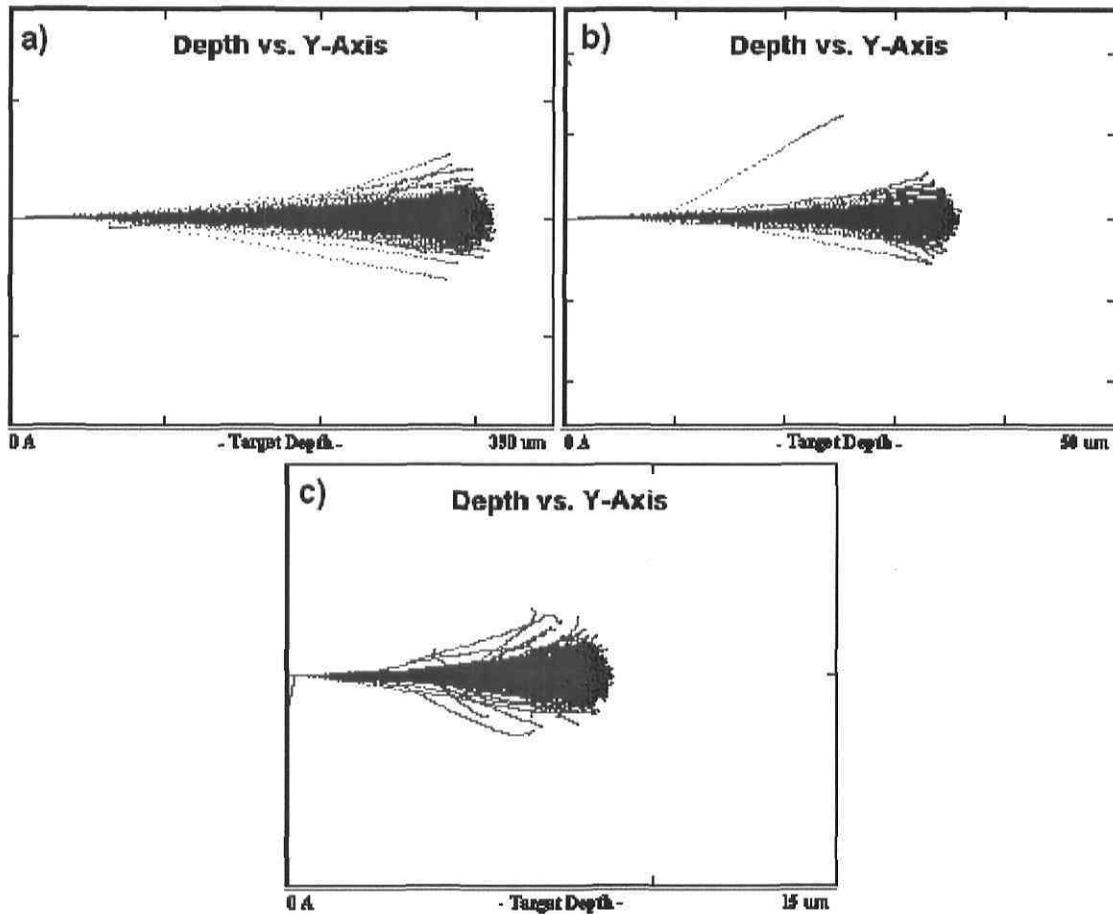


Figure A.2.1 : Propagation d'ions de a) H, b) He et c) C dans du ErIV:VP.

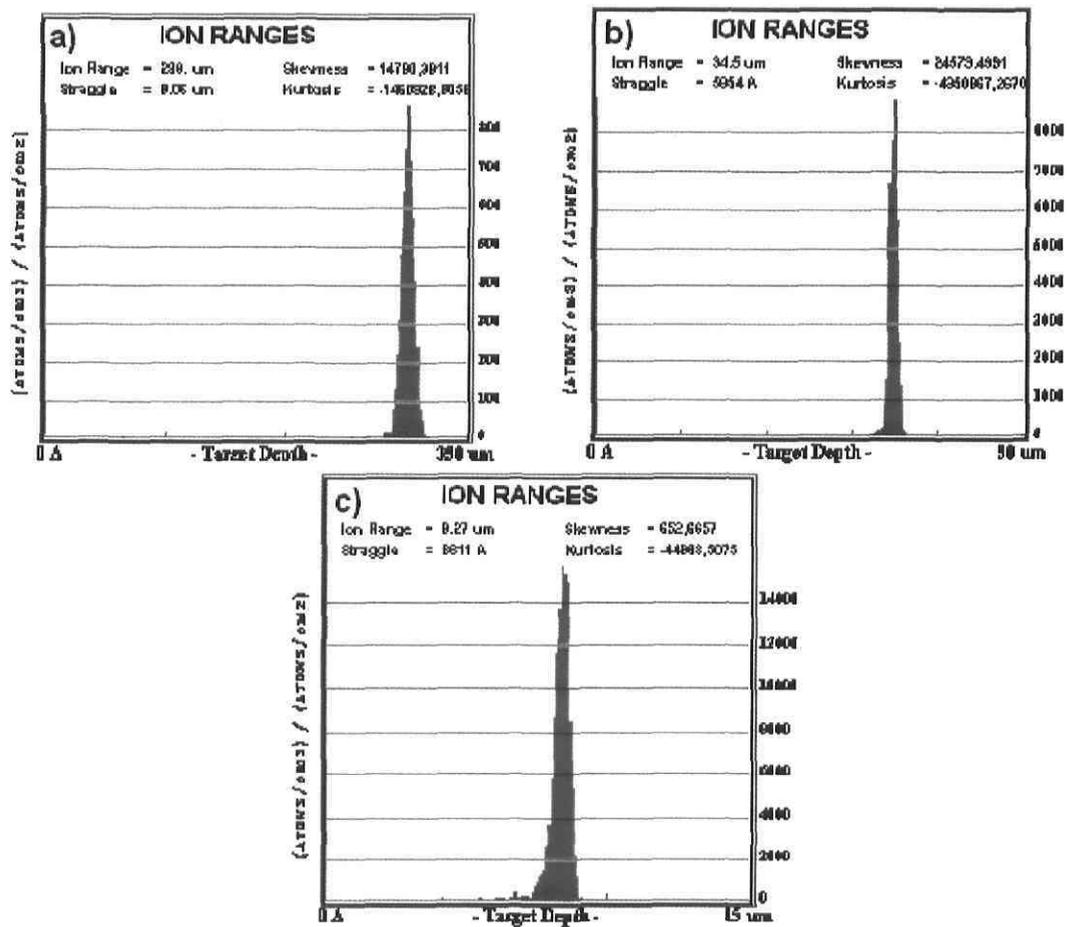


Figure A.2.2 : Portée d'ions de a) H, b) He et c) C dans du ErIV:VP.

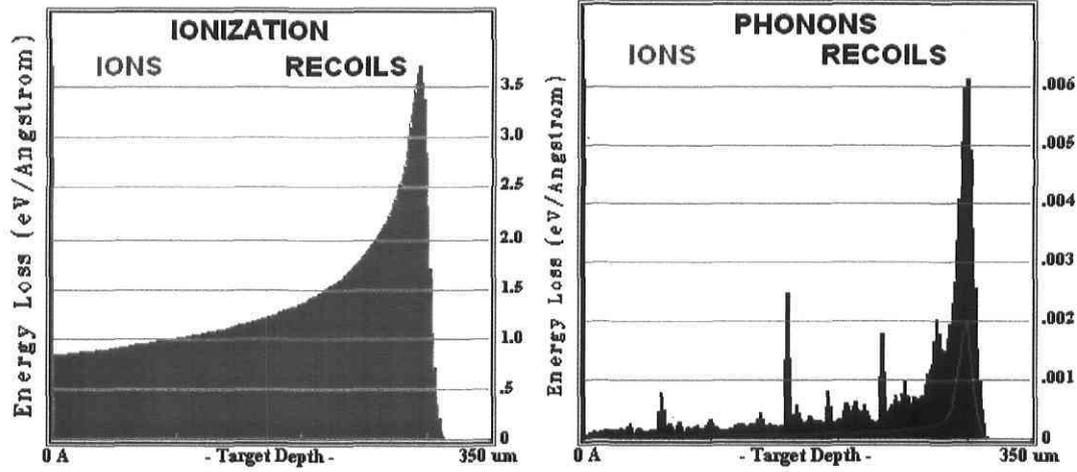


Figure A.2.3 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de H dans le ErIV:VP.

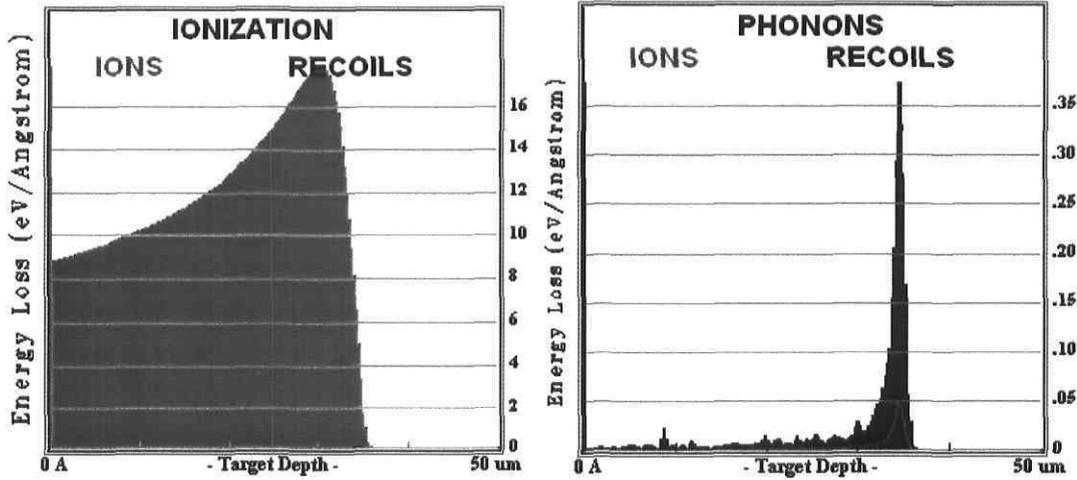


Figure A.2.4 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de He dans le ErIV:VP.

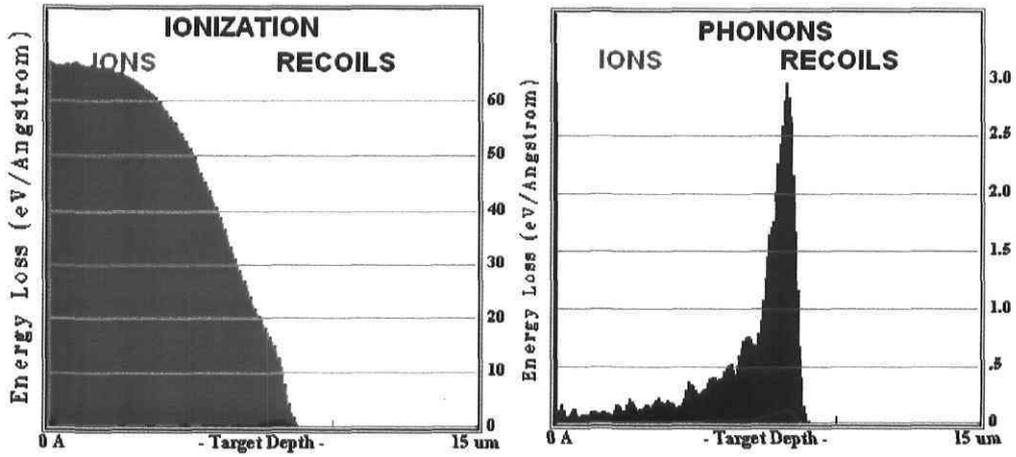


Figure A.2.5 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de C dans le ErIV:VP.

Annexe 2.2. : Ti:Sa

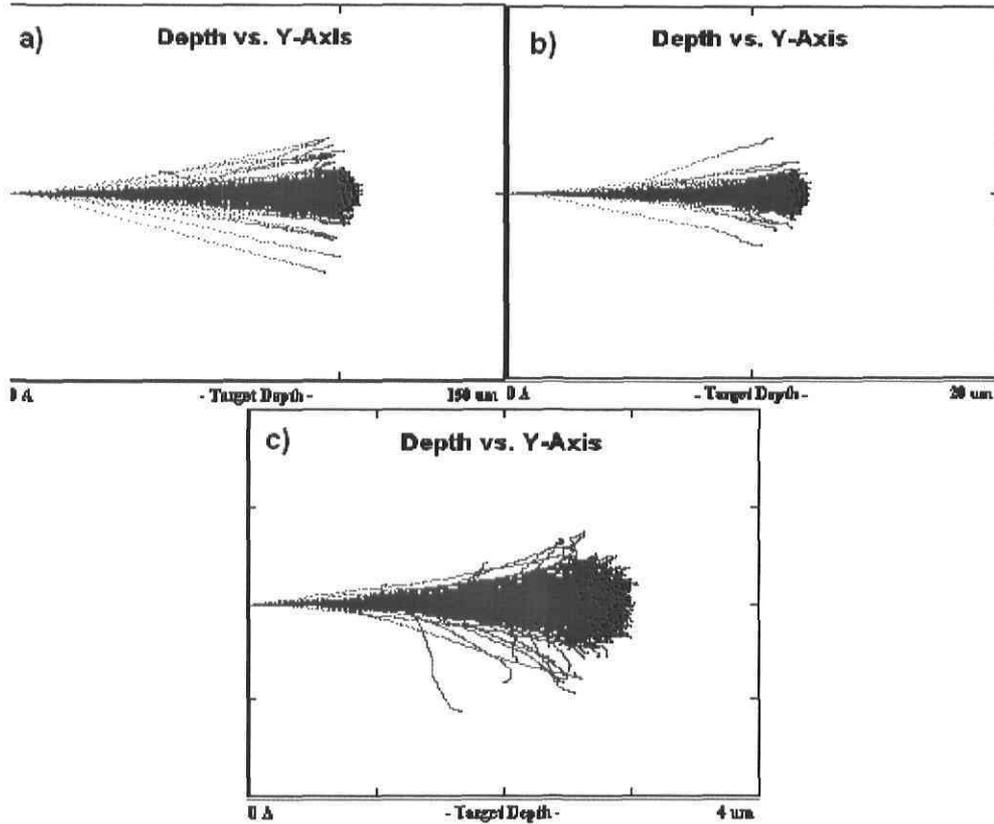


Figure A.2.6 : Propagation d'ions de a) H, b) He et c) C dans du Ti:Sa.

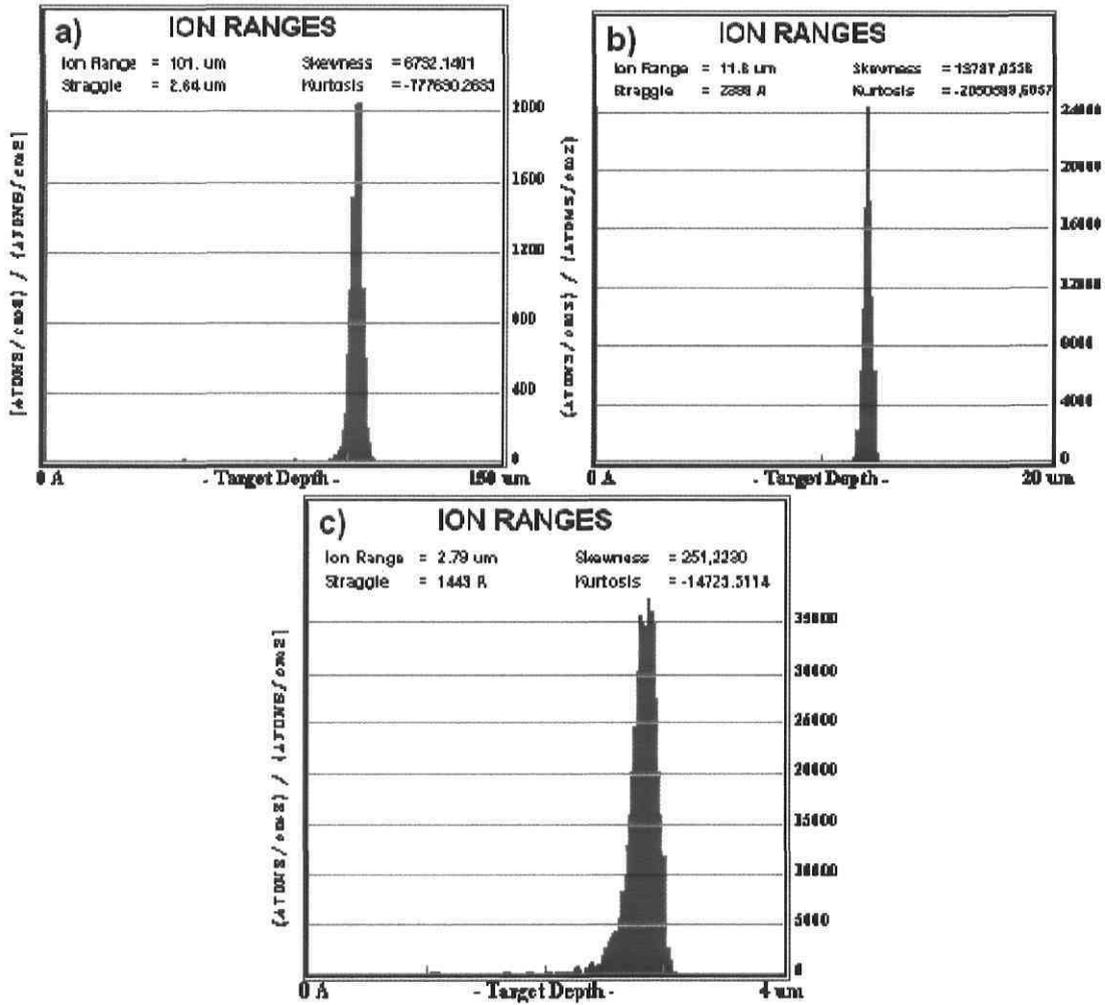


Figure A.2.7 : Portée d'ions de a) H, b) He et c) C dans du Ti :Sa.

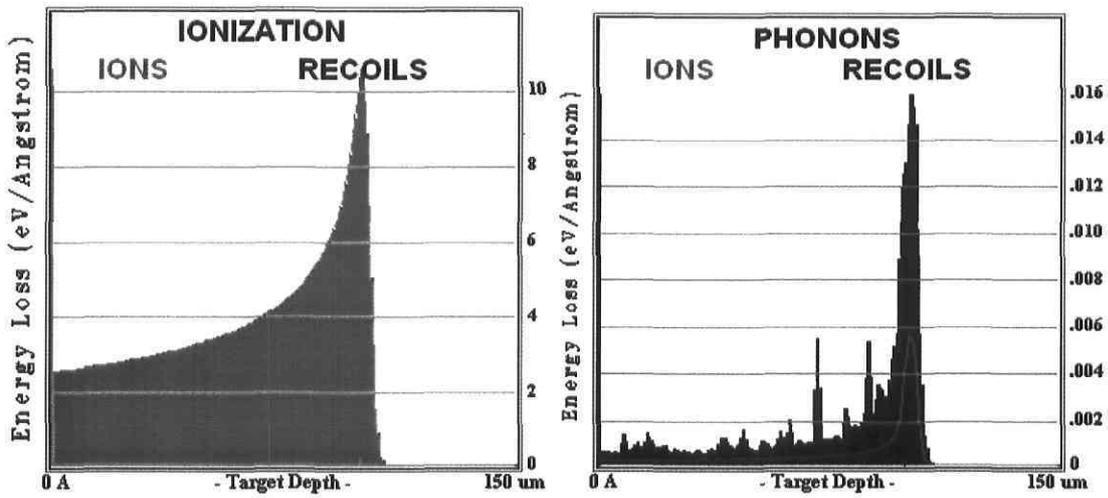


Figure A.2.8: Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de H dans le Ti:Sa.

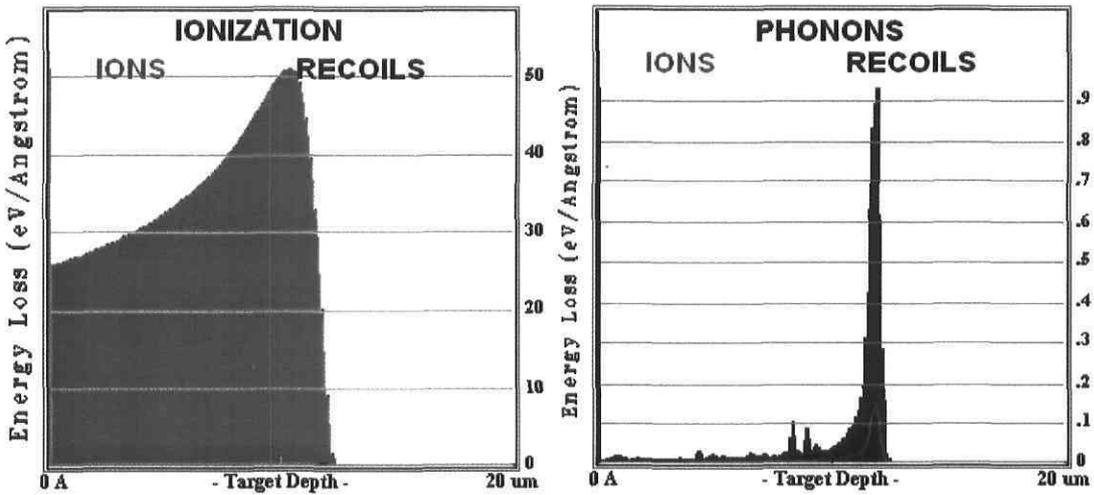


Figure A.2.9 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de He dans le Ti:Sa.

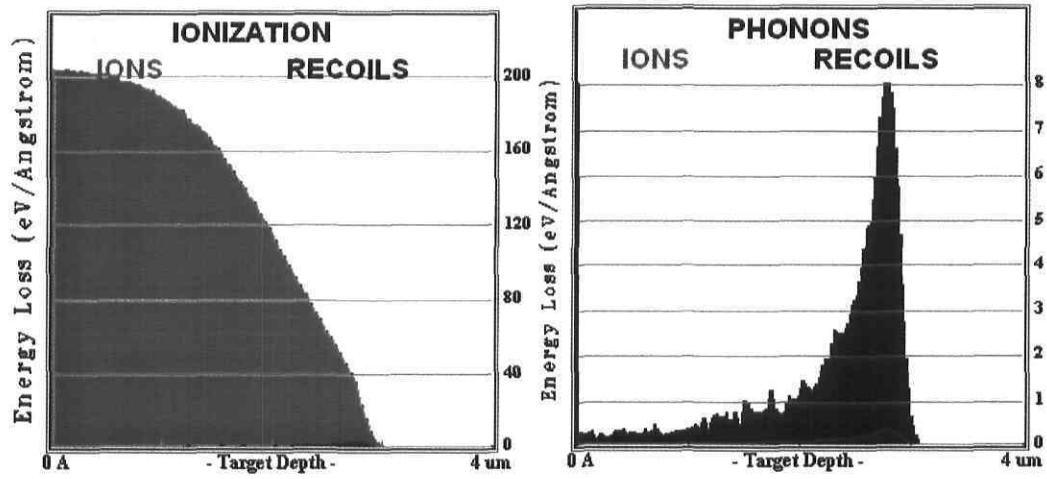


Figure A.2.10 : Ionisations et émissions de phonons provoquées par des ions de C dans le Ti:Sa.

Annexe 3 : Simulations Casino dans un échantillon de NdIV:ED2

Les simulations suivantes présentent les interactions issues d'électrons incidents sur le NdIV:ED2 à différentes énergies. Ces simulations furent réaliser à l'aide du logiciel Casino disponible sur l'internet.

Les figures suivantes présentent :

- les distributions d'électrons ainsi que les énergies transmises,
- l'énergie par position des électrons incidents,
- les rayons-X issus de ces électrons; ces rayons-X sont produits par l'excitation des électrons des couches internes des différents éléments composant le matériau.

Annexe 3.1. : Électrons à 1 keV

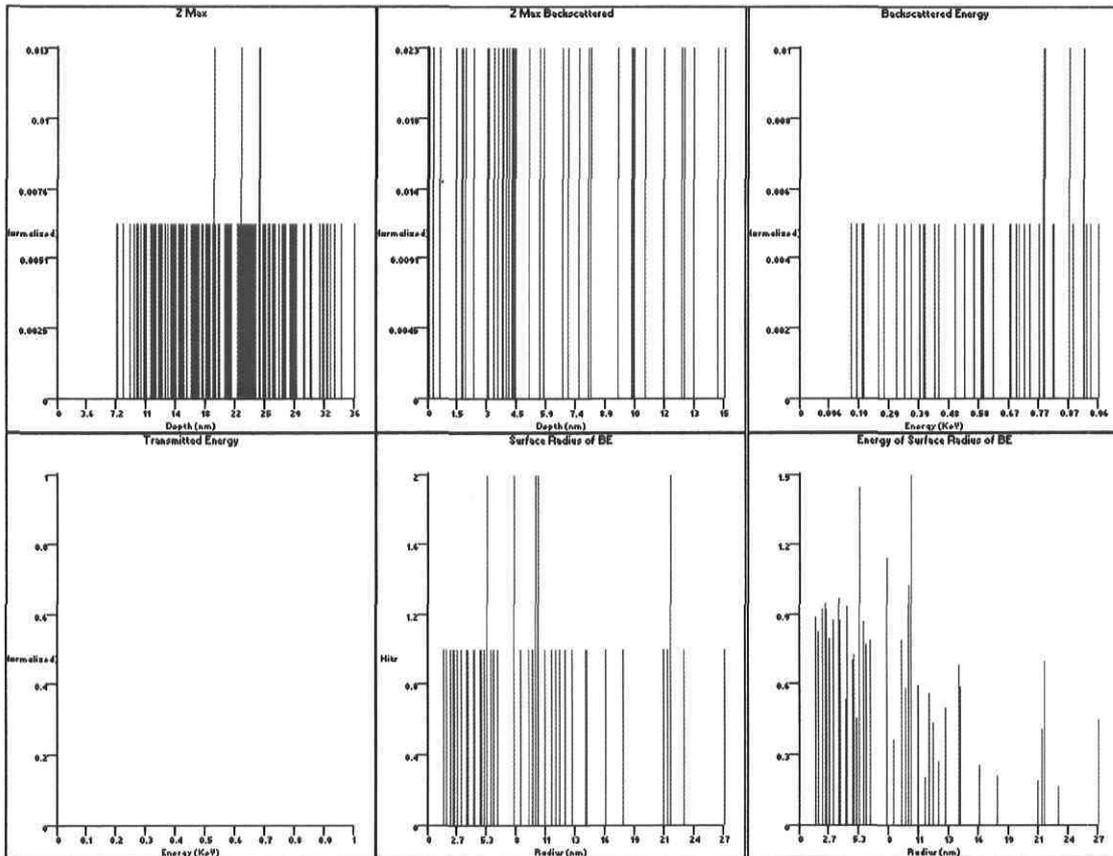


Figure A.3.1 : Distribution d'électrons à 1 keV dans le NdIV:ED2.

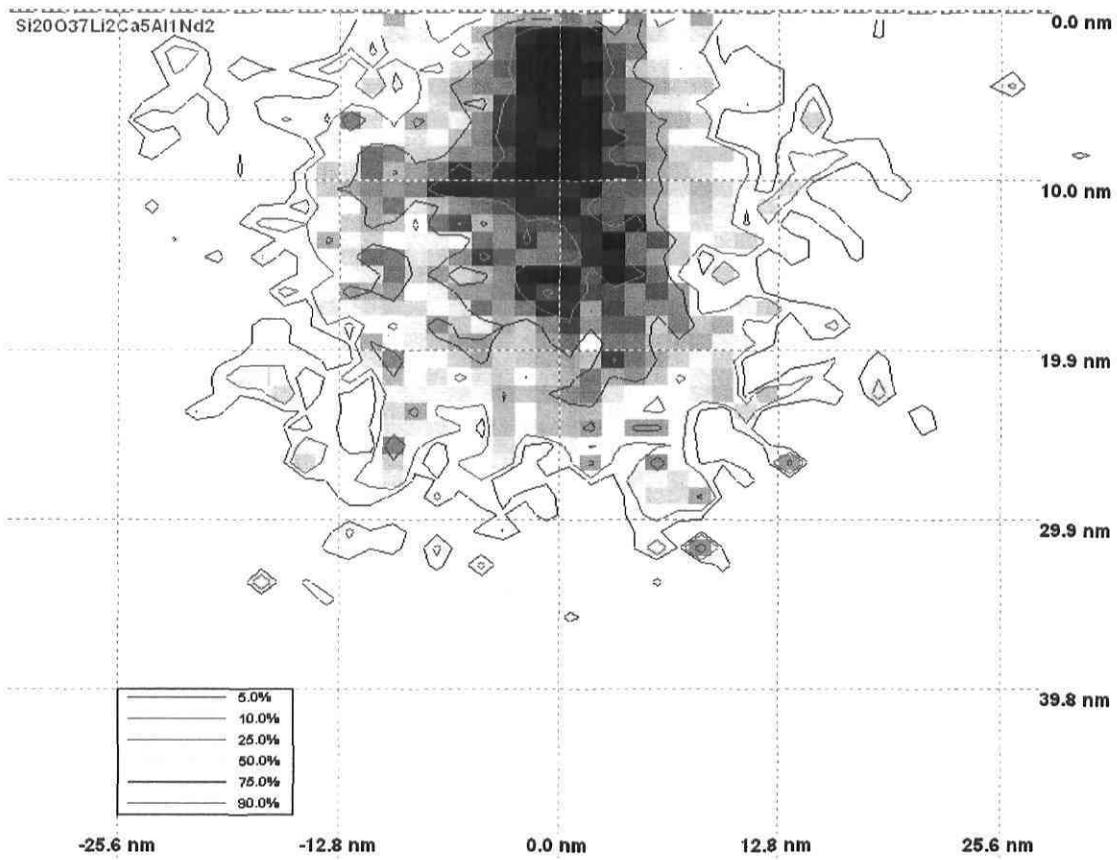


Figure A.3.2 : Énergie par position d'électrons incidents à 1 keV sur du NdIV:ED2.

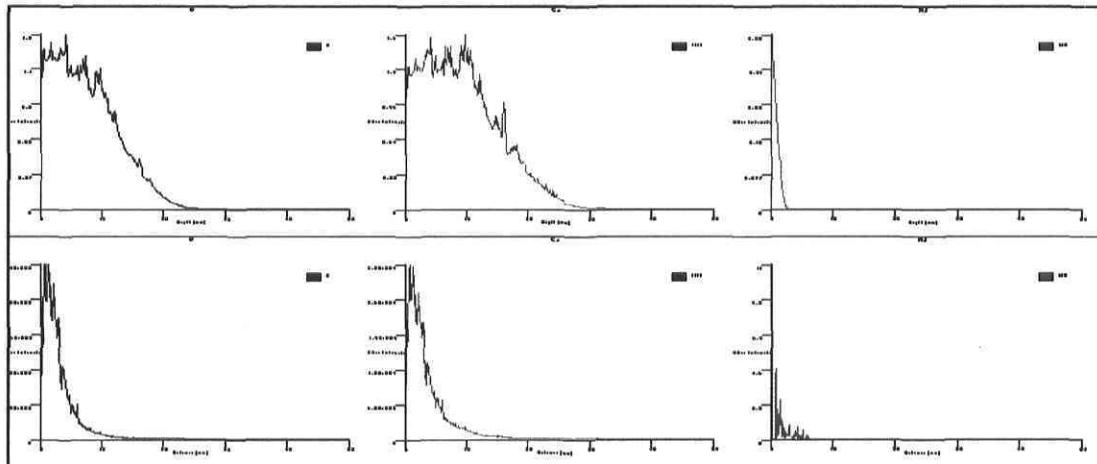


Figure A.3.3 : Rayons-X issus d'électrons à 1 keV sur du NdIV:ED2 (haut) et distribution radial (bas).

Annexe 3.2. : Électrons à 250 keV

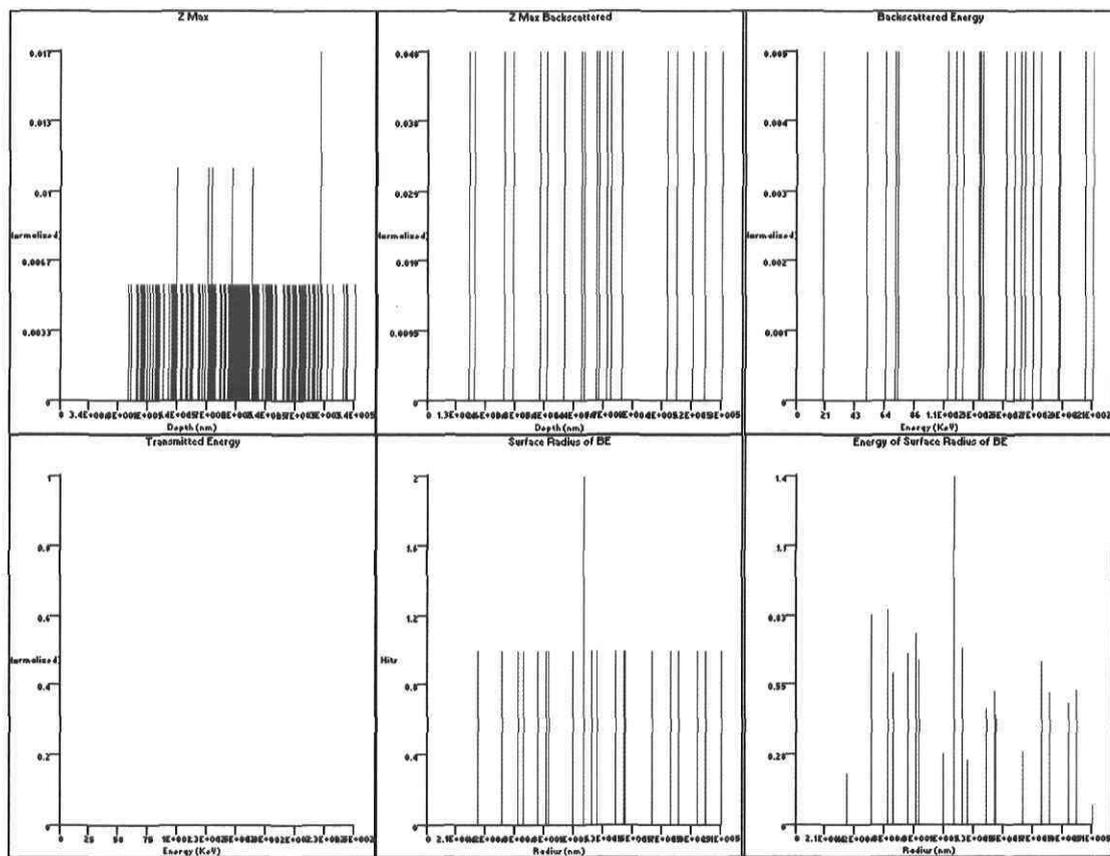


Figure A.3.4 : Distribution d'électrons à 250 keV dans le NdIV:ED2.

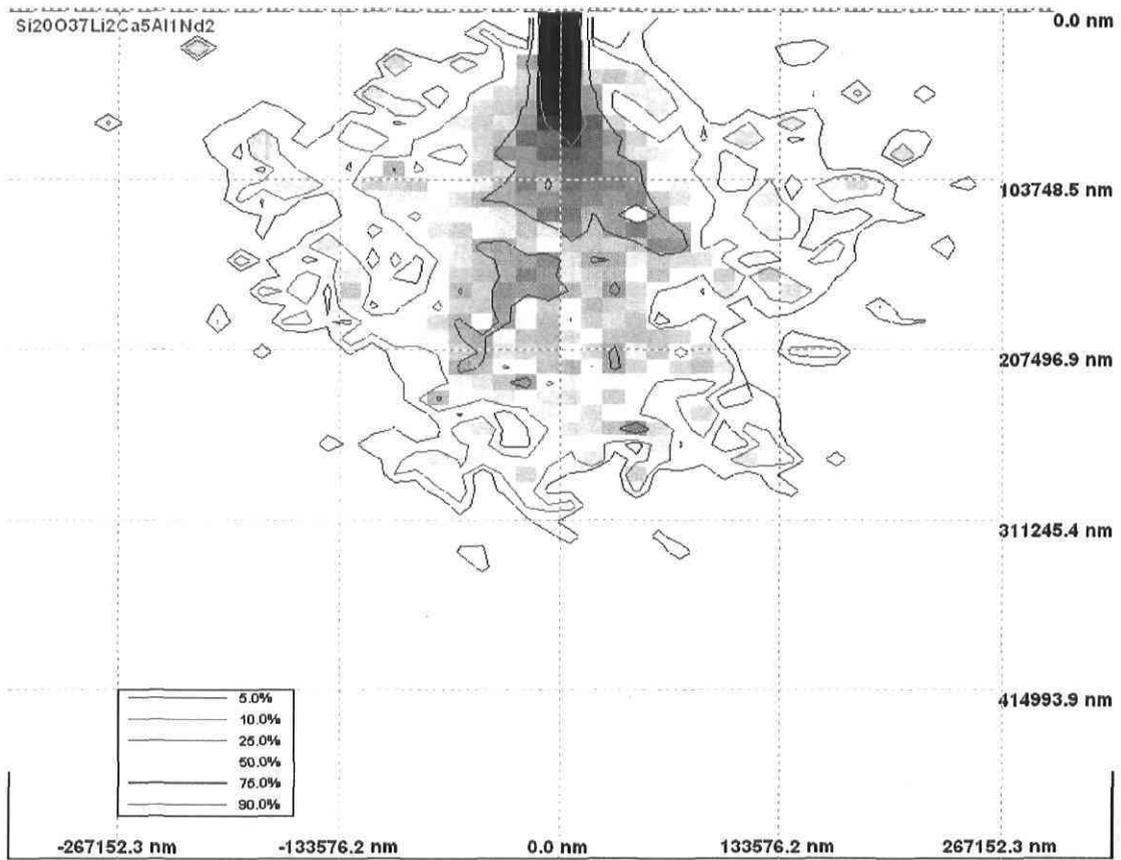


Figure A.3.5 : Énergie par position d'électrons incidents à 250 keV sur du NdIV:ED2.

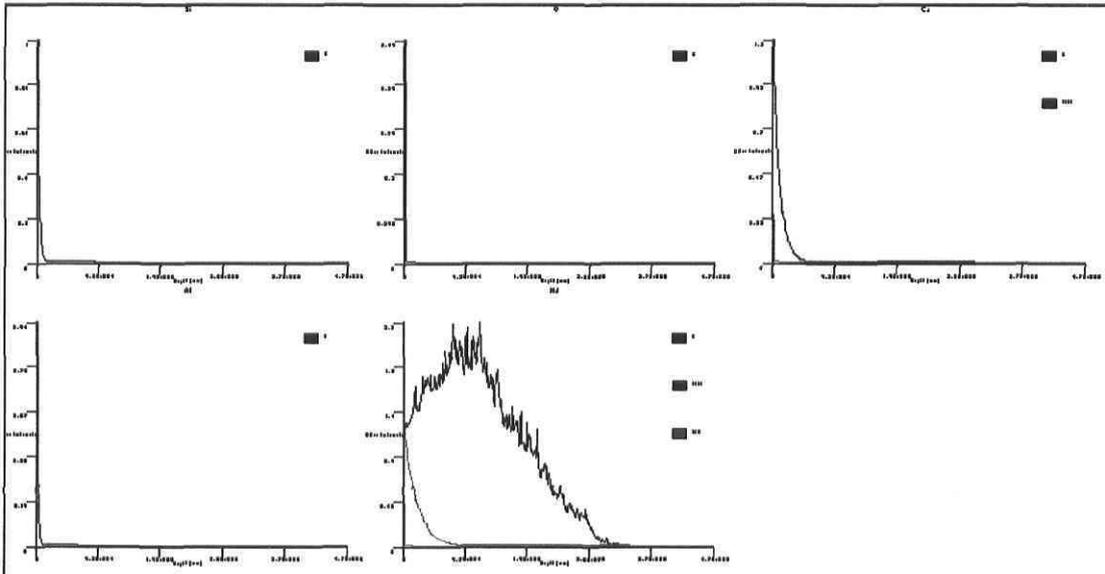


Figure A.3.6 : Rayons X issus d'électrons incidents à 250 keV sur le NdIV:ED2.

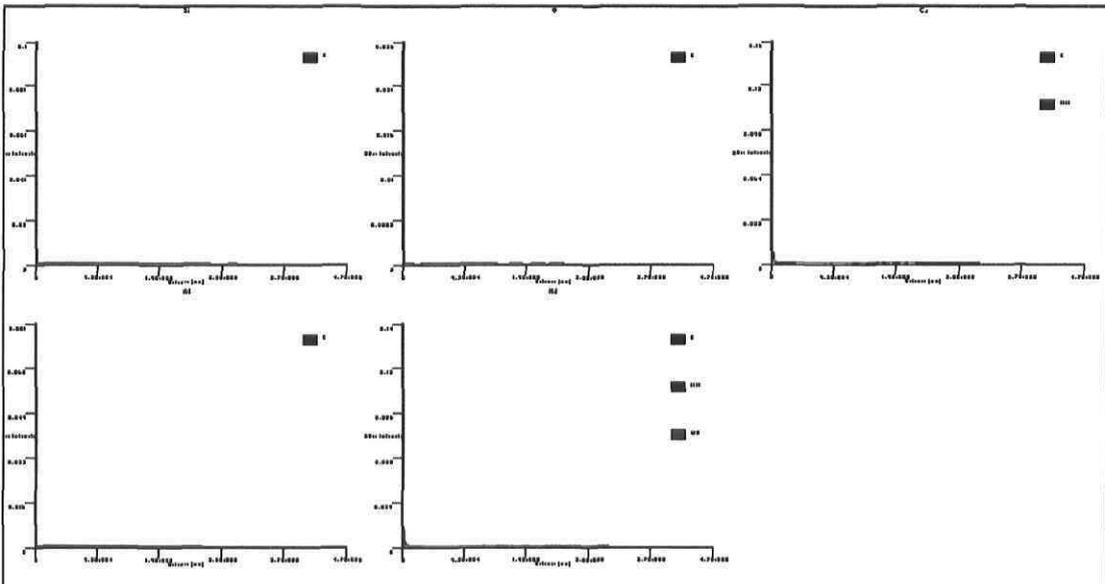


Figure A.3.7 : Distribution radiale de rayons X issus d'électrons incidents à 250 keV sur le NdIV:ED2.

Annexe 3.3. : Électrons à 500 keV

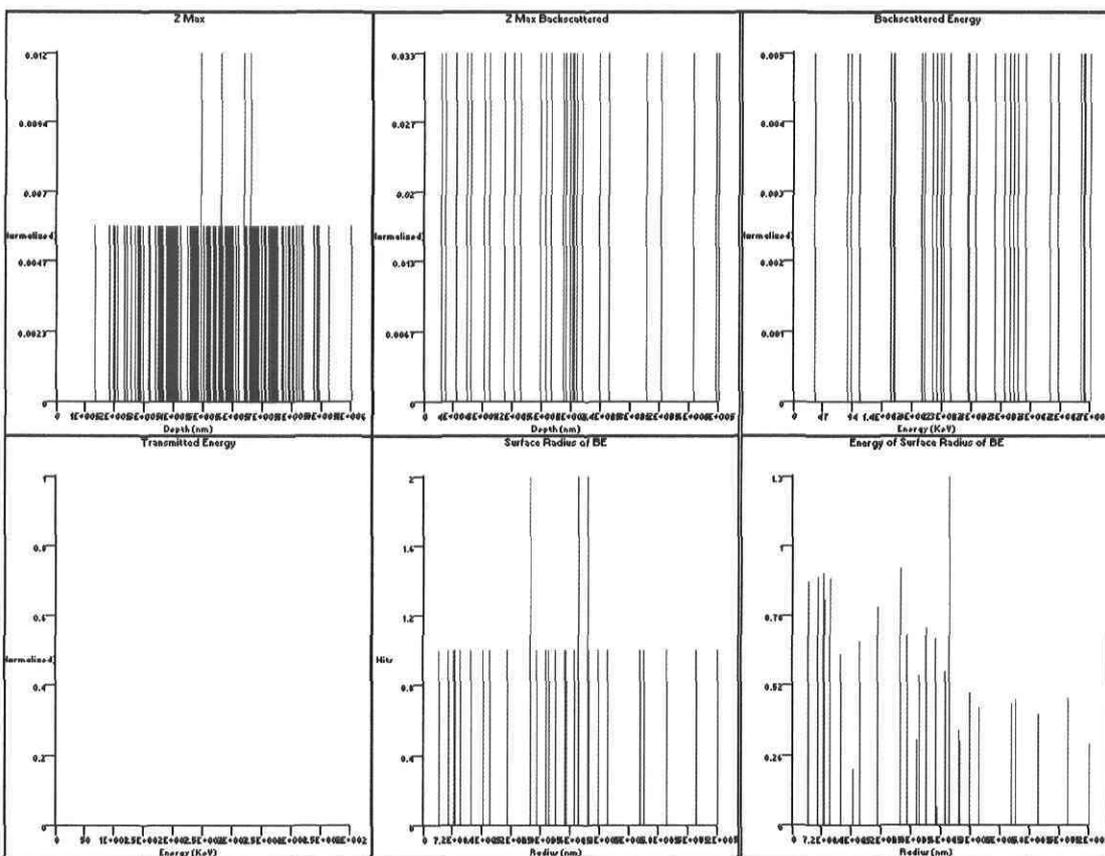


Figure A.3.8 : Distribution d'électrons à 500 keV dans le NdIV:ED2.

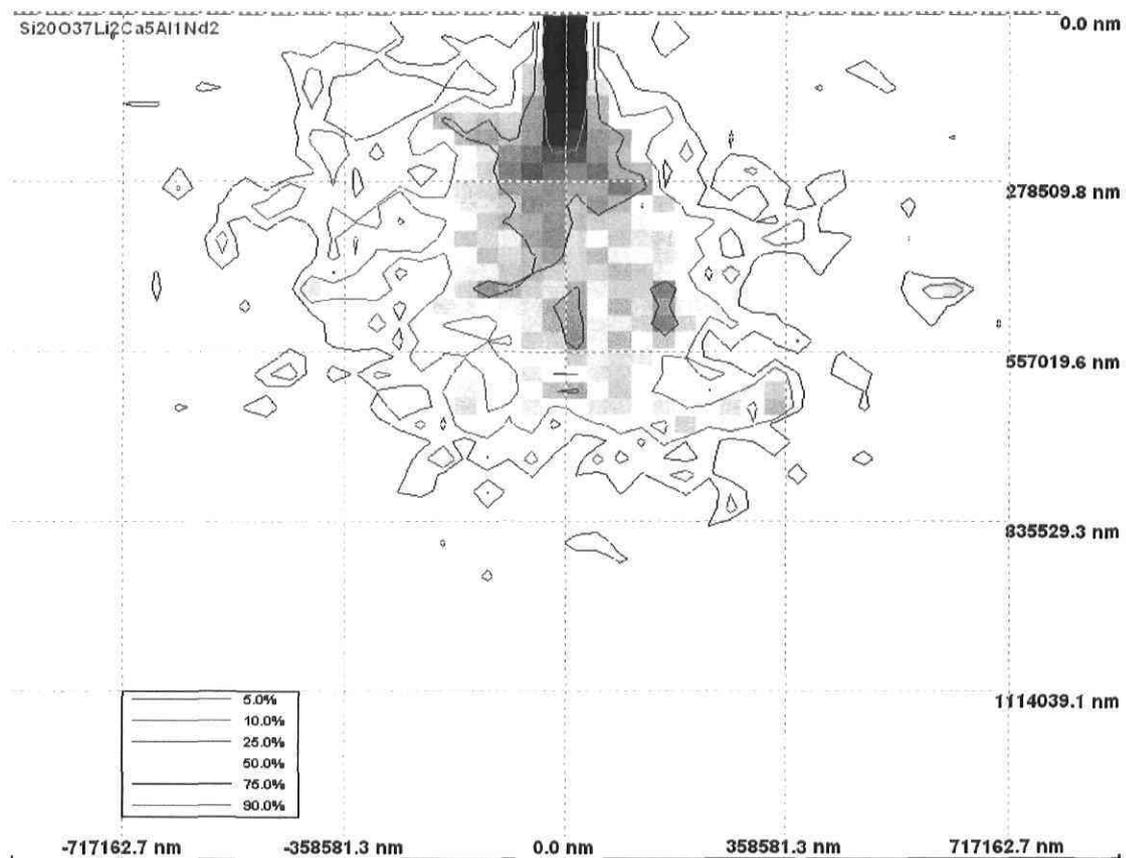


Figure A.3.9 : Énergie par position d'électrons incidents à 500 keV sur le NdIV:ED2.

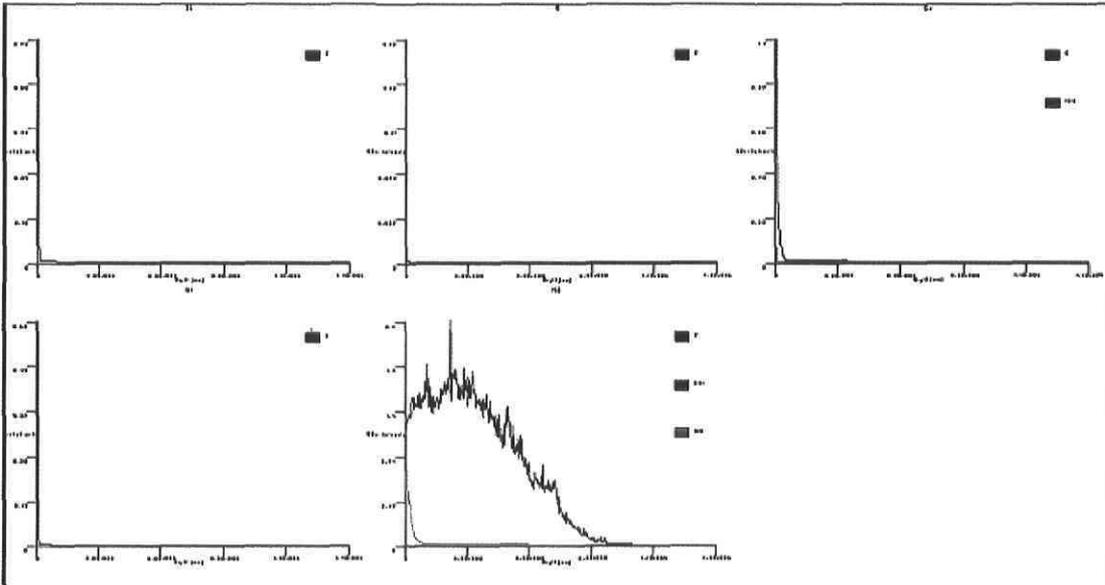


Figure A.3.10 : Rayons X issus d'électrons incidents à 500 keV sur le NdIV:ED2.

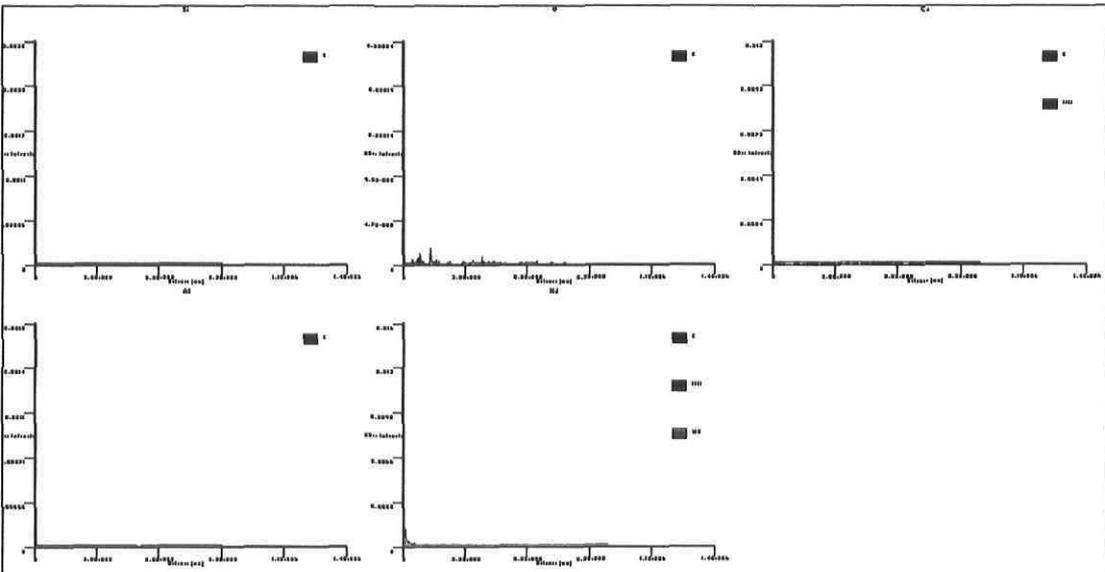


Figure A.3.11 : Distribution radiale de rayons X issus d'électrons incidents à 500 keV sur le NdIV:ED2.