

Sensibilité des fibres optiques dopées erbium sous différents environnements radiatifs

III.1. MESURES DES PERTES INDUITES DANS LES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM SOUS DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS RADIATIFS.....	67
III.1.1. Mesures sous irradiation gamma continue.....	67
<i>III.1.1.A. Mesures de transmission dans le proche infra-rouge</i>	<i>67</i>
<i>III.1.1.B. Mesures sous excitation à 980 nm et 1480 nm</i>	<i>70</i>
III.1.2. Mesures sous irradiation X pulsée.....	72
III.1.3. Mesures sous irradiation continue de protons	74
<i>III.1.3.A. Mesures avec pompage à 980 nm</i>	<i>74</i>
<i>III.1.3.B. Mesures de transmission dans le visible et le proche infra-rouge</i>	<i>77</i>
III.2. MESURES PRÉ- ET POST-IRRADIATION.....	80
III.2.1. Etude de la luminescence des fibres	80
<i>III.2.1.A. Luminescence dans le domaine du visible.....</i>	<i>80</i>
<i>III.2.1.B. Luminescence dans le domaine du proche infra-rouge.....</i>	<i>86</i>
III.2.2. Mesure de durée de vie	87
III.2.3. Mesure d'absorption.....	89
III.3. RÉSUMÉ.....	90

Nous avons caractérisé les pertes induites des fibres optiques monomodes dopées erbium lors de leur exposition à différents environnements radiatifs : rayons gamma continus, rayons X pulsés, et protons. En terme de débit de dose, ces environnements sont très différents. Comme nous avons pu le voir dans le Chapitre I [Williams 1992, Henschel 1998, Taylor 1998,...], ces fibres ont déjà fait l'objet de quelques études sous protons et irradiation gamma. En revanche, l'étude de leur sensibilité sous rayons X pulsés n'a pas encore été rapportée.

Pour l'ensemble de nos mesures sous irradiation, la principale source d'erreur est liée à la dosimétrie. En effet, pour les irradiations gamma la dose est estimée à 10% alors qu'elle est de 20% pour les irradiations X. Pour cette raison les différentes courbes sont présentées sans barres d'erreurs afin de ne pas les surcharger.

III.1. Mesures des pertes induites dans les fibres optiques dopées erbium sous différents environnements radiatifs

III.1.1. Mesures sous irradiation gamma continue

Les irradiations sous rayonnement gamma ont été réalisées avec la source RITA (§ II.1.2) du SCK•CEN en Belgique. Plusieurs campagnes d'irradiation ont été menées pour la mesure de la transmission dans le domaine de l'infrarouge (1250 - 1650 nm), de l'efficacité de l'excitation à 980 nm et 1480 nm. Les paramètres d'irradiation ont varié lors des différentes campagnes. Nous présentons, ci-dessous, pour chaque campagne les paramètres de mesure pour les fibres étudiées. Afin que les résultats soient directement comparables d'une fibre à l'autre, nous donnons la sensibilité des fibres calculée en $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}$ (Eq II-3). Toutes les mesures ont été faites à 25°C.

III.1.1.A. Mesures de transmission dans le proche infrarouge

Le banc de mesure utilisé pour cette expérience a été développé de telle sorte que quatre fibres peuvent être sondées simultanément (cf. Figure II-8), nous obligeant à mener trois campagnes d'irradiation pour tester les douze fibres étudiées. Les différents paramètres utilisés lors de ces trois campagnes sont répertoriés dans la Table III-1 pour chacune des fibres dopées erbium testées.

Fibre	Longueur de l'échantillon (m)	Débit de dose ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	Durée de l'irradiation (h)	Temps de mesures de guérison (h)	Dose totale reçue (kGy)
Y192	1	30	67.75	26	2.032
Y195	3	30	67.75	26	2.032
Y200	2	30	67.75	26	2.032
Y202	2	30	69.75	12	2.093
Y206	2	30	69.75	12	2.093
Y230	0.5	30	69.75	12	2.093

D#1	2	30	69.75	12	2.093
D#2	2	45	68.41	28.75	3.079
D#3	2	30	67.75	26	2.032
D#4	0.5	45	68.41	28.75	3.079
D#5	2	45	68.41	28.75	3.079
D#6	2	45	68.41	28.75	3.079

Table III-1 : Longueur des échantillons et paramètres d'irradiation pour la mesure de la transmission des fibres dans le proche IR sous irradiation gamma

Les longueurs des échantillons ont été déterminées selon la valeur de l'absorption (à 1530 nm) par unité de longueur, autrement dit en fonction de leur concentration en erbium. Les longueurs des fibres sont donc inversement proportionnelles à leur concentration d'erbium permettant ainsi des mesures de dynamiques semblables.

La Figure III-1 et la Figure III-2 regroupent les sensibilités mesurées après une dose de 2 kGy en fonction de la longueur d'onde pour les fibres étudiées. Les résultats de mesure sur la fibre D#4 n'ont été donnés que partiellement. Pour les plus grandes longueurs d'onde (>1350 nm), la forte concentration en erbium ne permet pas, avec nos conditions expérimentales, d'obtenir un bon rapport signal sur bruit.

Pour l'ensemble des fibres, nous pouvons remarquer que les pertes induites augmentent quand la longueur d'onde diminue. La fenêtre des télécommunications centrée à 1550 nm est moins touchée par les irradiations que celle centrée à 1310 nm.

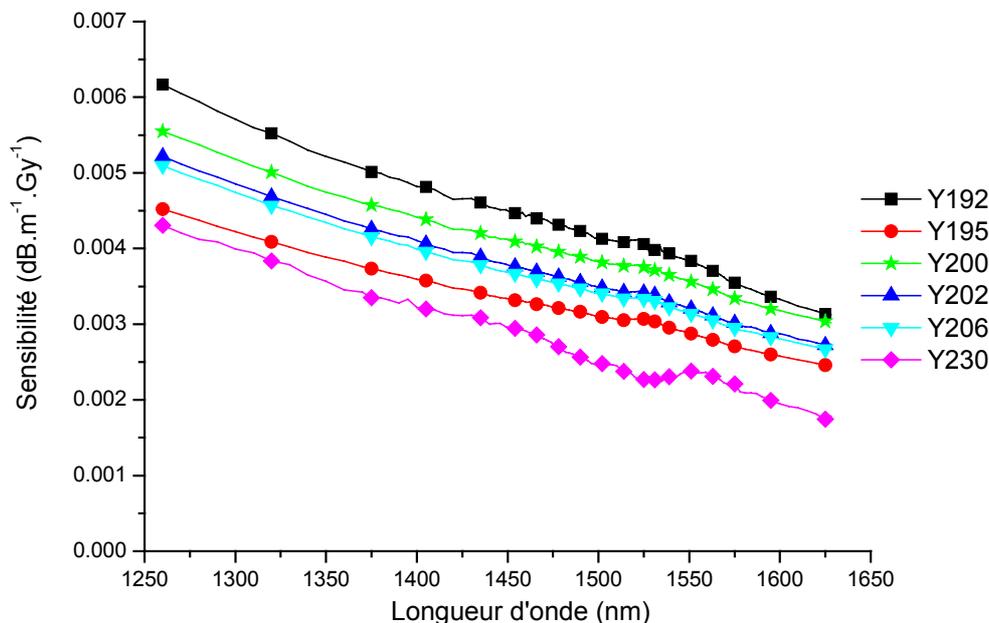


Figure III-1 : Sensibilité des fibres Y191, Y195, Y200, Y202, Y206 et Y230 en fonction de la longueur d'onde, lors de la mesure de transmission dans le proche IR, à 2 kGy

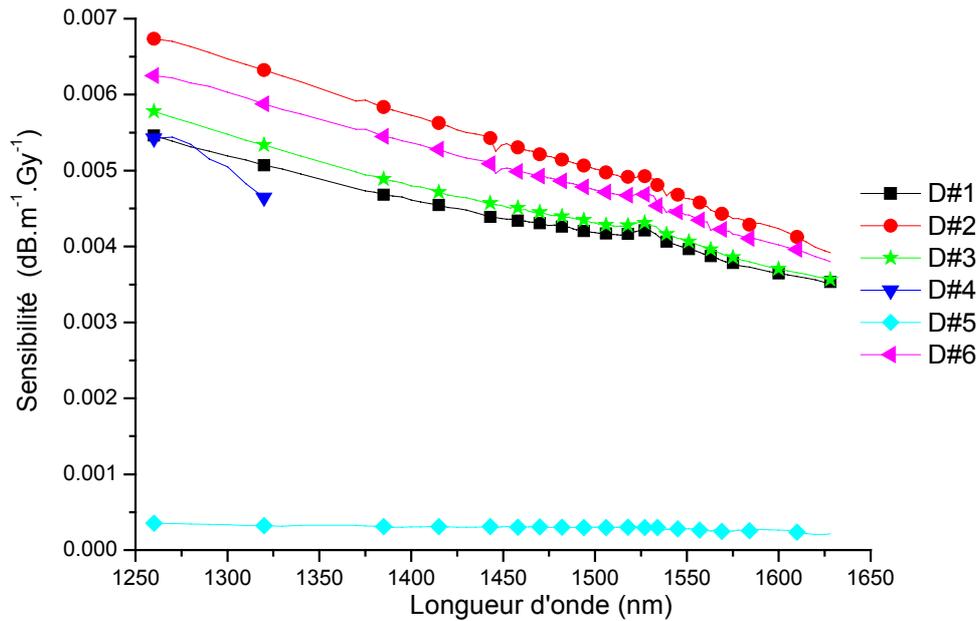


Figure III-2 : Sensibilité des fibres D#1, D#2, D#3, D#4, D#5 et D#6 en fonction de la longueur d'onde, lors de la mesure de transmission dans le proche IR, à 2 kGy

Pour l'ensemble des fibres étudiées ici, la sensibilité est de l'ordre de quelques $10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$, excepté pour la fibre D#5 dont la sensibilité est de l'ordre de quelques $10^{-4} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$. Cette résistance aux radiations gamma est liée à sa très faible concentration en Al. Pour les autres fibres nous constatons qu'il n'y a pas de corrélation entre les valeurs de pertes induites et la concentration en aluminium ou en erbium (même pour les fibres Y230 et D#4 qui ont une concentration importante d'erbium). Henschel *et al.* [Henschel 1998] ont noté que la concentration en Terres-Rares a une influence négligeable sur les pertes induites sous irradiation gamma, par contre la concentration en aluminium a une plus grande influence et les pertes augmenteraient avec la concentration en Al. Nos résultats confirment bien que la concentration en erbium n'a pas d'influence sur les pertes induites. En revanche, en ce qui concerne l'aluminium et dans la plage de concentration étudiée, seule sa présence en très faible quantité ou non a de l'influence. Comme indiqué ci-dessus la fibre D#5 se distingue bien des autres qui présentent des atténuations comparables alors que leur concentration en aluminium varie de 6 à 12%.

A titre de comparaison, nous donnons les valeurs des pertes induites à deux longueurs d'onde (1310 nm et 1550 nm) de toutes les fibres dans la Table III-2.

Sensibilité $10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$	Y192	Y195	Y200	Y202	206	Y230	D#1	D#2	D#3	D#4	D#5	D#6
à 1310 nm	5.60	4.15	5.09	4.77	4.66	3.95	5.14	6.46	5.40	4.83	0.207	5.96
à 1550 nm	3.84	2.89	3.57	3.22	3.16	2.38	3.99	4.72	4.08	×	0.277	4.47

Table III-2 : Sensibilité des fibres mesurées à 2 kGy pour les longueurs d'onde 1310 nm et 1550 nm (les valeurs sont en $10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$)

La Figure III-3 représente l'évolution temporelle des pertes induites à 1530 nm pendant et après une irradiation gamma pour quatre fibres (Y192, Y195, D#2 et D#5). Les pertes induites pendant

l'irradiation ont été tracées en fonction de la dose pour une comparaison directe. En effet les débits de doses différents. Mais entre $30 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ et $45 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, il n'y a pas d'effet de débit de dose [Morita 1989]. Les données sont tracées avec différents motifs et les ajustements en lignes continues.

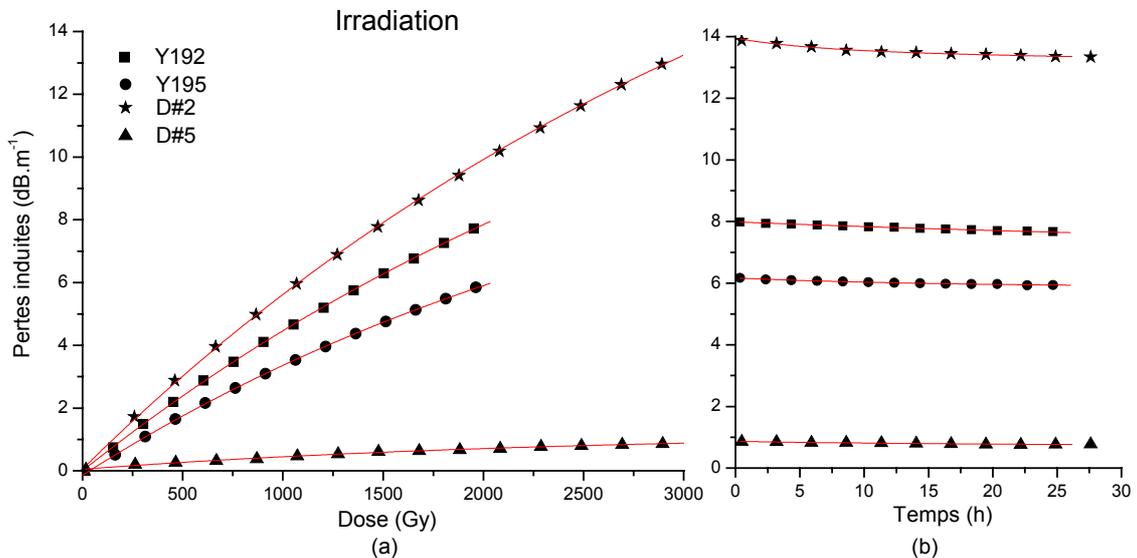


Figure III-3 : (a) Evolution des pertes induites en fonction de la dose lors d'une irradiation gamma à 1530 nm pour les fibres Y192, Y195, D#2 et D#5. (b) Evolution temporelle des pertes induites après la fin de l'irradiation. Les motifs correspondent aux données acquises et les lignes continues aux ajustements des données

Nous avons ajusté nos données avec une exponentielle de saturation pour les pertes induites pendant l'irradiation en utilisant l'équation III-1 comme le propose Williams *et al.* [Williams 1992], où a , b et b' sont les paramètres d'ajustement et \dot{D} le débit de dose.

$$A_{\text{irr}}(t) = a.(1 - e^{-b.t}) = a.(1 - e^{-b'.D}) \quad \text{avec } b' = \frac{b}{\dot{D}} \quad (\text{Eq.III-1})$$

Les pertes induites post-irradiation sont ajustées au moyen de l'équation III-2 proposée par Williams *et al.* [Williams 1992] et Fukuda *et al.* [Fukuda 1994] pour rendre compte de la guérison des fibres. γ_0 , A_1 , τ_1 , A_2 et τ_2 constituent les paramètres d'ajustement.

$$A_{\text{post-irr}}(t) = \gamma_0 + A_1.e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2.e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (\text{Eq.III-2})$$

D'après Williams *et al.* [Williams 1992], le paramètre γ_0 représente la contribution permanente des centres colorés, les paramètres τ_1 et τ_2 les constantes de temps de guérison des centres colorés transitoires et A_1 et A_2 leur contribution aux pertes induites à la fin de l'irradiation.

III.1.1.B. Mesures sous excitation à 980 nm et 1480 nm

En plus des mesures de la sensibilité en fonction de la longueur d'onde dans l'infrarouge données ci-dessus, nous avons suivi, sous irradiation gamma, l'évolution de la luminescence de l'erbium autour de 1530 nm lorsque la fibre est excitée à 980 nm et à 1480 nm. Dans les deux cas, les tests ont été

menés en utilisant différentes puissances de pompe. Le banc de mesure utilisé pour cette expérience est celui décrit au paragraphe II.2.1.B. Ce banc ne pouvant tester pour les deux longueurs d'onde d'excitation qu'une seule fibre à la fois, nous avons été obligés de réaliser trois campagnes et se limiter à seulement trois fibres. Nous avons testé les fibres D#1, D#2 et D#3. Les irradiations ont été effectuées à température ambiante avec un débit de dose de $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$. La durée d'une campagne est d'environ 23 h, de sorte que les fibres ont reçu une dose d'un peu plus de 1 kGy. De même que pour les mesures de transmission dans le proche IR sous irradiation, nous avons continué les acquisitions après l'arrêt des irradiations pour évaluer la guérison des fibres.

Les trois fibres testées présentent un comportement similaire. Pour cette raison, nous ne présenterons que les courbes de la fibre D#3 pour les différentes puissances d'excitation afin de ne pas surcharger ce manuscrit. Les Figures III-4 et III-5 montrent l'évolution temporelle des pertes induites de cette fibre pendant et après l'irradiation à la longueur d'onde d'excitation (980 nm et 1480 nm respectivement) ainsi qu'à 1530 nm. Ces pertes sont calculées moyennant l'équation II-2.

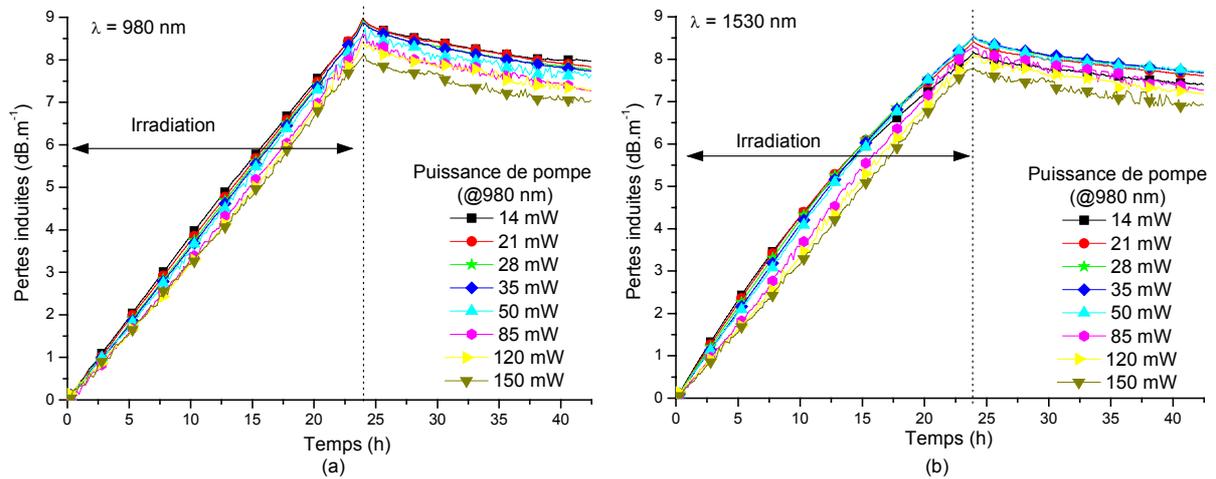


Figure III-4 : Evolution temporelle des pertes induites à 980 nm (a) et à 1530 nm (b) de la fibre D#3 pour différentes puissances de pompe à 980 nm pendant et après l'irradiation (Débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

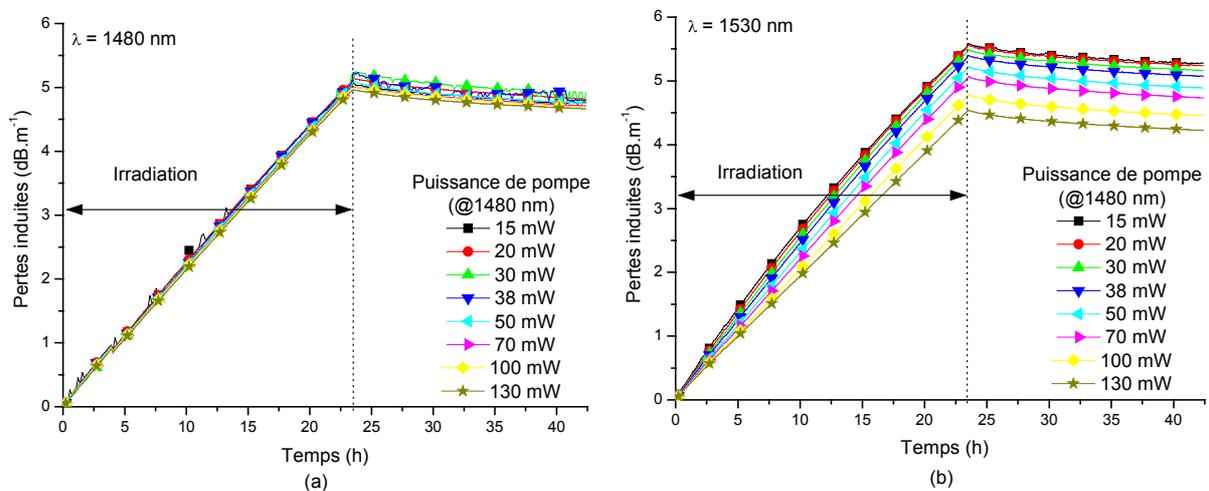


Figure III-5 : Evolution temporelle des pertes induites à 1480 nm (a) et à 1530 nm (b) de la fibre D#3 pour différentes puissances de pompe à 1480 nm pendant et après l'irradiation (Débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

De manière générale nous constatons que plus la puissance d'excitation est élevée plus les pertes sont faibles ; l'écart de pertes entre les puissances d'excitation extrêmes reste faible, il atteint 0.5 dB à 980 nm au bout de 23 h d'irradiation (Figure III-4.a). L'excitation entraîne un photoblanchiment des centres colorés pendant l'irradiation. En effet, Henschel *et al.* [Henschel 2000] ont montré que les pertes induites permanentes peuvent être réduites sous insolation laser, mais son efficacité semble être faible pour les fibres monomodes, ce qui est le cas de nos fibres.

Les pertes induites sur toute la région spectrale de la luminescence à 1530 nm et à la longueur d'onde d'excitation sont plus élevées lorsque la fibre est excitée à 980 nm, plutôt qu'à 1480 nm. Ceci s'explique par le fait que les pertes induites augmentent lorsque la longueur d'onde diminue (cf. Figure III-1 et Figure III-2) et sont donc plus élevées à 980 nm qu'à 1480 nm. L'efficacité d'excitation en est donc réduite.

III.1.2. Mesures sous irradiation X pulsée

Les irradiations avec des rayons X pulsés ont été réalisées au Centre d'Etude de Gramat de la DGA. Le banc de mesure utilisé est décrit au paragraphe II.2.2. Nous n'avons testé que deux fibres : les fibres Y192 et Y195. Les fibres ont été testées à deux longueurs d'onde : 1310 nm et 1550 nm, correspondant à deux des trois fenêtres de télécommunications et à une température de 25°C. Chaque fibre, longue de 1 m, a été soumise à quatre tirs de flashes X de 35 ns dont le débit de dose est supérieur à $10^6 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$. Les fibres ont reçu une dose comprise entre 55 et 225 Gy [Tortech 2007-bis]. La Table III-3 donne en détail les doses reçues et la longueur d'onde de mesure utilisée après chaque tir pour les deux fibres testées. Après chaque tir, l'évolution temporelle de la sensibilité a été mesurée et est présentée en Figure III-6. La sensibilité est calculée moyennant l'équation II-3.

	Fibre Y192	Fibre Y195
Tir 1	90 Gy @ 1550 nm	57 Gy @ 1550 nm
Tir 2	95 Gy @ 1310 nm	93 Gy @ 1310 nm
Tir 3	206 Gy @ 1550 nm	142 Gy @ 1310 nm
Tir 4	222 Gy @ 1310 nm	156 Gy @ 1550 nm

Table III-3 : Dose totale reçue et longueur d'onde de mesure pour chacune des fibres Y192 et Y195 après chaque tir de flash X

Sur la Figure III-6-a, on remarque que les courbes sont similaires en terme de profil et d'amplitude. Dans la plage étudiée, l'évolution de la sensibilité à 1310 nm après un flash X ne présente pas de variation en fonction de la dose reçue par la fibre ou du dopage en erbium de la fibre. A 1310 nm l'erbium n'est pas actif et la réponse de la fibre correspond uniquement à celle de la matrice hôte. Les deux fibres testées ici sont constituées de matrices hôtes similaires, leurs réponses à 1310 nm sont proches. A cette longueur d'onde et pour les doses étudiées, il n'y a pas d'effet de dose cumulée : pour les deux fibres, les courbes d'évolution de la sensibilité pour les plus faibles et les plus

fortes doses sont, aux erreurs de mesure près, identiques. Les deux fibres atteignent des niveaux de pertes permanentes légèrement différents, mais qui restent comparables, $8.10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$.

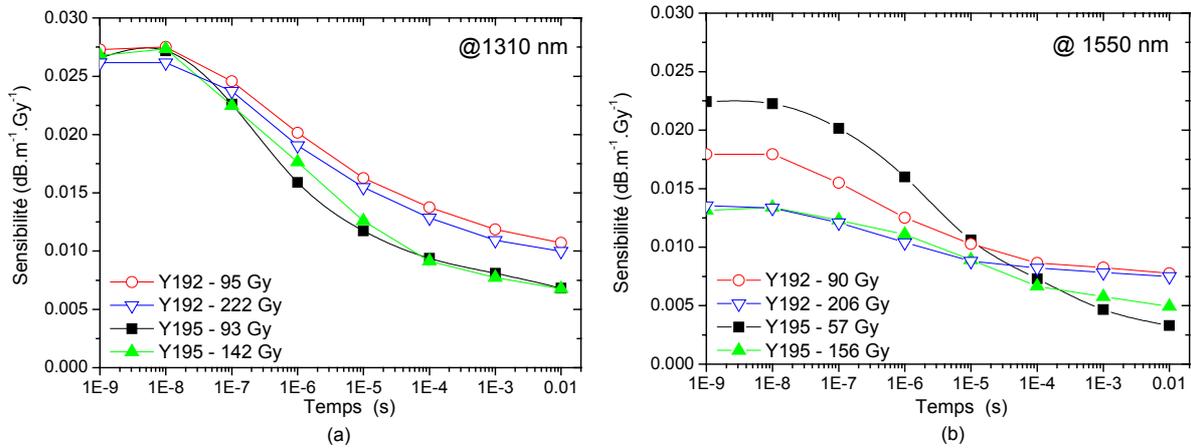


Figure III-6 : Evolution de la sensibilité à 1310 nm (a) et à 1550 nm (b) des fibres Y192 et Y195 après différents tirs de flash X

A 1550 nm (Figure III-6-b), les comportements diffèrent. Pour la plus forte dose déposée, les deux fibres ont les mêmes valeurs de sensibilité juste après le tir et les niveaux de pertes permanentes restent proches, autour de $7.10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$. Par contre pour les plus faibles doses déposées, les pertes transitoires (juste après le tir) sont plus élevées que pour les plus fortes doses. Cependant les pertes permanentes ont des valeurs sensiblement identiques pour toutes les doses testées. Ces résultats traduisent une réponse non linéaire des fibres en fonction de la dose totale. Ce comportement est probablement dû à un phénomène de saturation. Les centres responsables de l'atténuation transitoire sont transformés en très grande partie dès le début de l'irradiation rendant ainsi la fibre moins sensible à la suite de l'irradiation. Un tel comportement pourrait donc être exploité pour durcir les fibres vis à vis d'impulsions de courte durée. Par ailleurs ce phénomène de saturation n'est pas observé pour les pertes permanentes. Les pertes induites ramenées à l'unité de dose restent sensiblement les mêmes pour des deux fibres et pour les doses déposées.

La concentration en erbium de la fibre Y192 est dix fois plus importante que celle de la fibre Y195. A 10^{-2} s après le flash X, la sensibilité est d'environ $8.10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$ pour la fibre Y192 et d'environ $4.10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$ pour la fibre Y195 ; seulement deux fois moins importante sachant qu'une fibre avec une plus grande concentration en erbium offre l'avantage, à performance d'amplification équivalente, de réduire la longueur de fibre dopée.

Par ailleurs, comme nous l'avons déjà remarqué lors des mesures faites sous irradiation gamma continue (§ III.1.1.A), les pertes pour les deux fibres sont plus importantes à 1310 nm qu'à 1550 nm et par conséquent le niveau de perte cumulé sur la longueur ; ce comportement mérite d'être retenu lors du dimensionnement des amplificateurs optiques à 1550 nm.

Sur la Figure III-7, est représentée la réponse typique d'une fibre SMF28 après un tir de flash X avec des paramètres d'irradiation similaires à ceux utilisés pour nos fibres, ainsi que les réponses de nos deux fibres testées à faible dose déposée afin de comparer leurs réponses temporelles. Les pertes

transitoires et permanentes après un flash X des fibres dopées erbium sont plus élevées que celles d'une fibre standard des télécommunications (type SMF28). Ceci peut s'expliquer, comme pour les tests sous irradiation gamma, par la présence de dopant additionnel tel que l'aluminium dans les fibres dopées erbium (cf. §III.1.1.A). Cette observation conforte l'attribution des pertes induites pour une grande partie aux défauts essentiellement liés à la matrice hôte.

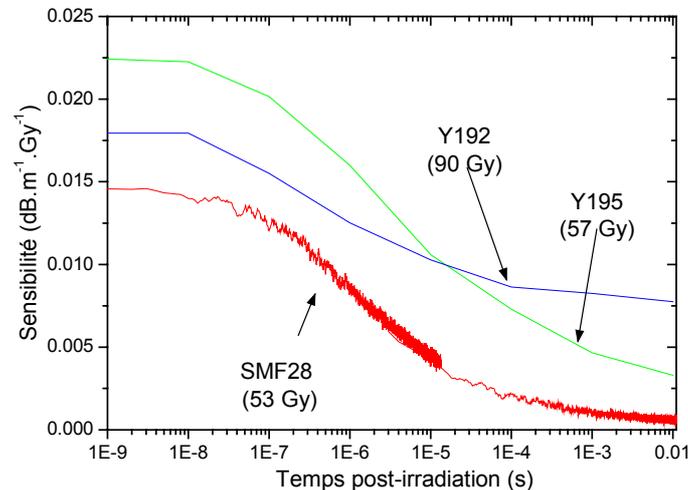


Figure III-7 : Evolution temporelle post-irradiation à 1550 nm de la sensibilité des fibres Y192, Y195 et d'une fibre SMF28 après un tir de flash X

III.1.3. Mesures sous irradiation continue de protons

Les irradiations sous protons ont été réalisées avec l'installation TRIUMF à Vancouver au Canada. Le positionnement des fibres devant le faisceau et les bancs de mesure utilisés avec ce type de radiation sont décrits dans le Chapitre II (§II.2.3). Trois fibres ont été testées sous irradiation proton continue : D#1, D#2 et D#3. Pour les mesures avec l'excitation à 980 nm, nous avons exploité deux énergies de protons : 50 MeV et 105 MeV, alors que pour les mesures en transmission, nous nous sommes contentés d'une seule énergie de proton : 105 MeV. Toutes les expériences ont été effectuées à 25°C.

III.1.3.A. Mesures avec pompage à 980 nm

Les fibres ont été irradiées une par une et n'ont donc pas reçu exactement la même dose cumulée. La Table III-4 donne le débit de dose et la dose reçue équivalente par chacune des trois fibres sous les deux énergies de protons exploitées. La longueur des échantillons pour cette mesure est de 3 m et nous avons utilisé à chaque fois trois différentes puissances d'excitation : 3 mW, 23 mW et 54 mW [Girard 2007 Bis].

L'évolution de la puissance transmise par la fibre à 980 nm et de la luminescence autour de 1530 nm pour les trois fibres étudiées aux trois puissances d'excitation et sous les deux énergies de

protons présente un comportement semblable. A titre d'exemple, nous ne présentons ici que les résultats de la fibre D#3 excitée à 3 mW et sous irradiation de protons de 50 MeV, en Figure III-8.

	D#1	D#2	D#3
50 MeV	6.7 Gy·min ⁻¹	5.2 Gy·min ⁻¹	8.2 Gy·min ⁻¹
	555 Gy	424 Gy	677 Gy
105 MeV	11.3 Gy·min ⁻¹	6.4 Gy·min ⁻¹	9.14 Gy·min ⁻¹
	723 Gy	403 Gy	576 Gy

Table III-4 : Débit de dose équivalent Si et dose équivalente reçue par les fibres D#1, D#2 et D#3 excitées à 980 nm lors des irradiations sous protons de 50 MeV et 105 MeV

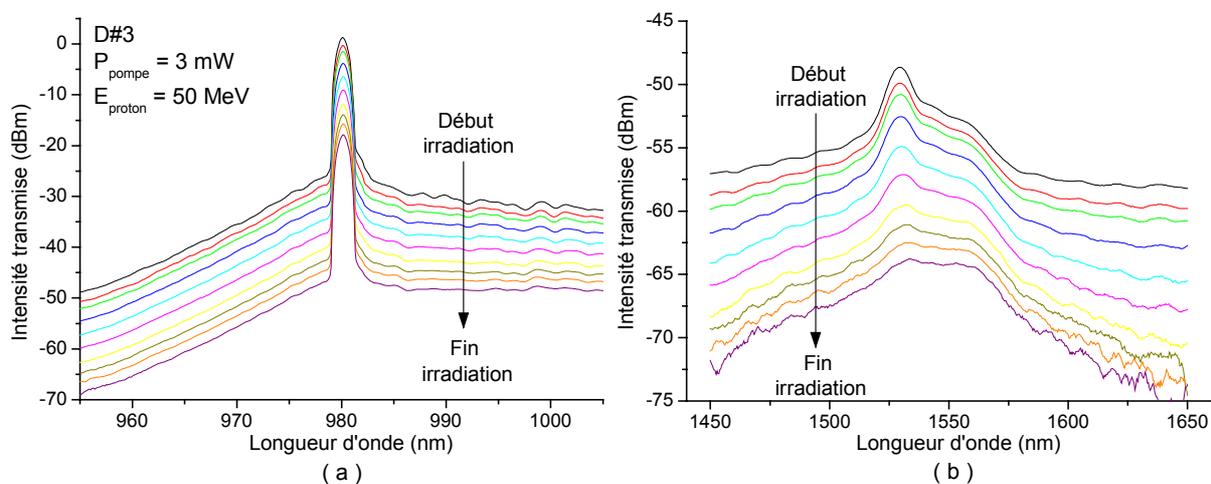


Figure III-8 : Evolution de l'intensité transmise (en dBm¹⁰) de l'excitation (a) et de la luminescence autour de 1530 nm (b) de la fibre D#3 sous excitation à 980 nm et à 3 mW lors de l'irradiation aux protons à 50 MeV

Nous constatons qu'il y a une dégradation de l'excitation due aux défauts absorbants créés par l'irradiation, et par conséquent, l'efficacité d'excitation en est réduite. La luminescence autour de 1530 nm est également détériorée. Ceci est dû à la présence de défauts absorbants générés par l'irradiation qui réduisent l'efficacité de l'excitation.

Sur la Figure III-9, nous voyons que l'excitation est plus dégradée par l'irradiation que la luminescence. Cette dégradation est due à la présence de centres absorbants. Le fait que la luminescence autour de 1530 nm est moins affectée peut s'expliquer par la présence de transferts d'énergie entre les centres absorbants et les ions erbium par un mécanisme de « down conversion »¹¹. Ce phénomène de « down conversion » se voit également dans l'évolution de la luminescence de l'erbium ; les grandes longueurs d'onde sont moins dégradées que les courtes longueurs d'onde.

¹⁰ Le dBm correspond au décibel relatif au milliwatt.

¹¹ Le terme de « down conversion » désigne l'ensemble des processus permettant la conversion des hautes énergies vers les basses énergies.

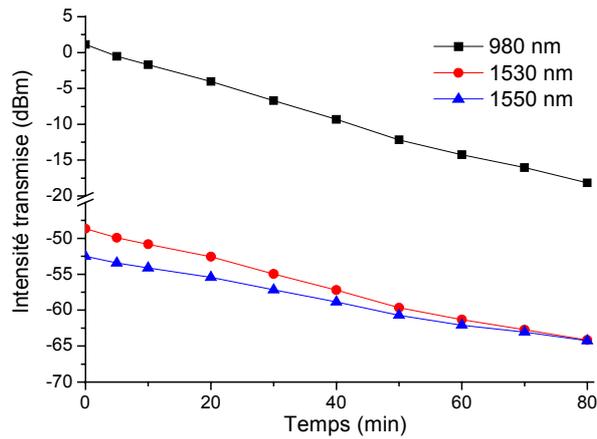


Figure III-9 : Evolution temporelle de l'intensité transmise de l'excitation et de la luminescence à 1530 nm et 1550 nm de la fibre D#3 sous excitation à 980 nm et à 3 mW pendant l'irradiation aux protons à 50 MeV

La Figure III-10 montre l'évolution des pertes induites à 980 nm et 1530 nm sous irradiation aux protons ($E_{\text{proton}} = 105 \text{ MeV}$) en fonction de la dose reçue par les trois fibres D#1, D#2 et D#3 et pour les différentes puissances d'excitation (3, 23 et 53 mW).

Chacune des trois fibres présente des pertes induites ne dépendant pas significativement de la valeur de la puissance d'excitation utilisée. Ce comportement se vérifie quelque soit la longueur d'onde de mesure (signal ou excitation). La croissance des pertes est monotone et ne présente pas de phénomène de saturation pour les doses déposées allant jusqu'à 750 Gy.

La fibre D#2 présente des pertes légèrement plus élevées que la fibre D#3 qui présente elle-même des pertes plus élevées que la fibre D#1. Cette dernière possède la concentration en aluminium la plus élevée des trois fibres testées ici. Cette observation montre que les pertes ne sont donc pas directement liées à la valeur de la concentration d'aluminium, comme Henschel *et al.* [Henschel 1998] l'ont déjà noté.

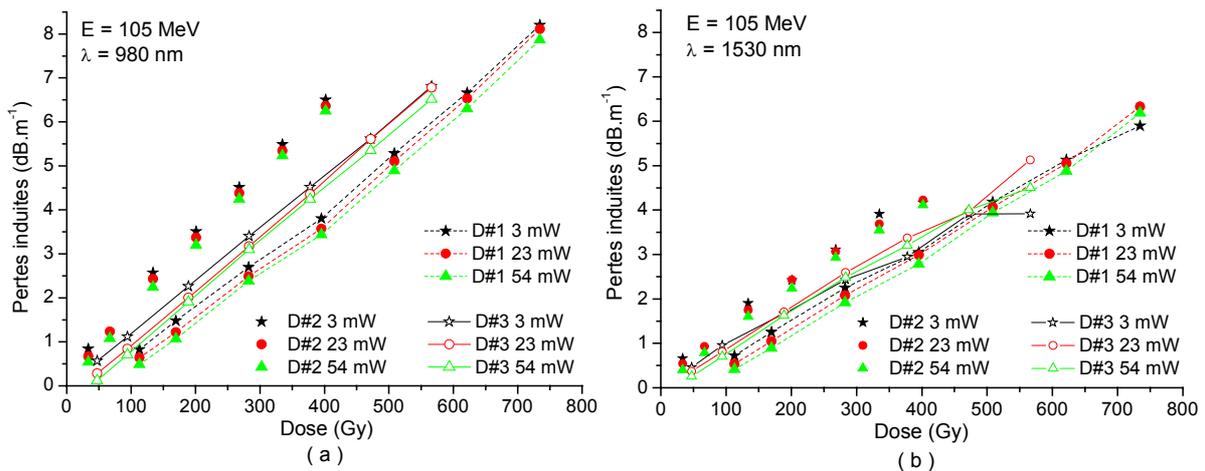


Figure III-10 : Evolution des pertes induites à 980 nm (a) et à 1530 nm (b) sous irradiation aux protons d'énergie 105 MeV des fibres D#1, D#2 et D#3 pompées à 980 nm avec différentes puissances (3, 23 et 54 mW)

La Figure III-11 présente les pertes induites de la fibre D#3 pompée à 980 nm avec une puissance d'environ 50 mW lors de l'irradiation de cette fibre sous protons d'énergie 50 MeV, sous protons d'énergie 105 MeV et sous rayons gamma (résultats du paragraphe III.1.1.B).

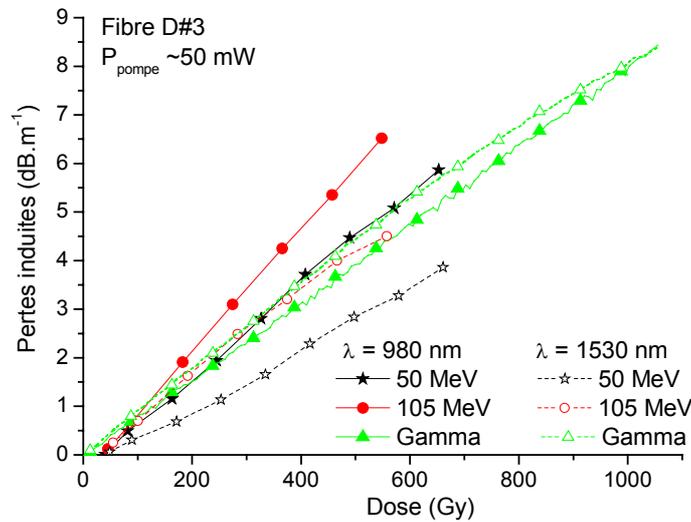


Figure III-11 : Evolution des pertes induites à 980 nm et à 1530 nm de la fibre D#3 pompée à environ 50 mW sous différentes irradiations (proton 50 MeV, proton 105 MeV et Gamma)

Les comportements de cette fibre dopée erbium, sous irradiation gamma et sous protons, restent semblables. Les pertes induites augmentent de façon quasi-linéaire. La sensibilité de la fibre est plus grande toutefois sous protons d'énergie plus élevée. Les valeurs de pertes induites restent très proches quelque soit le type de radiations utilisées (proton ou gamma). En effet, ces deux types de radiations produisent des modifications semblables de la structure de la matrice hôte. Ces résultats sont en accord avec les conclusions des études antérieures de Williams *et al.* [Williams 1996 – Williams 1998] et de Rose *et al.* [Rose 2001] : il est possible d'utiliser une irradiation gamma pour simuler une irradiation proton même de haute énergie et les pertes induites sont attribuées à la création de défauts absorbants aussi bien à la longueur d'onde d'excitation (980 nm) qu'aux longueurs d'onde du signal (luminescence autour de 1530 nm).

III.1.3.B. Mesures de transmission dans le visible et le proche infrarouge

Nous avons également mesuré la transmission des trois fibres D#1, D#2 et D#3 sous irradiation aux protons. Nous avons testé les fibres uniquement sous protons d'énergie 105 MeV, l'énergie des protons n'ayant que très peu d'influence sur la réponse des fibres (voir paragraphe précédent, III.1.3.A ou [Rose 2001]). De même que pour les mesures avec l'excitation à 980 nm, les fibres n'ont pas été exposées exactement au même débit de dose. De même, les temps d'irradiation n'ont donc pas été identiques et par conséquent elles n'ont pas reçu la même dose. La Table III-5 donne le récapitulatif de la dose reçue par chacune des trois fibres.

	D#1	D#2	D#3
Débit de dose	9 Gy·min ⁻¹	9 Gy·min ⁻¹	7.8 Gy·min ⁻¹
Dose totale	590 Gy	605 Gy	818 Gy

Table III-5 : Débit de dose équivalent S_i , dose équivalente reçue par D#1, D#2 et D#3 sous irradiation aux protons à 105 MeV lors des mesures en transmission

Dans la Figure III-12, nous donnons les pertes induites des fibres D#1, D#2 et D#3 sur le domaine spectral 600 – 1800 nm lors des mesures en transmission sous irradiation aux protons. Seuls sont reportées les mesures au bout de 30 s et 3000 s d’irradiation afin de ne pas surcharger le graphe. Les doses cumulées pour les fibres D#1 et D#2 sont légèrement différentes de celles de la fibre D#3 (cf. Table III-5).

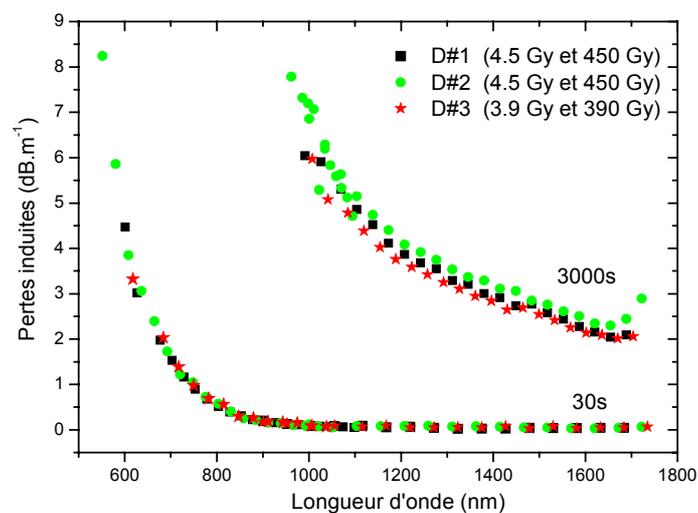


Figure III-12 : Pertes induites des fibres D#1, D#2 et D#3 au bout de 30 s et 3000 s d’irradiation aux protons ($E = 105$ MeV) sur le domaine spectral 600 – 1800 nm

Les comportements des trois fibres sous irradiation aux protons sont très similaires voire identiques. Pour des doses totales proches, les trois fibres présentent des valeurs de pertes induites très voisines. Comme lors de l’irradiation gamma les pertes induites sont plus faibles pour les plus grandes longueurs d’onde testées. Afin de comparer facilement les pertes induites sous les irradiations continues gamma et aux protons, nous avons tracé sur le même graphe (Figure III-13) la sensibilité de la fibre D#2 irradiée avec des rayons gamma et des protons ($E = 105$ MeV) pour une dose cumulée d’environ 450 Gy (plus précisément 453 Gy pour l’irradiation gamma et 450 Gy pour l’irradiation aux protons). N’ayant mesuré la transmission des fibres sous irradiation gamma que sur la plage spectrale 1250 – 1630 nm, nous n’effectuons la comparaison que sur ce domaine spectral. Les deux courbes de pertes induites sont très proches. La sensibilité de la fibre est donc identique lorsqu’elle est soumise à des rayons gamma ou des protons. Ceci confirme le fait qu’il est possible de simuler des irradiations aux protons par des irradiations gamma comme nous l’avons déjà mentionné dans le paragraphe précédent.

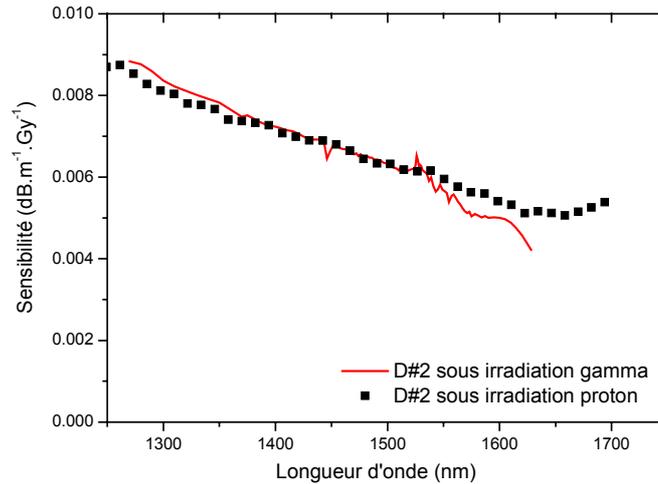


Figure III-13 : RIA de la fibre D#2 sous irradiation gamma et sous irradiation proton pour une dose cumulée d'environ 450 Gy.

Nous avons également comparé le profil de la sensibilité de la fibre D#2 à celui d'une fibre dopée uniquement aluminium que B. Brichard *et al.* [Brichard 2003] avaient testée sous irradiation gamma. Les deux courbes en question sont tracées sur le même graphe dans la Figure III-14. Sur cette même figure nous avons également superposé les deux courbes afin de faciliter la comparaison de leur profil.

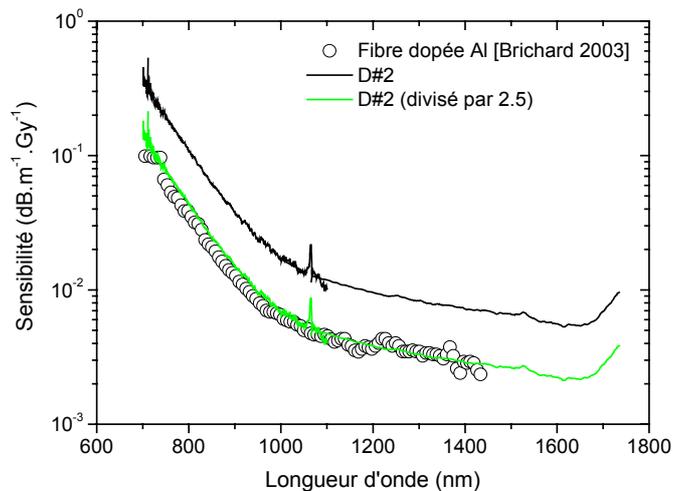


Figure III-14 : Comparaison de la sensibilité de la fibre D#2 sous irradiation aux protons et d'une fibre dopée aluminium sous irradiation gamma [Brichard 2003].

La fibre utilisée par Brichard *et al.* [Brichard 2003] a l'aluminium comme unique dopant en cœur (5.2%) et sa gaine est constituée de silice pure. Cette fibre permet de mettre en évidence l'effet de la présence de l'aluminium sous irradiation. Les profils des deux fibres de la Figure III-14 sont identiques. L'évolution de la sensibilité en fonction de la longueur d'onde est essentiellement dictée par l'aluminium. Cette observation va dans le même sens que celle faite par Williams *et al.* [Williams 1992] ou encore Henschel *et al.* [Henschel 1998] : la présence de l'aluminium a une influence capitale sur les pertes induites sous irradiation alors que celle de l'erbium est négligeable.

III.2. Mesures pré- et post-irradiation

En plus des caractérisations en ligne menées sur nos fibres sous irradiation, nous avons procédé à la caractérisation spectroscopique pré- et post-irradiation des fibres étudiées. Pour chacune des fibres nous avons conservé un échantillon témoin provenant de la même souche présentant les mêmes spécifications sur toute sa longueur. Nous ne présenterons pas dans ce manuscrit les résultats de l'ensemble des fibres étudiées du moment où leurs comportements sont similaires.

III.2.1. Etude de la luminescence des fibres

Nous avons effectué une étude de la luminescence des fibres dans les deux domaines spectraux suivants : visible et début du proche infrarouge ($\sim 500 - 900$ nm) et proche infrarouge ($\sim 1450 - 1650$ nm).

III.2.1.A. Luminescence dans le domaine du visible

Les spectres de luminescence dans le domaine du visible et le début de proche infrarouge sont réalisés avec une installation de microspectroscopie, dont la description est donnée dans le paragraphe II.3.1.A. Sous excitation à 514.5 nm, nous avons utilisé une puissance inférieure à 2 mW pour éviter le photoblanchiment des fibres.

Pour chaque fibre testée, irradiée ou non, nous avons enregistré la réponse spectrale au niveau du cœur et de la gaine en gardant exactement les mêmes conditions expérimentales, seule la fibre est déplacée de quelques micromètres sous le faisceau sonde afin de passer du cœur à la gaine. Les intensités absolues recueillies diffèrent d'une fibre à l'autre puisque les réglages sont modifiés à chaque changement de fibres. Afin de procéder à leur comparaison nous avons choisi de normaliser les spectres de cœur sur la raie la plus intense, autrement dit la transition de l'erbium à 547 nm. La réponse de la gaine est normalisée en utilisant le même coefficient que celui appliqué à la réponse du cœur afin de ne pas modifier les intensités relatives pour une même fibre.

La Figure III-15 présente les différents spectres normalisés de la photoluminescence acquis dans les échantillons vierges et irradiés de six de nos fibres (Y192, Y195, Y200, Y230, D#1 et D#3).

Si l'on ne considère que les réponses au niveau du cœur des fibres, nous pouvons identifier cinq principales contributions correspondant à cinq transitions entre différents niveaux énergétiques des ions erbium [Desurvire 1994] : 525 nm ($^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$), 547 nm ($^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$), 660 nm ($^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$), 800 nm ($^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$), 850 nm ($^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$). A ces raies de l'erbium s'ajoute une large bande de luminescence centrée autour de 620 nm. Cette même bande se retrouve dans les spectres enregistrés au niveau de la gaine des fibres. L'intensité de cette dernière est plus importante pour les échantillons irradiés que pour les échantillons vierges témoins. Les centres colorés

responsables de cette émission préexistent à l'irradiation mais leur présence est renforcée par l'irradiation.

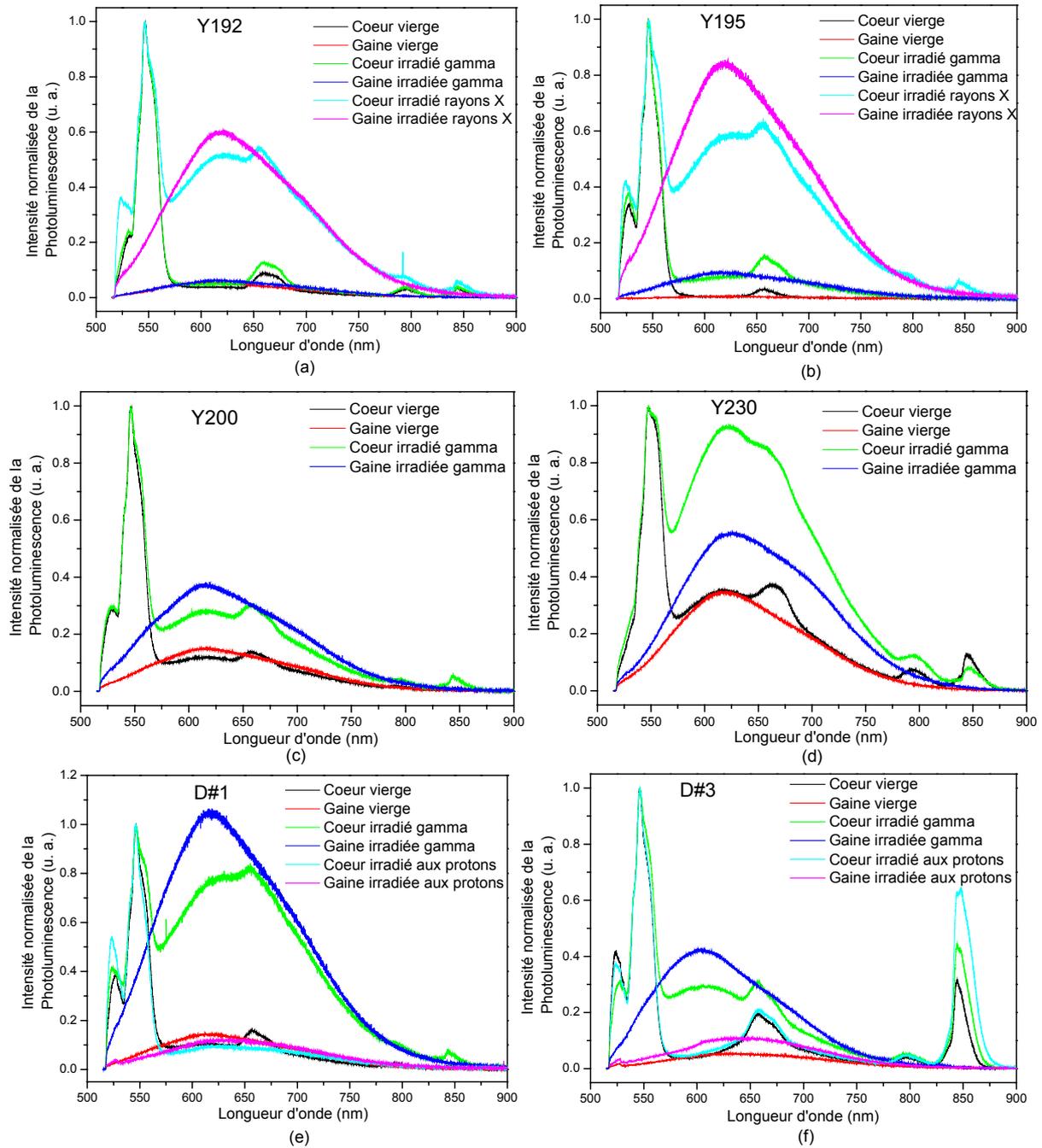


Figure III-15 : Spectres de photoluminescence normalisés acquis dans le cœur et la gaine des différents échantillons vierges et irradiés (gamma, protons ou flash X) des fibres Y192 (a), Y195 (b), Y200 (c), Y230 (d), D#1 (e) et D#3 (f). Excitation laser à 514.5 nm, à 2 mW de puissance.

Afin de suivre l'évolution des spectres de luminescence, nous avons procédé à un ajustement de ces derniers au sens des moindres carrés [Tortech 2007-ter] par une somme pondérée de fonctions Gaussiennes pour rendre compte des transitions de l'ion erbium [Desurvire 1994] et des défauts [Griscom 1991, Skuja 1998] de la matrice hôte. Le choix d'employer des fonctions Gaussiennes vient du fait que la silice utilisée pour la fabrication des fibres optiques est un matériau amorphe. Pour une

fonction Gaussienne, il y a trois paramètres à ajuster : la position du maximum, la largeur à mi-hauteur (FWHM, Full Width at Half Maximum) et son amplitude. Les valeurs de ces paramètres sont déterminées de deux façons différentes selon que la Gaussienne est relative à des centres colorés ou aux ions erbium.

Pour choisir les paramètres des bandes de luminescence de l'erbium nous avons commencé par réaliser les ajustements de tous nos spectres de photoluminescence au niveau du cœur de la fibre de tous nos échantillons en laissant l'ensemble des paramètres des Gaussiennes libres : amplitude, position du maximum et largeur à mi-hauteur. La position du maximum d'une même gaussienne ainsi que sa largeur à mi-hauteur varient peu d'un spectre à l'autre. Nous avons donc choisi d'ajuster tous nos spectres au niveau du cœur avec les mêmes paramètres de Gaussienne (hormis les amplitudes qui restent les seuls paramètres libres de notre étude). Nous avons utilisé la moyenne des paramètres de l'ensemble de nos fibres vierges, irradiées gamma, aux protons et X. Le fait de considérer à la fois les échantillons vierges et irradiés se justifie par le fait que la spectroscopie des ions erbium ne semble pas être affectée par les irradiations ; cela est confirmé par le peu d'écart obtenu en laissant tous les paramètres d'ajustements libres. Les valeurs des positions des maximums et des largeurs à mi-hauteur des Gaussiennes, ainsi que les transitions de l'erbium correspondantes identifiées précédemment [Desurvire 1994], sont récapitulées dans la Table III-6.

Position du maximum (eV)	Position du maximum (nm)	FWHM (eV)	Transition
1.46	859	0.035	$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$
1.47	844	0.013	$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$
1.55	800	0.050	$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$
1.88	663	0.075	$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$
2.22	559	0.045	$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$
2.27	546	0.065	$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$
2.36	530	0.045	$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$

Table III-6 : Paramètres des Gaussiennes d'ajustement relatives aux transitions de l'erbium pour les spectres de photoluminescence du cœur de nos fibres.

On peut constater que parfois deux bandes sont attribuées à la même transition. Les niveaux d'énergie de l'ion erbium sont des multiplets constitués de sous-niveaux Stark (Figure I-3) donnant lieu à plus d'une transition entre deux multiplets. Ceci est à l'origine de l'attribution de plusieurs raies à la même transition entre deux niveaux issus du couplage spin-orbite. Il se traduit parfois par l'utilisation de plus d'une Gaussienne pour ajuster une bande luminescence.

Pour les paramètres des Gaussiennes relatives aux centres colorés liés à la matrice hôte nous sommes basés sur un ensemble de travaux antérieurs. Les valeurs de la position du maximum et de la largeur à mi-hauteur de la luminescence des défauts sont issues de la littérature.

- Girard *et al.* [Girard 2005] ont procédé à une large étude des défauts ponctuels dans des fibres optiques dont la matrice vitreuse est à base de silice. La spectroscopie de

luminescence fut la technique choisie pour réaliser ce travail. Ils ont ajusté leurs spectres de luminescence avec quatre bandes Gaussiennes dont une est centrée à 1.75 eV (710 nm) avec une largeur à mi-hauteur de 0.32 eV. Leurs échantillons étaient co-dopés germanium et phosphore. Cependant la distribution radiale des centres émettant à cette longueur d'onde n'est pas corrélée à celle du germanium ou celle du phosphore. De plus cette bande est aussi présente dans leurs échantillons de silice pure. Les auteurs attribuent cette bande à un défaut relatif à la silice. Les paramètres de ce défaut ont été utilisés pour la réalisation de nos ajustements.

- Skuja et Naber [Skuja 1996] ont montré l'existence d'un centre émettant une luminescence autour de 1.84 eV avec une largeur à mi-hauteur de 0.18 eV dans un verre GeO_2 . Cette bande serait équivalente à la bande centrée à 1.9 eV que l'on trouve dans les verres de silice pure et communément attribuée aux NBOHC [Griscom 1991]. Ce défaut consiste en un trou piégé par un atome d'oxygène ne possédant qu'une seule liaison avec un atome de silicium noté alors Si-NBOHC. Dans le cas du verre dopé au germanium, l'atome d'oxygène est relié à un atome de germanium et on note le défaut : Ge-NBOHC.
- Yahya [Yahya 2005] a observé une émission autour de 1.83 eV (FWHM : 0.2 eV) dans des échantillons de silice massive ayant subi une irradiation gamma (1.2 kGy). Cette émission est uniquement observée dans les échantillons de silice naturelle présentant une bande d'absorption à 5 eV associée à un défaut lié à des centres déficients en oxygène communément appelés ODC(II) (Oxygen Deficient Center). Cette émission est probablement due à ces défauts. Pour nos ajustements, nous avons utilisé les valeurs données par Skuja et Naber pour le deuxième défaut. Cependant, les valeurs des paramètres des Ge-NBOHC de Skuja et Naber [Skuja 1996] et des ODC(II) de Yahya [Yahya 2005] sont proches et nos fibres ne sont pas fortement dopées au germanium. Il se peut donc que la bande de luminescence attribuée aux Ge-NBOHC dans nos fibres soit en fait liée à la présence de ODC(II).
- Chan *et al.* [Chan 2003] ont observé la production des défauts NBOHC lors de l'irradiation d'un verre de silice pure par un laser pulsé femto-seconde. Ces défauts émettent une fluorescence située approximativement à 2 eV (620 nm) avec une largeur à mi-hauteur de 0.2 eV lorsqu'ils sont excités sous 488 nm.
- Chan *et al.* [Chan 2002] ont observé aussi une large bande de fluorescence centrée à 2.1 eV (590 nm), sous excitation à 488 nm, dans des verres dopés au phosphore insolés par un laser femtoseconde. Ils suggèrent que cette fluorescence serait due à des défauts POHC (Phosphorus Oxygen Hole center) créés par les impulsions laser femtoseconde. Dans leur article les auteurs ne donnent pas de valeur pour la largeur à mi-hauteur de cette bande. Pour nos ajustements, nous avons gardé libre ce paramètre et les valeurs d'ajustement optimal se trouvent dans l'intervalle 0.37 - 0.39 eV. L'attribution de cette bande de

luminescence à des POHC est discutable. En effet, Girard *et al.* [Girard 2005] ont montré que la distribution de cette luminescence n'est pas directement corrélée à la distribution du phosphore dans leurs échantillons irradiés. Des analyses supplémentaires sont nécessaires pour clarifier l'association ou non de cette bande de luminescence aux POHC.

L'ensemble des défauts utilisés est récapitulé dans la Table III-7.

Position du maximum (eV)	Position du maximum (nm)	FWHM (eV)	Défaut	Référence
1.75	709	0.32	Défaut relatif à Si	[Girard 2005]
1.84	674	0.18	Ge-NBOHC	[Skuja 1996]
2	620	0.2	Si-NBOHC	[Chan 2003]
2.1	590	0.37 - 0.39	POHC	[Chan 2002]

Table III-7 : Paramètres des Gaussiennes d'ajustement relatives aux défauts pour les spectres de photoluminescence du cœur et de la gaine de nos fibres.

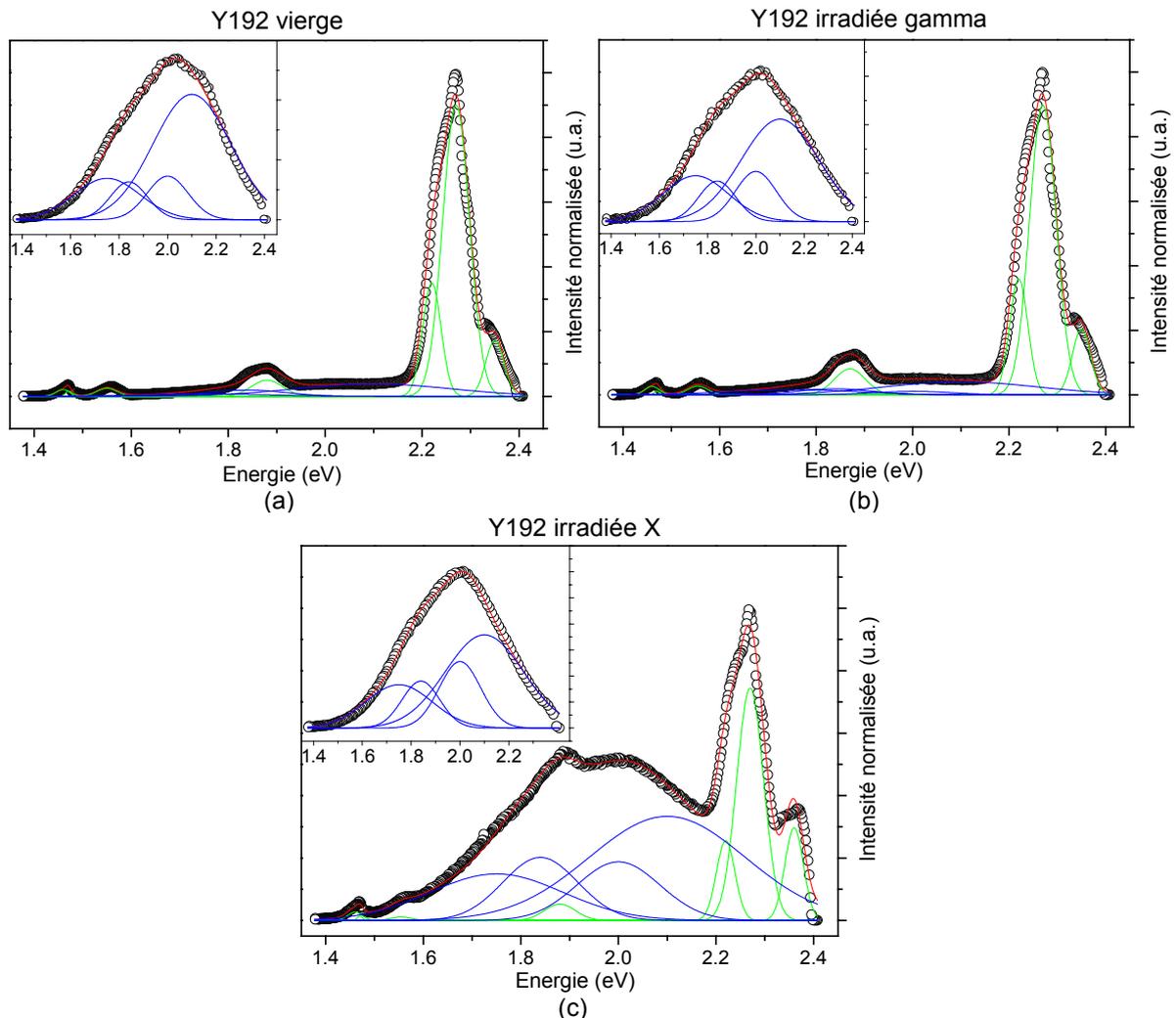


Figure III-16 : Spectres de photoluminescence normalisés au niveau du cœur (en insert spectres de la gaine) des échantillons vierge (a), irradié gamma (b) et irradié X (c) de la fibre Y192. Les spectres sont ajustés par des Gaussiennes. Les cercles représentent les données expérimentales, les lignes rouges correspondent à la somme des Gaussiennes d'ajustement, les lignes vertes sont les Gaussiennes relatives à l'erbium et les lignes bleues sont celles relatives aux défauts.

Pour l'ajustement de nos spectres nous avons fixé les valeurs de la position du maximum et la largeur à mi-hauteur de nos Gaussiennes en utilisant les valeurs précédemment citées (Table III-6 et Table III-7). Les amplitudes sont laissées libres constituant ainsi les paramètres d'ajustement de nos courbes. Les courbes ainsi ajustées sont données en Figure III-16 pour la fibre Y192 et en Figure III-17 pour la fibre D#3.

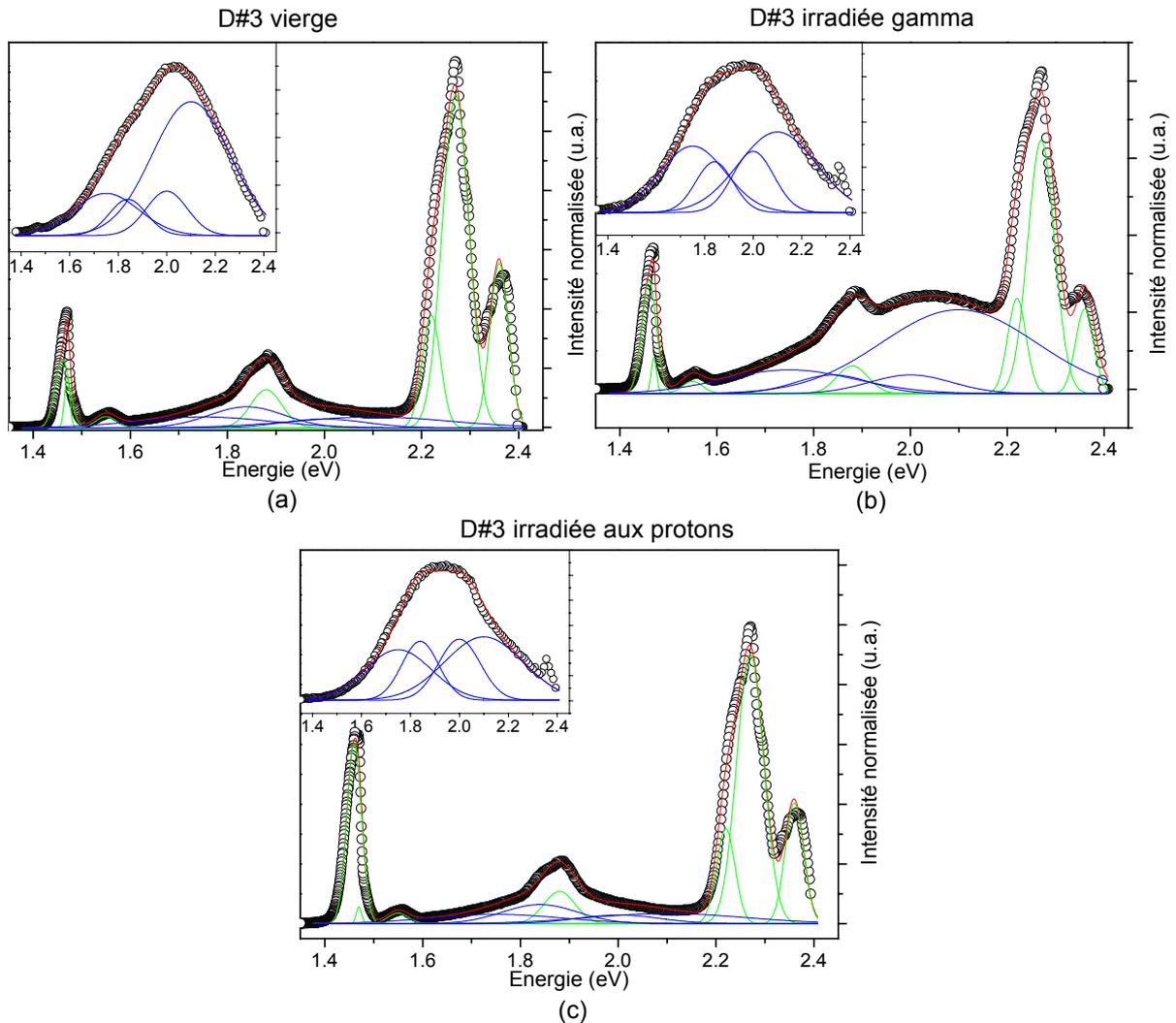


Figure III-17 : Spectres de photoluminescence normalisés au niveau du cœur (en insert spectres de la gaine) des échantillons vierge (a), irradié gamma (b) et irradié aux protons (c) de la fibre D#3. Les spectres sont ajustés par des Gaussiennes. Les cercles représentent les données, les lignes rouges correspondent à la somme des Gaussiennes d'ajustement, les lignes vertes sont les Gaussiennes relatives à l'erbium et les lignes bleues sont celles relatives aux défauts.

Pour les spectres de cœur, nous avons pu ajuster toutes nos courbes avec les sept Gaussiennes relatives à l'erbium et les quatre bandes de luminescence liées aux défauts décrits ci-dessus. La contribution de certains centres émetteurs est parfois pratiquement nulle. Tous les spectres de gaine ont pu être ajustés avec les quatre mêmes bandes de luminescence de défauts même si l'attribution définitive de certaines bandes n'est pas arrêtée. De manière générale le suivi de l'évolution des amplitudes des quatre bandes utilisées montre une augmentation de la concentration des défauts lors de l'irradiation.

Les défauts identifiés dans la matrice hôte ne sont pas directement liés à l'aluminium. Pourtant nous avons remarqué que sa présence joue un rôle important dans les pertes induites des fibres dopées erbium sous irradiation (cf. III.1.1.A). Cela s'explique par le fait que l'aluminium est un modificateur de réseau. Son incorporation conduit à la modification de la nature des liaisons qui initialement sont essentiellement covalentes. Il est ainsi à l'origine de la formation de centres précurseurs de défauts qui conduisent sous irradiation à la rupture de liaisons entre atomes et la formation de centres colorés responsables de l'atténuation induite.

III.2.1.B. Luminescence dans le domaine du proche infrarouge

Les spectres de luminescence dans le domaine du proche infrarouge ont été réalisés moyennant le dispositif décrit dans le paragraphe II.3.1.B. Ce dispositif expérimental permet de passer de la configuration permettant l'acquisition des spectres dans la configuration contra-propagative à celle en co-propagatif sans changer l'injection du laser Titane-Saphir (830 nm) dans la fibre sous test. La Figure III-18 présente les mesures normalisées de la luminescence autour de 1530 nm des échantillons vierges, irradiés gamma et aux protons de la fibre D#1, dans les deux configurations. Les longueurs des échantillons utilisés ainsi que les doses reçues par les échantillons irradiés sont données dans la Table III-8.

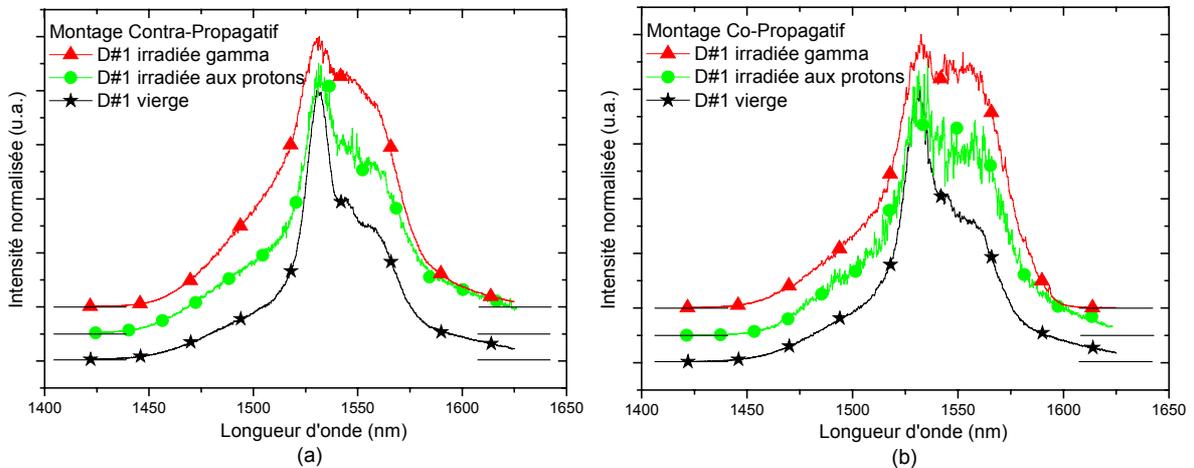


Figure III-18 : Spectres de luminescence normalisés, sur la raie la plus intense (1530 nm), des échantillons vierges, irradiés gamma et aux protons de la fibre D#1 dans le domaine de l'infrarouge enregistrés avec le montage contra-propagatif (a) et le montage co-propagatif (b). Les échantillons sont excités avec un laser Titane-Saphir émettant à 830 nm.

	Longueur de l'échantillon (m)	Dose reçue par l'échantillon (Gy)
D#1 vierge	2	0
D#1 irradiée proton	1	590
D#1 irradiée gamma	2.5	1000

Table III-8 : Récapitulatif des longueurs et des doses reçues des échantillons utilisés pour les mesures de luminescence dans le proche infrarouge.

Les spectres acquis ont été normalisés vers 1530 nm car leurs intensités ne sont pas directement comparables. En effet, la quantité de lumière vue par le PM dépend des réglages de sortie de la fibre dans l'entrée du spectromètre, ces réglages sont refaits à chaque fois que l'on change d'échantillon ou de configuration de montage et ne sont donc pas identiques à chaque reprise.

Dans nos conditions expérimentales (longueurs de fibres et puissance d'excitation), les spectres réalisés en contra- et co-propagatif présentent de très faibles différences. Ceci nous permet de négliger la ré-absorption le long de la fibre dans ce domaine spectral (1425-1625 nm).

Si l'on compare les intensités relatives des raies à 1530 nm et à 1550 nm, on s'aperçoit que le ratio $I(1530 \text{ nm}) / I(1550 \text{ nm})$ est réduit pour les échantillons irradiés comparé aux vierges (voir Table III-9). Ces changements dans les propriétés spectroscopiques des ions Er^{3+} pourraient avoir deux origines qui seront discutées plus loin :

- des interactions entre les ions erbium et les défauts générés par les radiations, et optiquement actifs dans ce domaine spectral, [Nagasawa 1984, Régnier 2007]
- des changements dans le champ cristallin consistant en des modifications des sous-niveaux Stark [Curie 1968, Pacheco 1978].

	Montage	Ratio $I(1530 \text{ nm}) / I(1550 \text{ nm})$
D#1 vierge	Contra-propagatif	1.932
	Co-propagatif	1.876
D#1 irradiée proton	Contra-propagatif	1.482
	Co-propagatif	1.491
D#1 irradiée gamma	Contra-propagatif	1.217
	Co-propagatif	1.198

Table III-9 : Ratios des intensités relatives entre les pics à 1530 nm et à 1550 nm des spectres de luminescence des échantillons irradiés ou non de la fibre D#1.

III.2.2. Mesure de durée de vie

Afin de compléter les mesures spectroscopiques et suivre l'évolution de l'environnement des ions erbium nous avons procédé à la mesure et au suivi de l'évolution de la durée de vie de l'erbium dans son état excité $^4I_{13/2}$. La mesure de la durée de vie de la luminescence a été effectuée à l'aide du dispositif décrit dans le paragraphe II.3.2. Lorsqu'on excite les fibres dopées erbium à 830 nm, la luminescence générée s'étend d'environ 1520 nm à 1575 nm. Nous avons choisi d'effectuer les mesures de durée de vie pour trois longueurs d'onde différentes dans ce domaine spectral (1530 nm, 1555 nm et 1575 nm) moyennant les montages contra- et co-propagatif. La Figure III-19 donne un exemple de courbe de déclin que l'on obtient pour ce genre de mesures, les symboles noirs correspondent aux données expérimentales et la ligne continue à l'ajustement de ces données par une

loi exponentielle. Le déclin présenté sur cette figure est celui de la fibre D#1 irradiée gamma de 3.40 m de longueur mesurée à 1530 nm avec le montage co-propagatif. Toutes les mesures faites sur les échantillons vierges et irradiés gamma, de la fibre D#1, ont été ajustées et les constantes de temps τ ainsi calculées sont répertoriées dans la Table III-10. Les durées de vie obtenues sur nos échantillons sont de l'ordre de la dizaine de ms, ce qui est en accord avec la littérature [Berker 1999].

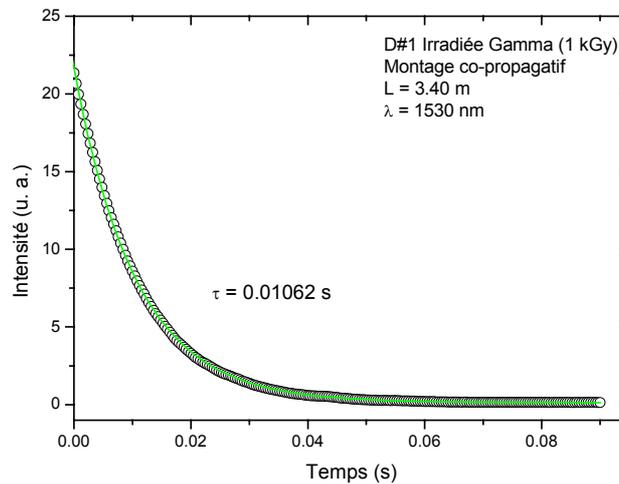


Figure III-19 : Déclin de l'émission à 1530 nm de l'échantillon de la fibre D#1 d'une longueur de 3.4 m et irradié gamma sous excitation à 850 nm avec le montage co-propagatif, en noir les données expérimentales et en rouge l'ajustement par une loi exponentielle

Montage	Longueur d'onde	D#1 vierge 2 m	D#1 irradiée gamma 3.40 m
Contra-propagatif	1530 nm	10.3	9.2
	1555 nm	10.4	8.9
	1575 nm	10.1	8.5
Co-propagatif	1530 nm	10.7	10.6
	1555 nm	10.6	10.3
	1575 nm	10.1	9.6

Table III-10 : Constantes de temps τ en milliseconde du déclin à 1530, 1555 et 1575 nm de la fibre D#1 vierge et irradiée gamma

De manière générale, on observe que l'irradiation conduit à la diminution de la durée de vie et ce aussi bien pour la configuration co- que contra-propagative. La durée de vie mesurée moyennant cette dernière configuration est moins affectée par les transferts d'énergie lors du guidage et reflète de ce fait mieux l'environnement immédiat de l'ion erbium. La diminution de la durée de vie observée dans ce cas et pour l'ensemble des trois longueurs d'onde étudiées reflète donc la création de nouveaux canaux de désexcitation de l'ion erbium. On constate aussi que les plus grandes longueurs d'onde sont plus affectées par l'irradiation. Cette observation laisse à penser que l'interaction, autrement dit le transfert d'énergie, est plus efficace de l'erbium vers les centres colorés pour les transitions de plus basses énergies. Un tel comportement pourrait s'expliquer par la présence de défauts P1 qui résultent de la transformation post-irradiation des défauts POHC créés par irradiation

gamma dans les fibres dopées au phosphore [Griscom 1983]. En effet ces défauts P1 présentent une bande d'absorption centrée autour de 1620 nm [Griscom 1983, Régnier 2007] et ce qui fait que le recouvrement de cette bande est plus important avec les composantes des plus basses énergies de la transition ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ de l'erbium.

III.2.3. Mesure d'absorption

Les mesures de spectres d'absorption réalisées sur nos échantillons ont été faites selon la méthode de « cut-back » [Marcuse 1981] décrite dans le paragraphe II.3.3. Les spectres ont été acquis dans le domaine du proche infrarouge entre 1300 et 1650 nm. La Figure III-20 présente les spectres d'absorption de deux échantillons de la fibre Draka D#1, l'un est resté vierge et le second après irradiation sous faisceau de protons d'énergie 105 MeV.

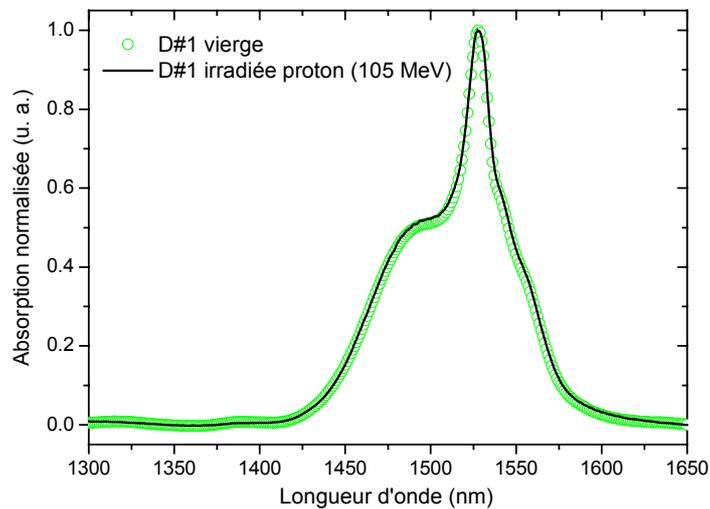


Figure III-20 : Spectres d'absorption dans le domaine du proche IR des échantillons vierge et irradié proton à 105 MeV de la fibre Draka D#1

Nous pouvons constater que les deux courbes sont très similaires, cela signifie que l'irradiation ne modifie pas l'absorption de l'ion erbium dans ce domaine spectral. Cette observation va une fois de plus dans le sens des remarques faites précédemment, autrement dit les ions erbium ne sont pas affectés directement par les irradiations et que les changements observés dans le spectre d'émission de ces derniers sont dus à la création de centres colorés dans la matrice hôte. Ces centres sont responsables de la dégradation par absorption de signal émis par les ions erbium. L'ensemble de ces observations nous mène donc à privilégier, parmi les deux hypothèses évoquées plus haut au paragraphe III.2.1.B, pour rendre compte des changements des propriétés spectroscopiques de l'erbium, l'interaction avec les défauts optiquement actifs créés lors de l'irradiation au détriment d'un changement du champ cristallin entraînant la modification des sous-niveaux Stark. Cette dernière hypothèse, si elle était vérifiée, ne manquerait certainement pas de modifier le spectre d'absorption de l'échantillon irradié ce qui est loin d'être le cas pour nos fibres.

III.3. Résumé

De manière générale, les pertes induites par irradiation, quelque soit sa nature (gamma, X ou protons), sont plus importantes pour les plus faibles longueurs d'onde. Elles décroissent quand augmente la longueur d'onde dans le domaine spectral étudié (600 nm – 1800 nm). Sous irradiation gamma et sous irradiation aux protons, les pertes induites augmentent avec la dose totale en suivant une loi d'exponentielle de saturation (Eq.III-1) qui traduit le fait que les défauts ne sont pas créés de manière aléatoire dans la matrice hôte mais résultent de la transformation de centres précurseurs dont la suppression éventuelle permet le durcissement de la fibre. Après l'arrêt de l'irradiation, nous observons une guérison des fibres qui reste faible dans le domaine spectral étudié. Nous avons également observé que la concentration en erbium n'a pas d'influence sur les valeurs de pertes induites dans les fibres. En dehors de la non-observation de corrélation entre la variation de concentration et les pertes induites, cette conclusion est étayée par les résultats de la spectroscopie de l'ion erbium lui-même dont l'environnement immédiat, le champ cristallin, n'est pas affecté par l'irradiation. A l'inverse de l'erbium, l'aluminium joue un rôle important dans la dégradation des performances des fibres dopées erbium. Les pertes induites sont nettement plus faibles lorsque la concentration en Al reste très petite. Par ailleurs, sous irradiation aux protons, l'énergie des protons n'a que très peu d'influence sur la réponse des fibres. De plus, nous avons montré que les effets des irradiations aux protons peuvent être simulés par des irradiations gamma qui sont plus simples à mettre en œuvre.

Lors des tests sous irradiations pulsées, les pertes transitoires ont montré un effet de saturation. Cette saturation pourrait être expliquée, au moins en partie, par la transformation des centres responsables de la composante transitoire de l'atténuation induite. Si cette hypothèse est confirmée, ce phénomène pourrait être exploité pour durcir par pré-irradiation les fibres destinées à être utilisées dans un environnement radiatif pulsé.

Dans le domaine visible nous avons observé aussi bien pour le cœur de la fibre que pour la gaine plusieurs bandes de luminescence attribuées à différents défauts (NBOHC, POHC). La présence de ces défauts en très faible concentration est antérieure à l'irradiation. Cette dernière ne fait qu'accentuer leur présence aussi bien dans le cœur que dans la gaine indépendamment de la concentration d'erbium confirmant la non-participation de ce dernier aux pertes induites. La modification de la spectroscopie de ce dernier dans le visible serait donc comme dans l'infrarouge due à l'interaction avec des défauts et non à la modification de ses niveaux d'énergie.