

Amplificateur optique à fibre dopée erbium sous irradiation gamma

V.1. CALCULS DU GAIN ET DU FACTEUR DE BRUIT D'UN AMPLIFICATEUR OPTIQUE	111
V.1.1. Calcul du gain.....	111
V.1.2. Calcul du facteur de bruit.....	112
V.2. PARAMÈTRES POUR LES CAMPAGNES D'IRRADIATION GAMMA DES AMPLIFICATEURS OPTIQUES À FIBRES DOPÉES ERBIUM	113
V.3. MESURES DU GAIN ET DU FACTEUR DE BRUIT DES EDFAS SOUS IRRADIATION GAMMA	115
V.3.1. Evolution du gain et du facteur de bruit des EDFAs sous irradiation gamma	115
V.3.2. Influence de la composition des fibres optiques des EDFAs sous irradiation gamma .	123
V.3.3. Influence de la puissance de pompe des EDFAs sous irradiation gamma	125
V.4. RÉSUMÉ.....	129

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié le comportement de différentes fibres optiques dopées erbium sous divers environnements radiatifs. Ces fibres optiques ne sont pas utilisées seules, elles font partie de systèmes plus complets, tels que par exemple les amplificateurs optiques. Comme nous l'avons déjà mentionné dans le paragraphe I.3, l'étude des EDFAs sous irradiation a déjà fait l'objet de plusieurs études. La sensibilité d'un EDFA en fonction du choix de la longueur d'onde de pompe a été testée par Simpson *et al.* [Simpson 1993]. L'influence du débit de dose et de la dose totale reçue par les fibres optiques dopées erbium sur le fonctionnement des EDFAs a été testée par Taylor *et al.* [Taylor 1998]. Ils ont également noté que, sous irradiation, l'élément le plus sensible du bloc gain d'un EDFA (le bloc gain comprend les isolateurs optiques, les coupleurs et la fibre dopée erbium) est la fibre optique dopée erbium. Par la suite, cette observation a été confirmée par Bussjager *et al.* [Bussjager 2001] et Caussanel [Caussanel 2004]. Pour notre étude, nous avons choisi d'irradier seulement les fibres optiques dopées erbium de nos amplificateurs optiques, les autres éléments les constituants (diode laser de pompage, coupleurs, ...) ont été déportés hors de la zone d'irradiation.

Nous détaillerons tout d'abord les calculs du gain et du facteur de bruit à partir des données expérimentales. Ensuite nous donnerons les paramètres des fibres et d'irradiation que nous avons choisis pour tester différents EDFAs fabriqués avec les fibres dopées erbium précédemment étudiées dans cette thèse. Finalement, nous exposerons les résultats obtenus lors des deux campagnes d'irradiation que nous avons effectuées.

V.1. Calculs du gain et du facteur de bruit d'un amplificateur optique

V.1.1. Calcul du gain

Le gain G d'un amplificateur correspond au rapport entre la puissance du signal en sortie P_s et la puissance du signal en entrée P_e [Becker 1999]:

$$G(\lambda) = \frac{P_s(\lambda)}{P_e(\lambda)} \quad (\text{Eq.V-1})$$

Le gain peut également être exprimé directement en dB si les mesures de puissance de P_s et P_e sont exprimées en dBm. Dans ce cas, $G(\lambda)_{(\text{dB})}$ n'est autre que :

$$G(\lambda)_{(\text{dB})} = P_s(\lambda)_{(\text{dBm})} - P_e(\lambda)_{(\text{dBm})} \quad (\text{Eq.V-2})$$

Les mesures de P_s et de P_e sont acquises à la longueur d'onde du signal, comme cela est schématisé sur la Figure V-1. Si l'on souhaite calculer le gain sur toute une bande spectrale, on réitère le calcul pour différentes longueurs d'onde.

La mesure du gain est une mesure relative et les incertitudes de mesure sur les puissances d'entrée et de sortie affectent la mesure du gain de la même manière et nous avons estimé que le gain est calculé avec une erreur n'excédant pas ± 0.5 dB.

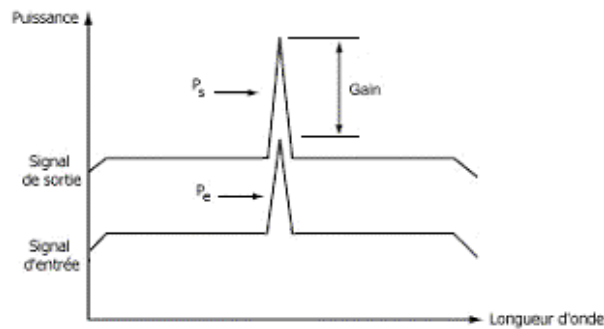


Figure V-1 : Mesures spectrales de la puissance pour le calcul du gain d'un EDFA

V.1.2. Calcul du facteur de bruit

Le bruit dans un amplificateur optique correspond aux photons créés dans l'amplificateur et qui ne correspondent pas au signal à amplifier. En effet les niveaux de puissance mesurés en sortie et en entrée de l'EDFA sont en fait la somme de la puissance du signal et de la puissance d'une partie de l'émission spontanée de la source (ES). Idéalement, un EDFA amplifie le signal d'entrée et ne produit pas de signal additionnel. Cependant, l'EDFA produit une émission spontanée amplifiée (ESA) et celle-ci s'ajoute à celle produite par la source (ES). Cette émission spontanée amplifiée correspond donc au bruit dans l'amplificateur.

Comme le spectre de sortie (cf. Figure V-2) contient à la fois l'émission spontanée de la source (ES) et celle de l'amplificateur (ESA), cette dernière ne peut pas être directement déterminée.

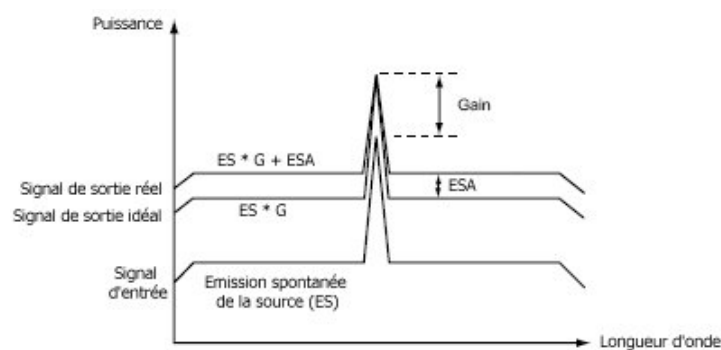


Figure V-2 : Spectres d'entrée et de sortie d'un EDFA montrant les niveaux d'émission spontanée et de signal

Pour le calcul du facteur de bruit d'un EDFA, il est nécessaire de connaître le niveau d'ESA généré par l'amplificateur, il est calculé comme la différence entre la puissance d'émission spontanée en sortie et la puissance équivalente d'émission spontanée de la source amplifiée par l'EDFA :

$$ESA_{EDFA} = ESA_{sortie} - ES_{source} \times G \quad (Eq.V-3)$$

Pour calculer correctement le facteur de bruit, l'ESA doit être déterminée à la longueur d'onde du signal. Elle ne peut pas être mesurée directement puisque le niveau de puissance du signal masque le niveau d'ESA à cette longueur d'onde. Pour déterminer l'ESA à la longueur d'onde du signal, l'ESA est mesurée juste avant et juste après le signal (typiquement 1 nm), et par interpolation linéaire on calcule l'ESA à la longueur d'onde du signal.

Le facteur de bruit FB est calculé moyennant la formule suivante [Becker 1999]:

$$FB = \frac{ESA_{EDFA}}{h \cdot \nu \cdot G \cdot B_w} + \frac{1}{G} \quad (Eq.V-4)$$

où ESA_{EDFA} est l'émission spontanée amplifiée de l'EDFA, h la constante de Planck, $\nu = c/\lambda$ est la fréquence en Hz du signal avec c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde du signal, B_w la bande passante de l'analyseur de spectre optique exprimé en Hz et G le gain de l'amplificateur préalablement calculé. Nous avons également estimé l'erreur commise sur le calcul du facteur de bruit et ce dernier est évalué avec une erreur n'excédant pas ± 1 dB.

V.2. Paramètres pour les campagnes d'irradiation gamma des amplificateurs optiques à fibres dopées erbium

Nous avons procédé à l'irradiation de huit amplificateurs optiques à fibres dopées erbium répartis en deux campagnes. Quatre amplificateurs ont été testés en même temps dans chaque campagne.

Le dispositif expérimental utilisé pour l'irradiation simultanée de quatre EDFAs est celui décrit dans le paragraphe II.2.4. Comme nous l'avons déjà signalé, seules les fibres dopées erbium sont placées dans le faisceau de rayons gamma.

Nous avons choisi d'irradier nos EDFAs avec le débit de dose utilisé lors des irradiations gamma passives de nos fibres dopées erbium : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$. Le temps d'exposition a été conditionné par les réponses des fibres utilisées au regard de la dynamique des appareils de mesure. Pour la première campagne, les fibres ont été exposées aux rayons gamma pendant 17 h et 28 minutes. Lors de la deuxième campagne, le temps d'irradiation a été de 17 h et 32 minutes. Les fibres ont donc reçu dans les deux cas une dose totale d'environ 790 Gy. Toutes les mesures ont été faites à une température de 50°C . Celle-ci est imposée par la source de ^{60}Co que nous avons utilisée. Nous ne pouvions pas descendre en température avec cette source. C'est pour cette raison que les irradiations ont été réalisées à cette même température de 50°C , stabilisée et contrôlée afin de ne pas avoir d'effet dû à sa variation.

Les amplificateurs sont pompés avec des diodes laser émettant à 980nm. Le gain d'un amplificateur optique dépend de la longueur et de la concentration en ion erbium de la fibre dopée erbium qui le constitue. Pour la première campagne d'irradiation, nous avons choisi quatre fibres

parmi celles que nous avons à notre disposition : trois avec un co-dopage erbium/aluminium classique (D#1, D#2, D#3) et une avec très peu d'aluminium (D#5). Lors de la seconde campagne d'irradiation, nous avons focalisé notre étude sur les fibres D#1 (avec 10%wt d'aluminium) et D#7 (avec très peu d'aluminium). Les fibres D#1, D#2 et D#3 présentent une concentration en erbium assez proche (la concentration en erbium de D#2 est légèrement plus faible que celles de D#1 et D#3) et nous avons utilisé la même longueur pour les trois fibres fixée à 10 m. Les fibres D#5 et D#7 ont une concentration en erbium plus faible que les trois autres, nous avons alors utilisé 12 m de ces fibres pour fabriquer les EDFAs. Les spectres de gain de ces différentes fibres avant irradiation sont donnés en Figure V-3 avec la valeur de la puissance de pompe utilisée à chaque fois.

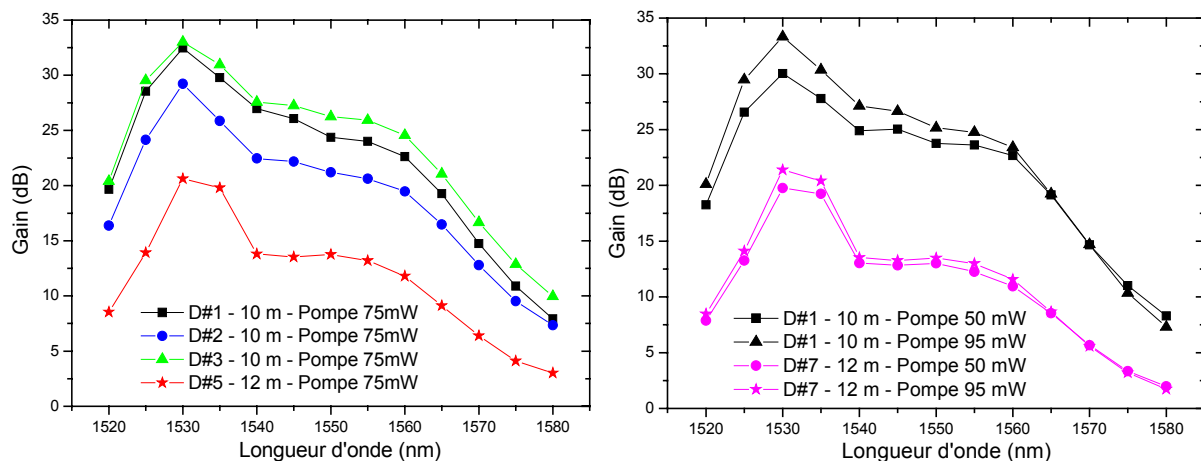


Figure V-3 : Gain en fonction de la longueur d'onde des fibres D#1, D#2, D#3, D#5 et D#7 avant irradiation pour différentes puissances de pompe

Malgré une longueur plus grande pour les amplificateurs composés avec les fibres D#5 et D#7, leur gain maximum est de l'ordre de la vingtaine de dB, tandis que les autres amplificateurs dépassent la trentaine de dB. Nous avons gardé ces conditions car nous ne disposons pas de longueurs plus importantes pour la fibre D#5 et nous tenions à garder un gain assez grand pour les autres fibres. En effet, comme montré précédemment au chapitre III, les fibres à forte concentration d'aluminium (D#1, D#2, D#3) présentent des pertes induites supérieures à celles avec une faible concentration en aluminium (D#5, D#7).

Lors de la première campagne, nous conservons la même puissance de pompe afin de pointer l'influence des co-dopants des fibres dopées erbium. Dans la seconde campagne, nous avons utilisé uniquement les fibres D#1 et D#7 car elles présentent des comportements typiques des deux types de fibres utilisées lors des campagnes d'irradiation (avec ou presque sans aluminium). Nous avons étudié les effets de deux puissances de pompage optiques différentes. Tous les paramètres d'irradiation ainsi que ceux des fibres dopées erbium sont récapitulés dans la Table V-1.

	D#1	D#2	D#3	D#5	D#7	
Longueur de fibre	10 m	10 m	10 m	12 m	12 m	
Concentration en Al	≈10 wt %	≈8 wt %	≈7 wt %	≈0.3 wt%	≈0.3 wt %	
Dopage en Er	288 ppm	240 ppm	288 ppm	138 ppm	141 ppm	
Gain à 1530 nm avant irradiation	De 30 à 33.3 dB en fonction de la puissance de pompe		29,2 dB	33 dB	20.6 dB	De 20.7 à 21.4 dB en fonction de la puissance de pompe
Longueur d'onde de pompe	980 nm	980 nm	980 nm	980 nm	980 nm	
Puissance de pompe utilisée	50 mW 75 mW 95 mW	75 mW	75 mW	75 mW	50 mW 95 mW	
Débit de dose	45 Gy·h ⁻¹	45 Gy·h ⁻¹	45 Gy·h ⁻¹	45 Gy·h ⁻¹	45 Gy·h ⁻¹	
Dose totale	790 Gy	790 Gy	790 Gy	790 Gy	790 Gy	
Température d'irradiation	50°C	50°C	50°C	50°C	50°C	

Table V-1 : Paramètres des fibres dopées erbium et paramètres d'irradiation pour les campagnes d'irradiation gamma des amplificateurs

Par la suite, les amplificateurs constitués des fibres D#1, D#2, D#3, D#5 et D#7 seront nommés par D1, D2, D3, D5 et D7 respectivement.

V.3. Mesures du gain et du facteur de bruit des EDFAs sous irradiation gamma

V.3.1. Evolution du gain et du facteur de bruit des EDFAs sous irradiation gamma

Les quatre amplificateurs testés lors de la première campagne d'irradiation gamma sont composés des fibres D#1, D#2, D#3 et D#5 et ils ont été étudiés avec une puissance de pompage optique de 75 mW ($\lambda_{\text{pompe}} = 980 \text{ nm}$).

L'étude des fibres D#1 et D#5, représentatives des deux catégories de fibre testée ici (avec ou presque sans aluminium), met notamment en exergue l'influence de l'aluminium sous irradiation. Les mesures du gain et du facteur de bruit de ces deux fibres en fonction de la longueur d'onde lors de l'irradiation sont illustrées en Figure V-4 pour l'amplificateur D1 et en Figure V-5 pour l'amplificateur D5. Les mesures ont été enregistrées toutes les 12 minutes et nous ne présentons dans les figures que les mesures faites toutes les heures afin qu'elles restent lisibles.

Pour l'ensemble les amplificateurs, nous constatons que le gain diminue et que le facteur de bruit augmente au cours de l'irradiation. Ceci met en évidence une baisse des performances des

amplificateurs optiques sous irradiation. Les amplificateurs utilisant une fibre à fort dopage en aluminium (D#1, D#2, D#3) présentent une importante dégradation aussi bien du gain que du facteur de bruit. Dans ces amplificateurs D1, D2 et D3, nous pouvons constater que les pertes sont plus importantes aux courtes longueurs d'onde ($1520 \text{ nm} < \lambda < 1540 \text{ nm}$) comparées aux grandes longueurs d'onde ($1540 \text{ nm} < \lambda < 1580 \text{ nm}$). Nous avons déjà noté ce comportement lors des irradiations des fibres dopées erbium seules (§ III.1.1.A). Il est donc logique de retrouver ce comportement pour les amplificateurs optiques sous irradiation. Pour l'amplificateur D5, aussi bien les pertes du gain que du facteur de bruit restent très faibles. Contrairement aux autres amplificateurs, les pertes du gain de celui-ci ne varient pas avec la longueur d'onde ; toutes les longueurs d'onde sont dégradées de la même quantité. Sur la Figure V-5.b il n'est pas évident de suivre l'évolution du facteur de bruit en fonction de la longueur d'onde.

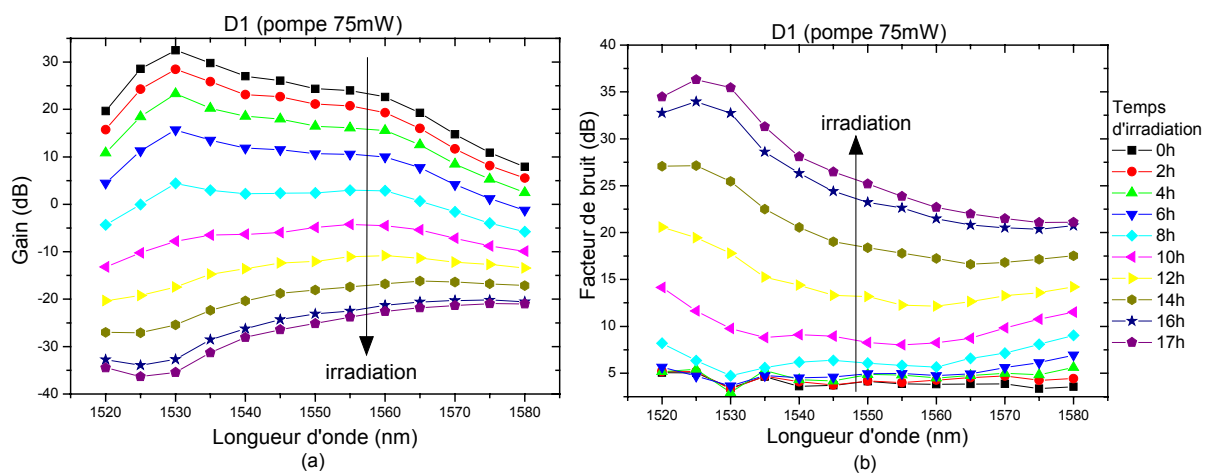


Figure V-4 : Evolution en fonction de la longueur d'onde du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D1 à différents temps d'irradiation

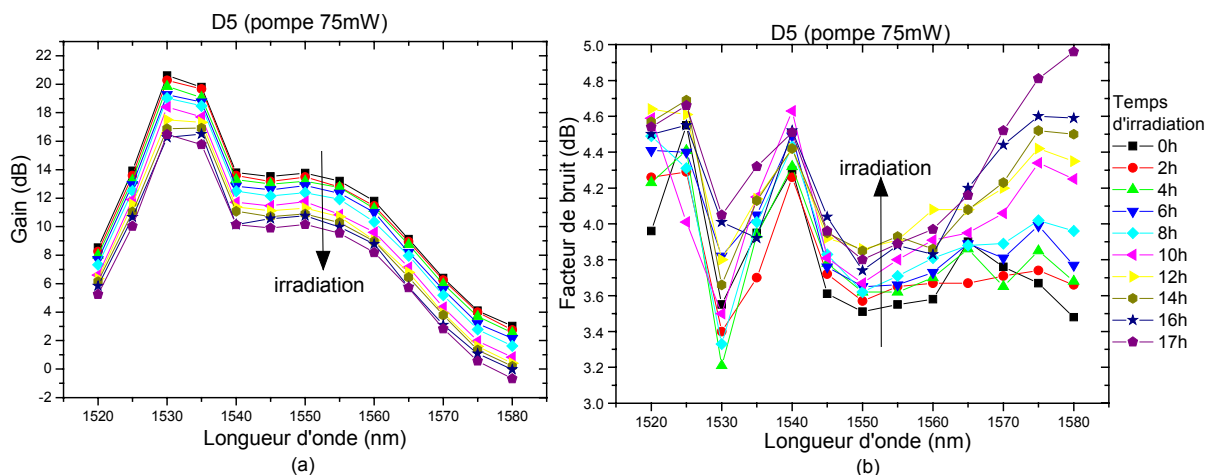


Figure V-5 : Evolution en fonction de la longueur d'onde du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D5 à différents temps d'irradiation

En analysant la Figure V-4, on constate que le gain d'amplificateur D1 vaut 0 dB au bout d'environ 8 heures d'irradiations, ce qui correspond à une dose de 360 Gy. Le débit de dose pour une mission spatiale est d'environ $200 \text{ Gy}\cdot\text{an}^{-1}$, un tel amplificateur resterait donc opérationnel environ 1.5 an. L'amplificateur D5 atteint un gain de 0 dB pour la plus grande longueur d'onde testée

(1580 nm) en fin d'irradiation (cf. Figure V-5), soit pour une dose d'environ 800 Gy, ce qui correspond à 4 ans en environnement spatial. Aux longueurs d'onde plus basses l'amplificateur D5 resterait opérationnel plus longtemps.

Afin de comparer plus facilement les pertes aux différentes longueurs d'onde, nous présentons en Figure V-6 et en Figure V-7 pour les amplificateurs D1 et D5 respectivement leurs évolutions temporelles pendant et après les irradiations.

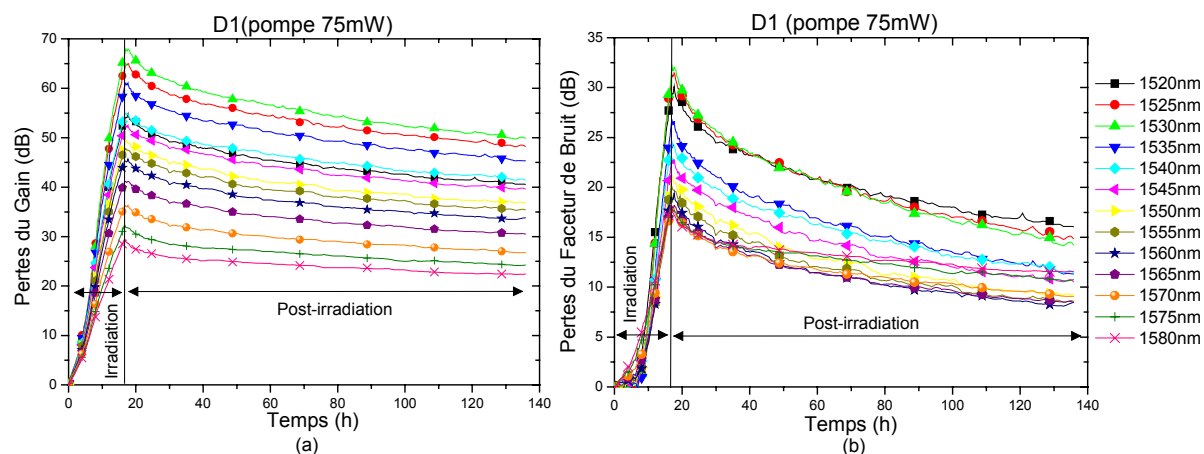


Figure V-6 : Evolution temporelle des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D1 pour chaque longueur d'onde mesurée

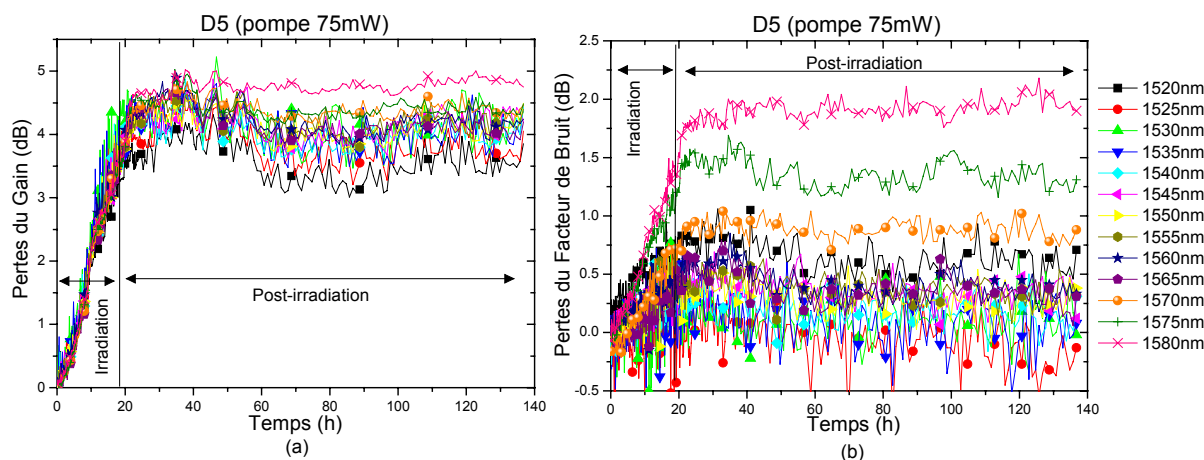


Figure V-7 : Evolution temporelle des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D5 pour chaque longueur d'onde mesurée

Sur la Figure V-6, nous observons clairement, comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, que les pertes les plus importantes du gain et du facteur de bruit sont aux courtes longueurs d'onde. Le maximum des pertes est atteint à 1530 nm. Cette longueur d'onde correspond aussi au maximum de la luminescence de l'erbium dans l'infrarouge. Les mêmes observations peuvent être faites pour les amplificateurs D2 et D3. La Figure V-7, montre que les pertes induites du gain sont pratiquement les mêmes quelque soit la longueur d'onde. En ce qui concerne les pertes induites du facteur de bruit de l'amplificateur D5, elles sont légèrement plus importantes pour les plus grandes longueurs d'onde, mais restent inférieures à 2 dB pour une dose totale de 790 Gy.

Lors d'une campagne antérieure, nous avons irradié les fibres D#1, D#2 et D#3 en les pompant à différentes puissances avec une diode laser émettant à 980 nm (cf. § III.1.1.B). En Figure V-8 est tracée, sous pompage à 85mW la dégradation du signal de luminescence à 1530 nm de la fibre D#2 en fonction de la dose reçue pendant l'irradiation et en fonction du temps après l'arrêt de l'irradiation. La Figure V-9, présente l'évolution du gain à 1530 nm de l'amplificateur D2 en fonction de la dose reçue pendant l'irradiation et en fonction des mêmes paramètres. Nous avons ajusté les données expérimentales en utilisant les mêmes équations que dans le chapitre III (cf. § III.1.1.A) ; l'équation III-1 pour les pertes induites pendant l'irradiation et l'équation III-2 pour les pertes induites lors de la guérison des fibres.

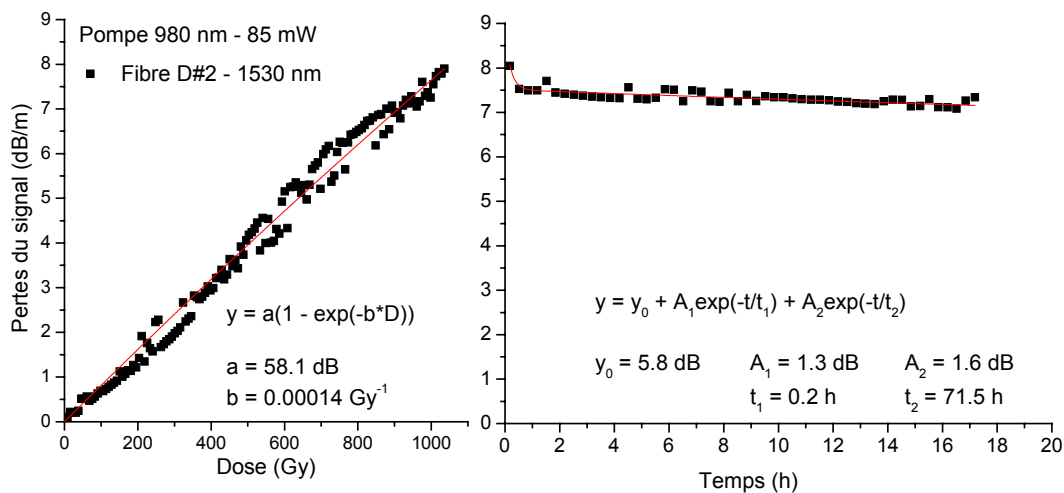


Figure V-8 : Evolution temporelle des pertes induites à 1530 nm de la fibre D#2 en fonction de la dose pendant l'irradiation et en fonction du temps après l'irradiation (Débit de dose : 45 Gy·h⁻¹). Les carrés noirs correspondent aux données expérimentales et les lignes rouges aux ajustements des données.

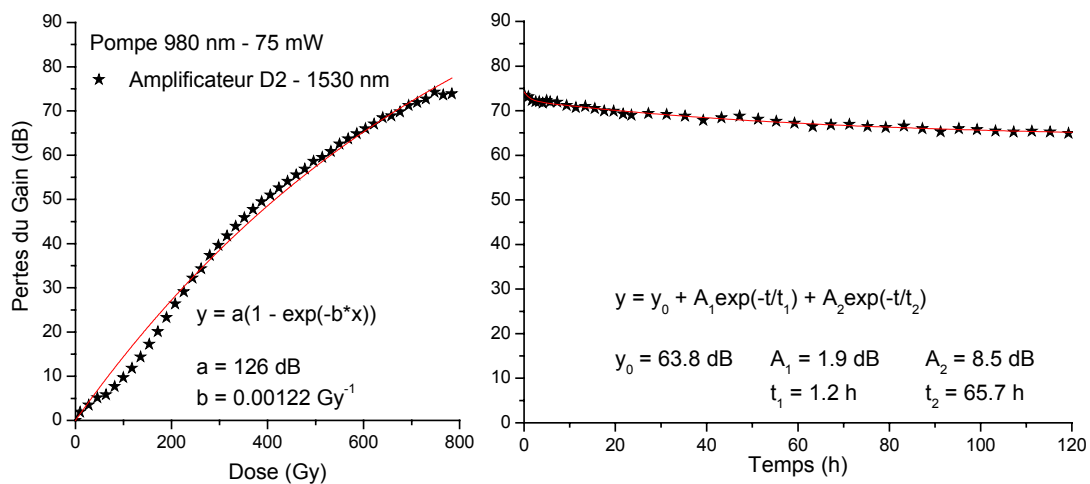


Figure V-9 : Evolution temporelle des pertes induites à 1530 nm de l'amplificateur D2 en fonction de la dose pendant l'irradiation et en fonction du temps après l'irradiation (Débit de dose : 45 Gy·h⁻¹). Les étoiles noires correspondent aux données expérimentales et les lignes rouges aux ajustements des données.

Si nous comparons les courbes de guérison entre la fibre et l'amplificateur correspondant, nous constatons une similitude de comportement. Elles sont ajustées au moyen d'une somme de deux exponentielles décroissantes (équation III-2), comme le propose Williams *et al.* [Williams 1992] ainsi

que Fukuda *et al.* [Fukuda 1994]. Dans les deux cas, nous obtenons des valeurs pour les paramètres t_1 et t_2 du même ordre de grandeur ($t_1 \approx 1$ h et $t_2 \approx 70$ h), ce qui laisse à penser que les défauts mis en jeu dans la dégradation des performances de l'amplificateur et dans l'augmentation des pertes induites de la fibre sont de même nature.

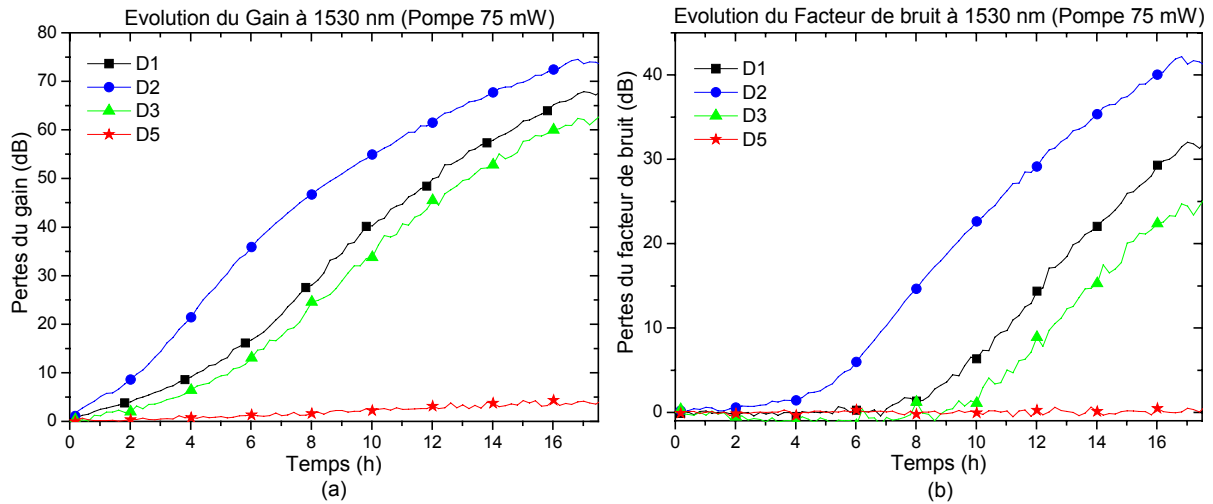


Figure V-10 : Evolution des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) des quatre amplificateurs D1, D2, D3 et D5 pendant l'irradiation (débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

En revanche la croissance des pertes sous irradiation de l'amplificateur est légèrement différente de celle de la fibre. De manière générale, l'augmentation des pertes de la luminescence des fibres dopées erbium s'ajuste bien avec une exponentielle de saturation (équation III-1) comme proposé par Williams *et al.* [Williams 1992]. Nous avons également essayé d'ajuster l'augmentation des pertes de gain des amplificateurs moyennant cette même équation. Les ajustements restent non satisfaisants. Les taux de croissance des pertes, aussi bien pour le gain que pour le facteur de bruit, présentent une différence importante entre les premières heures d'irradiation et la suite (Figure V-10). Cette forme de courbe (croissance lente au début puis plus rapide ensuite) a déjà été relevée par M. Caussanel [Caussanel 2004] lors de ses travaux de thèse ; les pertes de l'ESA (Emission Spontanée Amplifiée) de ses amplificateurs pompés à faible puissance (40 mW) présentent la même allure. Le calcul du facteur de bruit étant lié aux mesures ESA comme nous l'avons vu dans l'équation V-4, il paraît donc normal que si la courbe d'ESA présente une telle évolution il en soit de même pour le facteur de bruit. Laming et Payne [Laming 1990] ont montré que le facteur de bruit augmente rapidement lorsque la puissance de pompage diminue et surtout lorsqu'elle passe en dessous d'un certain seuil ; 5 mW dans le cas de leur amplificateur optique. Muriel Saccoccio [Saccoccio 1995] a mesuré l'évolution du facteur du bruit des EDFAs en fonction de la puissance de signal en entrée. Elle montre que ce facteur se dégrade rapidement pour des puissances de signal en entrée inférieures à -10 dBm et au-delà de cette valeur, le facteur de bruit évolue plus lentement avec l'augmentation de la puissance du signal en entrée. L'évolution du facteur de bruit, comme celui du gain, n'est pas linéaire en fonction de la puissance de pompage. Ceci pourrait expliquer qualitativement la forme de nos courbes expérimentales. En effet la puissance du signal vu par la fibre diminue au cours de l'irradiation car la fibre devient de plus en plus

atténuante accentuant du coup la dégradation du facteur de bruit. Un modèle de cinétique basé sur la formation et la transformation de défauts ponctuels est proposé plus loin afin d'ajuster les données expérimentales.

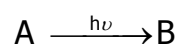
L'augmentation du facteur de bruit serait donc due au moins à deux facteurs : d'une part à la diminution du signal de l'erbium causée par l'atténuation induite de la fibre elle-même et d'autre part à la diminution de la puissance de pompage circulant dans la fibre, comme nous venons d'en discuter. Les irradiances augmentent donc les pertes en transmission par absorption du signal et de la pompe. La baisse du gain et l'augmentation du bruit ne sont de ce fait que des effets secondaires de cette augmentation des pertes en transmission.

Modèle

Afin de rendre compte de l'évolution des pertes induites en fonction du temps d'irradiation, nous avons élaboré un modèle cinétique basé sur la formation et la transformation de défauts ponctuels. Avant de présenter les équations de réaction et d'évolution, nous présentons tout d'abord les principales remarques à l'origine du modèle proposé.

- La première porte sur le profil de la courbe traduisant l'évolution des pertes induites au cours de l'irradiation. Comme nous pouvons le remarquer l'ensemble de ces courbes présente un profil en S. Ce profil ne peut être le fruit d'une cinétique faisant intervenir qu'un seul type de centres absorbants. Pour cette raison, le modèle proposé fait appel à deux types différents de centres absorbants.
- Deuxièmement l'ensemble des courbes de pertes induites montre au cours de l'irradiation une tendance à la saturation. Un tel comportement peut être expliqué par un nombre de centres précurseurs de défauts fini et relativement limité.

Fort de ces deux constatations, considérons un premier type de précurseurs noté A. L'irradiation de la fibre conduit à la transformation de cette espèce A en une espèce B présentant une absorption optique à l'origine des pertes induites selon la réaction :



Soit $N_a(t)$ le nombre de centres A au bout d'un temps t d'irradiation, l'équation de population ou d'évolution de cette espèce s'écrit alors :

$$\frac{dN_a}{dt} = -A_a N_a \quad (\text{Eq. V-5})$$

où A_a est la probabilité de transformation de l'espèce A en espèce B par unité de temps. La solution de cette équation s'écrit alors

$$N_a(t) = N_{a0} \cdot e^{-A_a \cdot t} \quad (\text{Eq. V-6})$$

où N_{a0} est le nombre de précurseurs de types A présent initialement dans la fibre.

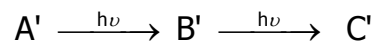
Une fois formé à partir de l'espèce A, deux éventualités se présentent pour l'espèce B

- L'espèce B est stable. Dans ce cas, le changement de régime des pertes induites, présence du point d'inflexion et taux d'accroissement plus fort, nécessite l'intervention d'une seconde espèce présentant une absorption induite. Cette espèce ne peut être le résultat d'une transformation directe d'un centre précurseur. Un tel processus conjugué à la formation de l'espèce B ne peut pas conduire seul à l'apparition d'un point d'inflexion dans la courbe des pertes induites. Pour rendre compte d'un tel comportement la formation d'une espèce intermédiaire entre le centre précurseur et le centre absorbants est nécessaire. Ce type de mécanisme est observé par exemple dans le processus de formation de défauts P1 absorbant vers 1650 nm et qui résultent de la transformation des défauts POHC, absorbants dans le visible et issus de centres précurseurs lors de l'irradiation des fibres dopées au phosphore.
- La seconde éventualité pouvant conduire à l'obtention du profil observé, concerne une espèce B instable. Là aussi une transformation directe de l'espèce B en une autre présentant une absorption à l'origine des pertes induites ne peut expliquer le profil en S observé ; une étape intermédiaire est nécessaire.

Nous détaillons ci-dessous les deux cas B stable et B instable.

Cas de B stable

Dans ce cas, en plus de la réaction $A \xrightarrow{h\nu} B$, il faut considérer un précurseur A' se transformant en B' avant de donner une espèce C' présentant une absorption optique à l'origine des pertes induites.



Les équations de population pour la formation de C' sont donc :

$$\begin{cases} \frac{dN_{a'}(t)}{dt} = -A_{a'} N_{a'} \\ \frac{dN_{b'}(t)}{dt} = A_{a'} N_{a'} - A_{b'} N_{b'} \\ \frac{dN_{c'}(t)}{dt} = A_{b'} N_{b'} \end{cases} \quad (\text{Eq. V-7})$$

où $N_i(t)$ est le nombre de centres de l'espèce I à l'instant t et A_i est la probabilité de transformation de l'espèce I par unité de temps. Ce système d'équation admet comme solution pour l'espèce C' responsable des pertes induites

$$N_{c'}(t) = N_{a'0} \left[1 - \frac{1}{A_{b'} - A_{a'}} (A_{b'} e^{-A_{a'}t} - A_{a'} e^{-A_{b'}t}) \right] \quad (\text{Eq. V-8})$$

où $N_{a'0}$ est le nombre de centres précurseurs A' à l'instant $t=0$.

De plus, l'espèce B suit la loi suivante :

$$N_b(t) = N_{a0} [1 - e^{-A_a t}] \quad (\text{Eq. V-9})$$

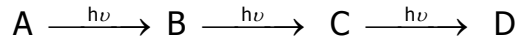
Dans ce cas les pertes induites A_{IR} s'écrivent :

$$A_{IR}(t) = \sigma_b N_b(t) + \sigma_c N_c(t) \quad (\text{Eq. V-10})$$

où σ_i est la section efficace d'absorption de l'espèce I.

Cas de B instable

Dans ce cas, l'espèce B se transforme en une espèce C ne présentant pas d'absorption dans le domaine spectral étudié avant de donner lieu, sous rayonnement, à la formation d'une espèce D à l'origine des pertes induites selon le schéma suivant :



dont les équations aux populations sont :

$$\begin{cases} \frac{dN_a(t)}{dt} = -A_a N_a \\ \frac{dN_b(t)}{dt} = A_a N_a - A_b N_b \\ \frac{dN_c(t)}{dt} = A_b N_b - A_c N_c \\ \frac{dN_d(t)}{dt} = A_c N_c \end{cases} \quad (\text{Eq. V-11})$$

où comme précédemment les A_i sont les probabilités de transformations de l'espèce I par unité de temps et $N_i(t)$ le nombre de centres de l'espèce I à l'instant t. Ce système d'équation conduit à une solution pour l'espèce B et pour l'espèce active D, à l'origine des pertes induites, sous la forme :

$$N_b(t) = \frac{A_a}{A_b - A_a} N_{a0} [e^{-A_a t} - e^{-A_b t}]$$

$$N_d(t) = N_{a0} \left[1 - \frac{A_b A_c e^{-A_a t}}{(A_b - A_a)(A_c - A_a)} - \frac{A_a A_c e^{-A_b t}}{(A_a - A_b)(A_c - A_b)} - \frac{A_a A_b e^{-A_c t}}{(A_a - A_c)(A_b - A_c)} \right] \quad (\text{Eq. V-12})$$

Dans ce cas les pertes induites A_{IR} s'écrivent de la forme :

$$A_{IR}(t) = \sigma_b N_b(t) + \sigma_d N_d(t) \quad (Eq. V-13)$$

où σ_i est la section efficace d'absorption de l'espèce I.

Nous avons utilisé les deux modèles proposés pour rendre compte du comportement et de la perte du gain des différents amplificateurs testés sous irradiation gamma. Les résultats des ajustements des pertes du gain à 1530 nm pour les amplificateurs D1, D2, D3 et D5 sont donnés en Figure V-11 pour les deux cas ; espèce B stable ou instable.

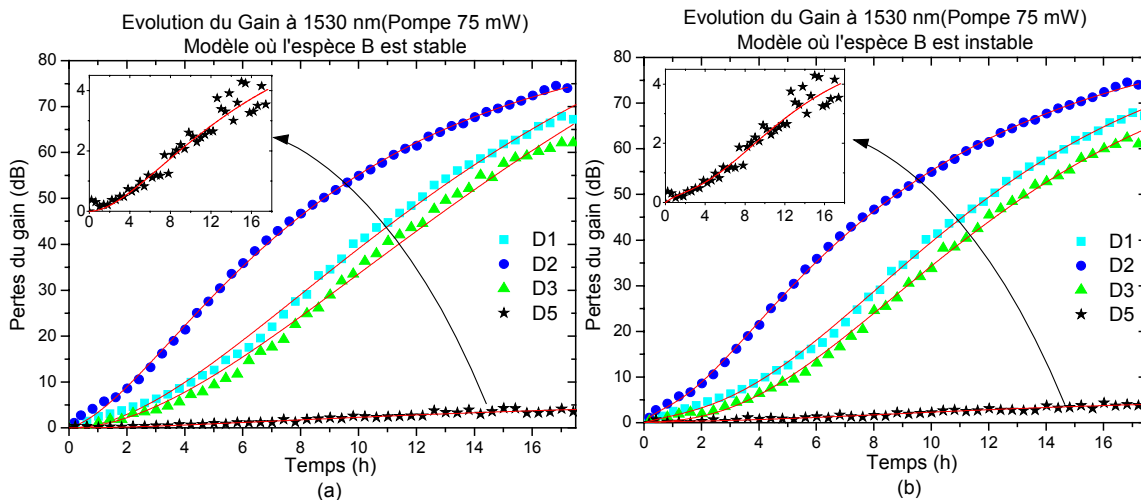


Figure V-11 : Evolution des pertes du gain à 1530 nm des quatre amplificateurs D1, D2, D3 et D5 pendant l'irradiation (débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$). Les symboles correspondent aux données expérimentales et les lignes continues aux ajustements réalisés avec le modèle où l'espèce B est stable (a) et avec le modèle où l'espèce B est instable (b).

Pour les deux modèles proposés, il existe des jeux de valeurs pour lesquels les ajustements sont corrects. Dans le cas où l'espèce B est stable, les valeurs de l'amplitude et de la cinétique de l'espèce B sont proches de zéro et favorisent le processus de formation de l'espèce C' qui nécessite une étape intermédiaire. Les ajustements réalisés avec le modèle où l'espèce B est instable rendent mieux compte des courbes expérimentales. Ce modèle reflète la formation d'une espèce D qui est à l'origine des pertes induites du gain et qui nécessite des étapes intermédiaires. Dans les deux cas le profil des courbes de pertes de gain (profil en S) nécessite la formation de l'espèce responsable des pertes induites via la formation et la transformation d'espèces intermédiaires.

V.3.2. Influence de la composition des fibres optiques des EDFAs sous irradiation gamma

La Figure V-12 présente pour les amplificateurs D1, D2, D3 et D5 les courbes des pertes du gain et du facteur de bruit lors d'une irradiation gamma suivie d'une période de 100h de guérison. Pour ne pas surcharger la figure seule l'évolution à 1530 nm est représentée. Aux autres longueurs d'onde, le comportement des amplificateurs est similaire avec des pertes inférieures ou égales à celles à

1530 nm, exemple présenté au paragraphe précédent (§ V.3.1). Les quatre amplificateurs sont pompés à la même longueur d'onde (980 nm) et à la même puissance (75 mW).

Les amplificateurs D1, D2 et D3 possèdent des pertes de gain et facteur de bruit nettement plus importantes que l'amplificateur D5. Ce dernier est constitué d'une fibre dopée erbium ayant une concentration très faible en aluminium (~ 0.3 wt%) par rapport aux trois autres (entre 7 et 10 wt%). Comme pour l'étude présentée dans le chapitre III sur le comportement des fibres dopées erbium sous irradiation (§ III.1.1.A), nous constatons que la présence ou non de l'aluminium dans le cœur des fibres conditionne la valeur des pertes induites sous irradiations gamma des EDFAs : le fait que l'aluminium soit très peu présent dans la composition de la fibre optique diminue d'un ordre de grandeur les pertes induites du gain et du facteur de bruit de l'amplificateur.

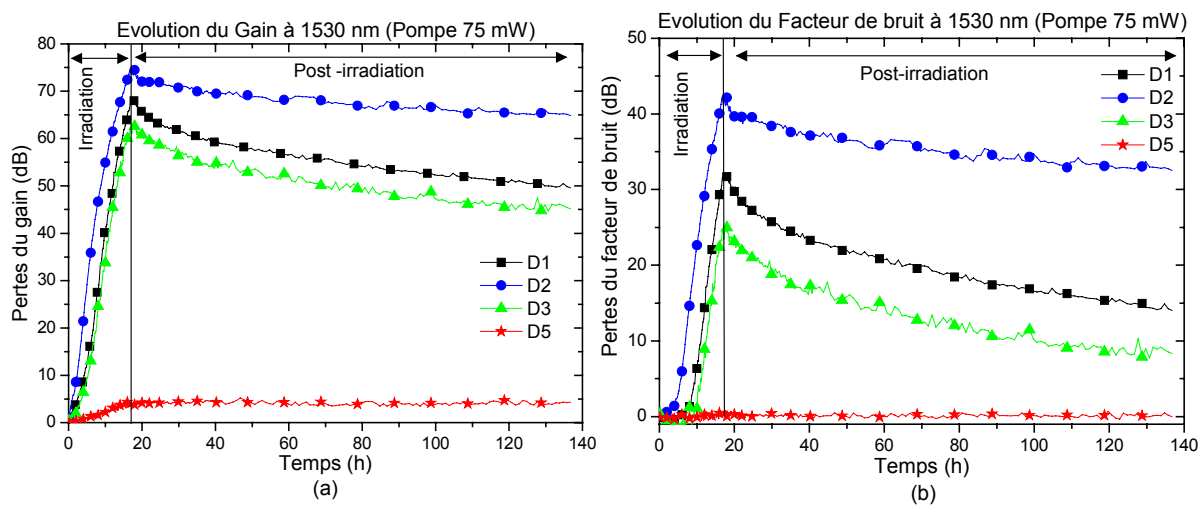


Figure V-12 : Evolution des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) des quatre amplificateurs D#1, D#2, D#3 et D#5 pendant et après l'irradiation (débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

Les amplificateurs D1 et D3 ont des comportements très proches. L'amplificateur D1 présente des pertes plus élevées que l'amplificateur D3. Les concentrations en erbium des deux fibres optiques constituant ces EDFAs sont égales mais la fibre D#1 possède une concentration en aluminium légèrement plus élevée que la fibre D#3. Par contre l'amplificateur D2 présente des pertes induites plus importantes que les autres alors que la fibre D#2 possède une concentration en aluminium intermédiaire entre celles des fibres D#1 et D#3 et une concentration en erbium plus faible que ces deux dernières. Ce comportement a déjà été observé (Figure III-2) lors des tests de ces fibres en configuration passive, sans pompage pendant et après l'irradiation. On peut donc en conclure que la présence de la Terre-Rare ne contribue à la dégradation des performances de l'amplificateur que dans la mesure où l'évolution de gain et du facteur de bruit dépend de l'intensité du signal émis par l'erbium. Par ailleurs, les pertes induites ne sont pas directement proportionnelles à la concentration en aluminium des fibres dopées mais la présence de cet élément est la principale cause des pertes induites.

V.3.3. Influence de la puissance de pompe des EDFAs sous irradiation gamma

Lors de la seconde campagne d'irradiation des EDFAs, nous n'avons testé que deux amplificateurs : D1 et D7. Comme précisé plus haut, nous avons choisi ces deux amplificateurs car ils représentent les deux catégories d'amplificateurs optiques que nous avons testés. Le premier est constitué d'une fibre dopée erbium avec une concentration classique d'aluminium (~ 10 wt%) et le second est composé d'une fibre dopée erbium n'ayant pratiquement pas d'aluminium (~ 0.3 wt%).

Le dispositif expérimental pour l'irradiation des EDFAs ne permettant de suivre que quatre amplificateurs en même temps, nous avons donc testé deux amplificateurs D1 et deux amplificateurs D7, sous deux puissances de pompage différentes (50 mW et 95 mW) pour chacun des deux EDFAs. De cette manière les paramètres d'irradiation sont identiques pour les différents amplificateurs testés et les résultats sont directement comparables.

Les Figures V-13 et V-14 présentent, respectivement, l'évolution des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm des amplificateurs D1 et D7 aux deux puissances de pompage testées (50 mW et 95 mW) pendant l'irradiation gamma et durant 150 h après la fin de l'irradiation. L'évolution des pertes est présentée uniquement à 1530 nm ; aux autres longueurs d'onde le comportement reste similaire.

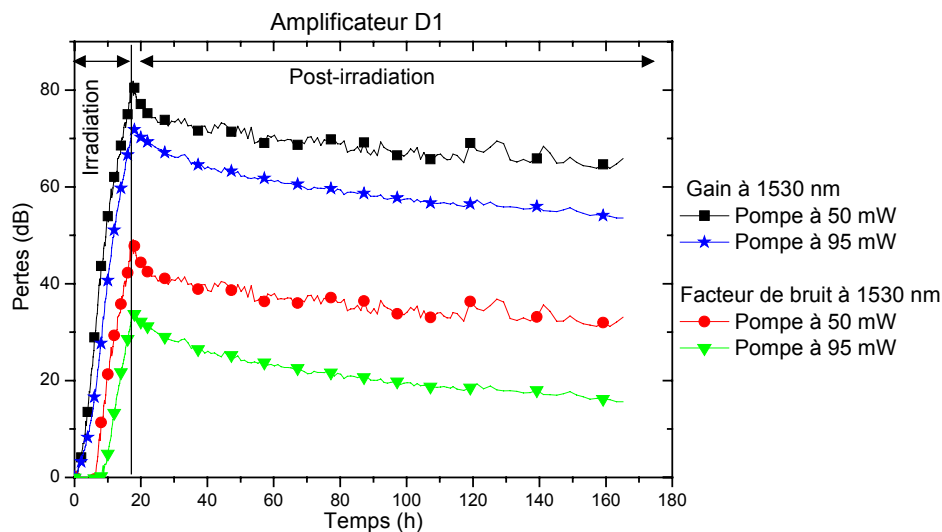


Figure V-13 : Evolution des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm de l'amplificateur D1 pour deux puissances de pompe différentes (50 mW et 95 mW) lors de l'irradiation gamma et pendant 150 h après l'arrêt de l'irradiation

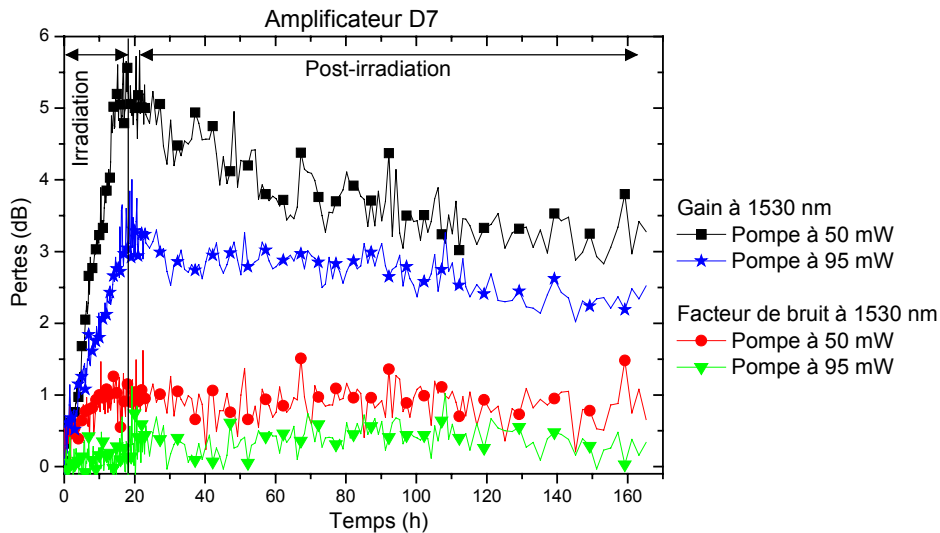


Figure V-14 : Evolution des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm de l'amplificateur D7 pour deux puissances de pompe différentes (50 mW et 95 mW) lors de l'irradiation gamma et pendant 150 h après l'arrêt de l'irradiation

Pour les deux amplificateurs, nous pouvons voir que, lors de l'irradiation gamma, les pertes du gain comme celles du facteur de bruit sont plus faibles pour la puissance de pompage la plus élevée. L'influence de la puissance de pompage a déjà été observée lors des travaux de thèse de M. Caussanel [Caussanel 2004] qui a noté que les pertes induites par les radiations diminuent lorsque la puissance de pompage augmente.

Pour l'amplificateur D1, nous avons relevé, dans la Table V-2, les valeurs des pertes induites du gain et du facteur de bruit en fin d'irradiation et après ~150 h de récupération en notant le pourcentage de guérison sur cette durée. Ce pourcentage, aussi bien pour le gain que pour le facteur de bruit, est plus important pour le pompage à 95 mW qu'à 50 mW. Un fort pompage permet de blanchir plus de défauts responsables de l'atténuation induite par radiation et est donc à l'origine de la diminution des pertes du gain et du facteur de bruit de l'amplificateur.

	Gain à 1530 nm		Facteur de bruit à 1530 nm	
	Pompage à 50 mW	Pompage à 95 mW	Pompage à 50 mW	Pompage à 95 mW
Pertes en fin d'irradiation	82 dB	72 dB	49 dB	34 dB
Pertes après 150 h de guérison	64 dB	54 dB	31 dB	16 dB
Pourcentage de guérison sur 150 h	22%	25%	37%	53%

Table V-2 : Valeurs des pertes et pourcentage de récupération au bout de ~150 h du gain et du facteur de bruit à 1530 nm de l'amplificateur D1 pour les puissances de pompage 50 mW et 95 mW

Il est moins aisé de faire le même suivi pour l'amplificateur D7 du fait de la faible dynamique de mesure surtout pour le facteur de bruit. On peut constater sur la Figure V-14 que les pertes du facteur de bruit sont quasiment constantes lors des ~150 h de guérison pour les deux puissances de pompage testées. En ce qui concerne le gain de cet amplificateur, les pertes sont plus importantes

sous pompage à 50mW et quoique la récupération soit importante, les pertes finales restent plus importantes que celles sous pompage à 95 mW.

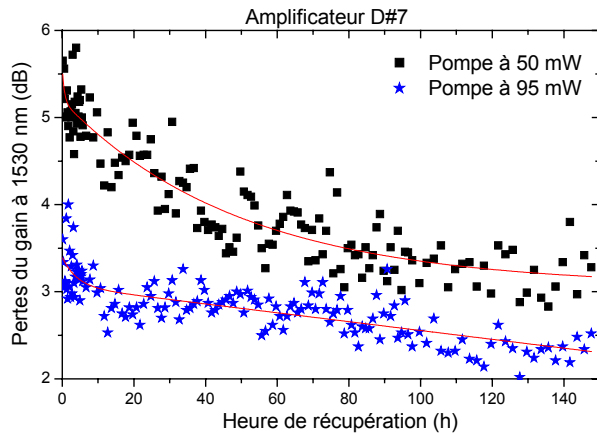


Figure V-15 : Evolution des pertes du gain à 1530 nm après l'arrêt de l'irradiation de l'amplificateur D7 pour les puissances de pompe 50 mW et 95 mW. Les symboles correspondent aux données et les lignes rouges aux ajustements

	Gain à 1530 nm	
	Pompage à 50 mW	Pompage à 95 mW
Pertes en fin d'irradiation	5.4 dB	3.4 dB
Pertes après 150 h de guérison	3.2 dB	2.3 dB
Pourcentage de guérison sur 150 h	41%	32%

Table V-3 : Valeurs des pertes et pourcentage de récupération du gain à 1530 nm au bout de ~150 h de récupération de l'amplificateur D#7 pour les puissances de pompe 50 mW et 95 mW

Pour cet amplificateur nous avons estimé le pourcentage de récupération à partir des ajustements, moyennant l'équation III-2, des courbes de gain (cf. Figure V-15). Ce pourcentage est d'environ 32% sous un pompage à 95 mW et 41% sous pompage à 50 mW (Table V-3). Pour cet amplificateur la tendance est inverse de celle observée pour l'amplificateur D1.

Nous avons également procédé à des mesures du gain et du facteur de bruit des deux amplificateurs D1 plusieurs jours après l'arrêt de l'irradiation gamma. Dans un premier temps, nous avons gardé les mêmes paramètres que lors de l'irradiation, autrement dit les mêmes puissances de pompage. Dans un second temps, nous avons inversé les puissances de pompage entre les deux amplificateurs. Celui initialement pompé à 50 mW fut pompé à 95 mW par la suite et inversement pour le second amplificateur D1. Les courbes obtenues sont présentées en Figure V-16 ; le temps étant décompté depuis le début de l'irradiation.

L'observation des courbes du gain et du facteur de bruit de l'amplificateur D1 dont la puissance de pompage passe de 95 mW à 50 mW (courbes bleue et verte de la Figure V-16) laisse apparaître une augmentation des pertes induites lors du changement de puissance. Cette augmentation n'est pas due à une dégradation intrinsèque de la fibre dopée erbium mais uniquement au changement des conditions de fonctionnement de l'amplificateur qui sont moins appropriées qu'auparavant. En revanche l'évolution post-changement de puissance reflète un changement intrinsèque de la fibre dopée erbium où on assiste à un photoblanchiment plus efficace pour la puissance plus importante. D'ailleurs ce comportement se retrouve dans la première partie des courbes, avant le changement de la puissance de pompage. Nous pouvons constater que la récupération du gain et du facteur de bruit est plus importante pour l'amplificateur pompé à plus forte puissance (95 mW). Ceci peut se lire plus facilement dans la Table V-4 où nous donnons les valeurs des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm pour les deux périodes D de guérison des amplificateurs D1.

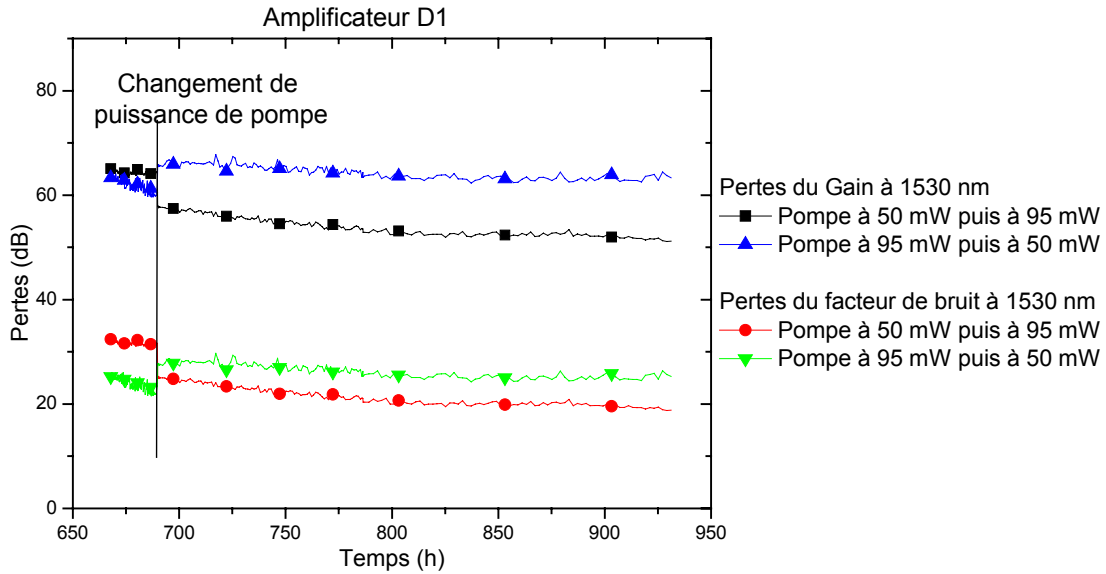


Figure V-16 : Evolution des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm de l'amplificateur D1 pour deux puissances de pompe différentes (50 mW et 95 mW) quelques jours après l'arrêt de l'irradiation gamma (le temps est décompté depuis le début de l'irradiation)

Lors de la première période de récupération, l'amplificateur pompé à 95 mW guérit avec une vitesse moyenne de $\sim 0.116 \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$ alors que celui pompé à 50 mW est limité à $\sim 0.058 \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$. L'amplificateur pompé à 95 mW guérit à $\sim 0.027 \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$ alors que celui pompé à 50 mW à $0.012 \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$.

		D1 (50 mW \Rightarrow 95 mW)		D1 (95 mW \Rightarrow 50 mW)	
	Puissance de pompe	50 mW	95 mW	95 mW	50 mW
	Temps de mesure de guérison	21.5 h	241.3 h	21.5 h	241.3 h
Gain	Début	65 dB	58 dB	63 dB	66 dB
	Fin	64 dB	51 dB	61 dB	63 dB
	Différence	1 dB	7 dB	2 dB	3 dB
	Vitesse de guérison	$47 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$	$29 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$	$93 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$	$12 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$
Facteur de bruit	Début	32.5 dB	25 dB	25 dB	28 dB
	Fin	32 dB	19 dB	22 dB	25 dB
	Différence	0.5 dB	6 dB	3 dB	3 dB
	Vitesse de guérison	$23 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$	$25 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$	$139 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$	$12 \cdot 10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{h}^{-1}$

Table V-4 : Valeurs des pertes du gain et du facteur du bruit à 1530 nm des deux amplificateurs D1 lors des mesures faites plusieurs jours après la fin de l'irradiation gamma

Nous pouvons donc dire qu'une forte puissance de pompage pour un amplificateur classique (c'est-à-dire avec une fibre dopée erbium dont la concentration en aluminium n'est pas négligeable, $\sim 10\%$) permet de réduire les pertes induites. Pour l'amplificateur très peu dopé aluminium, si l'amélioration de gain est bien observée sous pompage plus important, les mesures de facteur de bruit ne permettent pas de conclure et demandent à être améliorées.

V.4. Résumé

Dans ce chapitre nous avons testé le comportement d'amplificateurs optiques fabriqués avec les fibres optiques dopées erbium que nous avons déjà testées lors des campagnes d'irradiation antérieures et dont les résultats sont présentés dans les chapitres précédents. Seules les fibres optiques constituant l'élément le plus sensible d'un EDFA sous radiation ont été placées dans le faisceau de rayon gamma.

Les pertes induites du gain et du facteur de bruit augmentent avec la dose totale déposée dans la fibre ; tout d'abord lentement puis passent un certain seuil avec une cinétique plus importante. Ceci est dû à la réponse non linéaire du gain en fonction de la puissance de pompage. La dégradation des performances des EDFAs sous irradiation est une conséquence directe de l'augmentation de l'atténuation optique aussi bien à la longueur d'onde de pompage que celle du signal erbium. Cette dernière intervenant dans le calcul de gain et du facteur de bruit, sa diminution entraîne celle du gain et une augmentation du facteur de bruit.

Nous avons également observé que la composition de la fibre dopée erbium affecte de manière non négligeable les pertes induites du gain et du facteur de bruit des EDFAs. En effet l'amplificateur constitué d'une fibre dopée erbium ayant très peu d'aluminium présente des pertes induites inférieures d'un ordre de grandeur par rapport à celles des amplificateurs réalisés avec des fibres optiques ayant une concentration d'aluminium classique (~10%wt).

La puissance de pompe joue également un rôle dans la quantité des pertes générées par l'irradiation. De manière générale, nous avons constaté que l'augmentation de la puissance de pompe permet de limiter par photoblanchiment l'accumulation de défauts. Pour les amplificateurs classiques (concentration d'aluminium autour de 10%) l'augmentation de la puissance de pompage permet également de photoblanchir avec plus d'efficacité les défauts après l'arrêt de l'irradiation.

Afin d'améliorer le comportement d'un amplificateur optique sous environnement radiatif, il est plus intéressant d'utiliser une fibre dopée erbium avec une faible concentration d'aluminium dans sa composition et sous une forte puissance de pompage. Sachant que les pertes induites des fibres dopées erbium sont plus importantes quand la longueur d'onde décroît, il serait intéressant d'utiliser un pompage à 1480 nm plutôt qu'à 980 nm. Plusieurs auteurs [Williams 1992, Simpson 1993 et Brichard 2003] ont déjà fait ce constat, par expérimentation ou par simulation. Leurs tests d'EDFAs sous irradiation utilisaient des fibres classiques (forte concentration d'aluminium) ; il serait intéressant de mener la même étude sur des fibres faiblement concentrées en aluminium.