



HAL
open science

Effets des radiations sur des fibres optiques dopées erbium : influence de la composition

Blandine Tortech

► **To cite this version:**

Blandine Tortech. Effets des radiations sur des fibres optiques dopées erbium : influence de la composition. Physique [physics]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2008. Français. NNT : . tel-00366057

HAL Id: tel-00366057

<https://theses.hal.science/tel-00366057>

Submitted on 5 Mar 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ JEAN MONNET DE SAINT-ÉTIENNE

Ecole Doctorale ED SIS 488

VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL

Thèse en co-tutelle

Pour l'obtention des grades de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE SAINT-ÉTIENNE

SPÉCIALITÉ : "OPTIQUE ET PHOTONIQUE"

ET

DOCTOR IN ENGINEERING SCIENCES DE LA VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL

Présentée et soutenue publiquement
par

BLANDINE TORTECH

LE 31 JANVIER 2008

EFFETS DES RADIATIONS SUR LES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM : INFLUENCE DE LA COMPOSITION

Directeur de thèse : J-P. Meunier, Université de Saint-Etienne
Co-Directeur de thèse : F. Berghmans, Vrije Universiteit Brussel

Jury

Rapporteurs

DR A. FOTIADI
DR G. MONNOM

Chargé de recherche, SET, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique
Directeur de Recherche CNRS, LPMC, Université de Nice-Sophia Antipolis

Examineurs

DR M. VAN UFFELEN
A. BOUKENTER
H. THIENPONT
Y. OUERDANE

Ingénieur R&D, Belgium Nuclear Research Centre, SCK-CEN, Mol, Belgium
Professeur, Université Jean Monnet, LabHC, Saint-Etienne
Professeur, Vrije Universiteit Brussel, TONA, Brussels, Belgium
Professeur, Université Jean Monnet, LabHC, Saint-Etienne

J-P. MEUNIER
F. BERGHMANS

Professeur, Université Jean Monnet, LabHC, Saint-Etienne
Professeur, Vrije Universiteit Brussel, TONA, Brussels, Belgium

Invités

DR E. BUROV
DR S. GIRARD
DR A. GUSAROV

Ingénieur R&D, Draka Comteq France, Marcoussis
Ingénieur R&D, CEA – DIF, Bruyères-le-Châtel
Chercheur, Belgium Nuclear Research Centre, SCK-CEN, Mol, Belgium

The private defense of this PhD thesis "**Radiation effects on erbium doped optical fibers - on the influence of the fiber composition**" took place at the Vrije Universiteit Brussel on December 21st, 2007. The jury members were :

| | |
|---------------|---|
| J. TIBERGHIE | Professor, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium (Chairman) |
| R. PINTELO | Professor, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium (Vice-chairman) |
| H. THIENPONT | Professor, Vrije Universiteit Brussel, TONA, Brussels, Belgium (Secretary) |
| F. BERGHMANS | Professor, Vrije Universiteit Brussel, TONA, Brussels, Belgium (Promoter) |
| J-P. MEUNIER | Professor, Université Jean Monnet, LabHC, Saint-Etienne, France (Co-promoter) |
| Y. OUERDANE | Professor, Université Jean Monnet, LabHC, Saint-Etienne, France |
| DR A. FOTIADI | Researcher, SET, Faculté Polytechnique de Mons, Belgium |
| DR S. GIRARD | R&D Engineer, CEA – DIF, Bruyères-le-Châtel, France |
| DR A. GUSAROV | Researcher, Belgium Nuclear Research Centre, SCK-CEN, Mol, Belgium |

*A mes grands-parents
A mes parents
A mon frère Pierre
A Liam*

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé en co-tutelle entre la France et la Belgique : d'une part j'ai travaillé au sein du département Optique et Photonique du Laboratoire Hubert Curien (LabHC) de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne (UJM) en France et d'autre part au sein du département de physique appliquée et photonique (TONA) de l'Université Libre Flamande de Bruxelles (VUB) en Belgique. Merci à Pierre Laporte et Florent Pigeon (ancien et nouveau directeurs du LabHC) et Hugo Thienpont (directeur de TONA) de m'avoir accueillie.

Je voudrais remercier tout particulièrement mon directeur de thèse français Jean-Pierre Meunier de m'avoir permis de faire cette thèse et de m'avoir encadrée durant ces trois années. Grâce à lui, j'ai pu découvrir le métier d'enseignant-chercheur, métier que je souhaite vivement exercer maintenant.

Je voudrais également remercier toutes les personnes qui ont travaillé avec moi sur ce projet, ainsi que les personnes qui ont accepté de faire partie de mon jury. Je remercie Messieurs Gérard Monnom (Laboratoire de Physique de la Matière Condensée de l'université de Nice) et Andreï Fotiadi (Service d'Electromagnétisme et de Télécommunications de la Faculté Polytechnique de Mons) d'avoir rapporté mon travail de thèse. Je remercie également Monsieur Gérard Monnom d'avoir présidé mon jury de thèse.

Je remercie vivement les personnes du laboratoire Hubert Curien qui m'ont encadrée : Youcef Ouerdane et Aziz Boukenter. Grâce à eux j'ai beaucoup appris en salle de manip et en rédaction d'articles.

Les personnes qui m'ont accueillie et encadrée en Belgique au SCK-CEN à Mol, Francis Berghmans, Marco Van Uffelen et Andreï Gusarov m'ont beaucoup aidée. Merci à vous. Je voudrais également saluer Johny, Frans, Stan et tous les autres du département instrumentation (INSTR) pour leur accueil.

Elise Régnier et Ekaterina Burov (Draka Comteq) ont collaboré avec nous pour ces travaux de thèse. Merci Ekaterina Burov d'avoir participé à mon jury de thèse. Merci Elise pour ta collaboration, pour ton soutien juste avant nos premiers oraux en anglais pour Radecs à Athènes.

Je voudrais également dire un grand merci à Sylvain Girard (CEA) pour toutes les conversations que l'on a pu avoir, pour les explications claires qu'il m'a apportées, pour les mesures effectuées avec différents faisceaux d'irradiation et pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je voudrais remercier chaleureusement les personnes du Laboratoire Hubert Curien (permanentes et non-permanentes) avec qui j'ai eu l'occasion de travailler ou de discuter de choses et d'autres et avec qui j'ai eu de bons moments durant ces trois années de thèse. Merci à Nadège, Giusy, Salah (bonne chance pour la suite à tous les deux), David, François, Manu, Jean-Yves, Gérard, Colette, Isabelle, Jeanine... et tous les autres (je ne continue pas la liste car sinon je finirai par en oublier).

Je souhaiterais également remercier les collègues de l'Istase pour m'avoir aidée dans mon apprentissage de l'enseignement. Ce fut un réel plaisir d'enseigner à l'Istase, surtout en tant qu'ancienne istarque.

Maintenant je me tourne vers mes proches sans qui tout cela n'aurait pas été possible. Merci aux copains de la Mak T's Bande et aux copains de promo Istase 2004. Vous m'avez toujours soutenue et cru en moi. Merci Papa, Maman et Pierre pour votre continuel soutien durant toutes ces années et pour m'avoir toujours fait aller de l'avant. Et pour finir un grand merci à mon compagnon Liam pour ta présence et ton réconfort lors des moments de stress. Je leur dédie ce mémoire ainsi qu'à mon papy Michel parti trop tôt, j'espère que tu es fier de moi.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| SYNOPSIS OF THE THESIS | 13 |
| INTRODUCTION | 17 |
| CHAPITRE I. LES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM EN ENVIRONNEMENT IONISANT ET LES PRINCIPAUX DÉFAUTS DE LA SILICE | 19 |
| I.1. INTRODUCTION | 21 |
| I.2. PROPRIÉTÉS DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM ET APPLICATIONS | 22 |
| I.2.1. Spectroscopie de l'ion : transitions et durée de vie | 23 |
| I.2.2. Principe de l'amplificateur optique | 25 |
| I.3. LES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM SOUS ENVIRONNEMENTS IONISANTS : ÉTAT DE L'ART ET OBJECTIFS DE LA THÈSE..... | 27 |
| I.3.1. Les fibres dopées erbium soumises à des radiations gamma | 27 |
| I.3.2. Les EDFAs soumis à des radiations gamma | 30 |
| I.3.3. Les EDFLs soumis à des radiations gamma..... | 33 |
| I.3.4. Objectifs de la thèse..... | 33 |
| I.4. LES PRINCIPAUX DÉFAUTS DE LA SILICE PURE OU DOPÉE | 34 |
| I.4.1. Défauts présents dans la silice pure..... | 34 |
| I.4.1.A. Les centres SiE' | 35 |
| I.4.1.B. Les centres NBOHC (Non-Bridging Oxygen Hole Center)..... | 36 |
| I.4.1.C. Les radicaux peroxy (POR)..... | 38 |
| I.4.1.D. Les centres STH (Self Trapped Holes)..... | 39 |
| I.4.1.E. Les centres Si-ODC | 39 |
| I.4.2. Les défauts liés à la présence de germanium..... | 40 |

| | | |
|----------|---|----|
| I.4.2.A. | <i>Les défauts Ge(1) et Ge(2)</i> | 40 |
| I.4.2.B. | <i>Le défaut GeE'</i> | 41 |
| I.4.2.C. | <i>Le centre Ge-NBOHC</i> | 41 |
| I.4.2.D. | <i>Le centre GeNOV</i> | 41 |
| I.4.2.E. | <i>Le centre GLPC ou Ge-ODC</i> | 42 |
| I.4.3. | Les défauts liés à la présence de phosphore | 42 |
| I.4.4. | Les défauts liés à la présence d'aluminium | 43 |
| I.5. | RÉSUMÉ | 44 |

CHAPITRE II. ENVIRONNEMENTS RADIATIFS - MÉTHODES DE CARACTÉRISATION ET FIBRES UTILISÉES 45

| | | |
|-----------|--|----|
| II.1. | ENVIRONNEMENTS RADIATIFS, PARTICULES, RAYONNEMENTS ET SOURCES D'IRRADIATION UTILISÉES | 47 |
| II.1.1. | Particules et rayonnements utilisés | 48 |
| II.1.2. | Source d'irradiation gamma et installation des fibres optiques | 49 |
| II.1.3. | Source d'irradiation X et installation des fibres optiques | 51 |
| II.1.4. | Source d'irradiation proton et installation des fibres optiques | 52 |
| II.1.5. | Insolation UV des fibres optiques | 53 |
| II.2. | CARACTÉRISATION DES PERTES INDUITES SOUS IRRADIATION | 54 |
| II.2.1. | Caractérisation de l'évolution temporelle et spectrale des pertes induites dans des fibres optiques lors d'une irradiation continue gamma | 54 |
| II.2.1.A. | <i>Transmission dans le proche IR</i> | 54 |
| II.2.1.B. | <i>Excitation à 980 nm et 1480 nm</i> | 55 |
| II.2.2. | Caractérisation de l'évolution temporelle des pertes induites dans les fibres optiques sous irradiation avec des rayons X pulsés | 56 |
| II.2.3. | Caractérisation de l'évolution temporelle et spectrale des pertes induites des fibres optiques lors d'une irradiation continue aux protons | 57 |
| II.2.3.A. | <i>Excitation à 980 nm</i> | 57 |
| II.2.3.B. | <i>Montage utilisant une source superluminescente</i> | 57 |
| II.2.4. | Caractérisation d'amplificateurs optiques à fibres dopées erbium sous irradiation continue gamma | 58 |
| II.3. | ANALYSES PRÉ- ET POST-IRRADIATION DES FIBRES OPTIQUES | 59 |
| II.3.1. | Spectroscopie de luminescence | 59 |
| II.3.1.A. | <i>Microspectroscopie de luminescence</i> | 60 |
| II.3.1.B. | <i>Mesure de luminescence dans l'infrarouge</i> | 61 |
| II.3.2. | Mesure de durée de vie | 62 |
| II.3.3. | Mesure d'absorption | 62 |
| II.4. | CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM ÉTUDIÉES | 63 |
| II.5. | RÉSUMÉ | 64 |

CHAPITRE III. SENSIBILITÉ DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM SOUS DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS RADIATIFS 65

| | |
|---|-----------|
| 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 |

CHAPITRE IV. COMPORTEMENTS DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM SOUMISES À DES INSOLATIONS UV ET COMPARAISON AVEC LES IRRADIATIONS GAMMA..... 91

| | |
|---|-----------|
| IV.1. COMPORTEMENT DE FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM SOUS INSOLATION UV..... | 94 |
| IV.1.1. Fibres optiques dopées erbium excitées de manière transversale à 244 nm..... | 94 |
| <i>IV.1.1.A. Absorption des fibres non insolées.....</i> | <i>95</i> |
| <i>IV.1.1.B. Détermination des coefficients d'absorption.....</i> | <i>97</i> |
| IV.1.2. Absorption induite dans les fibres insolées à 244 nm..... | 98 |
| IV.2. MESURES POST-INSOLATION..... | 101 |
| IV.2.1. Luminescence dans le domaine du visible..... | 101 |
| IV.2.2. Comparaison des spectres de luminescence dans le domaine du visible des échantillons insolés UV et irradiés gamma | 104 |
| IV.3. RÉSUMÉ..... | 107 |

| | |
|---|------------|
| CHAPITRE V. AMPLIFICATEUR OPTIQUE À FIBRE DOPÉE ERBIUM SOUS IRRADIATION GAMMA | 109 |
| 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 |
| | |
| CONCLUSION | 131 |
| | |
| GLOSSAIRE..... | 135 |
| | |
| LISTE DES PUBLICATIONS ISSUES DES TRAVAUX DE THÈSE | 137 |
| | |
| BIBLIOGRAPHIE | 139 |

SYNOPSIS OF THE THESIS

Fiber optic amplifiers or fiber lasers rely on erbium-doped optical fibers. These components play an important role in optical telecommunications. They are now considered for use in harsh environments such as space, civil nuclear applications (nuclear power plants, particle accelerators) and military applications. These environments are characterized by the presence of ionizing radiation including gamma rays, energetic protons, or X-rays.

It is well known that energetic radiation can affect the performance of optical amplifiers or the fiber lasers. More specifically radiation creates additional fiber attenuation, called "Radiation Induced Attenuation" (RIA). This effect stems from modifications in the silica structure: radiation breaks chemical bonds between atoms or locally ionizes the material which results in the appearance of point defects or color centers. The underlying physical mechanisms and the impact of the composition of the fiber are still not fully understood.

This PhD therefore deals with an extensive study of the response of erbium-doped fibers (EDFs) to radiation. We chose to work in the range of space application relevant total doses (few kGy). These dose levels are also in the range of a number of civil applications. We have experimented with several types of erbium-doped fibers with varying composition and we irradiated these fibers with gamma rays, energetic protons, continuous UV laser and pulsed X-rays.

Erbium and aluminum co-doped fibers exhibit a higher radiation induced sensitivity (RIS) than standard telecommunication grade fibers (e.g. Corning SMF28™) or than erbium-doped fibers containing a very low aluminum concentration. The presence of aluminum in the EDF core is mainly responsible for the fiber performance degradation. The radiation induced attenuation of our fibers was measured with different set-ups during and after gamma and proton irradiations. The optical transmission measurements were carried out in the infra-red range during irradiation. The fibers were optically pumped at 980 nm or at 1480 nm to evaluate the luminescence RIA at 1530 nm. We found that the RIA decreases when the wavelength increases: the pump signal at 1480 nm is less affected than a pump signal at 980 nm. Moreover the results obtained under gamma and proton irradiation are

similar and therefore one can conceive to simulate proton radiation effects with gamma irradiations, the latter can be carried out in a simpler manner.

We also tested, for the first time to our knowledge, erbium doped fibers under pulsed X-rays. The pulsed X-ray irradiated EDF attenuation measurements show that the transient and permanent losses after an X-ray flash are higher than in standard telecommunication fibers. For the gamma, proton and X-ray environments, the results indicate that the generated defects are related to the fiber host matrix. The blue luminescence in the visible range of the UV irradiated fiber evolves in a similar manner as that of the gamma and proton irradiated fibers: the luminescence decreases due to the growth of the radiation induced defect concentration.

In order to understand the nature and the spatial distribution of these generated defects, we compared the luminescence in pristine and irradiated fiber samples. Our results evidence that the concentration of optically active centers increases in both fiber core and cladding. Furthermore, the erbium transition luminescence bands are hardly influenced by irradiation. We can therefore conclude that the erbium ions are not affected by radiation. A number of radiation induced defects have been clearly identified: two luminescence bands are ascribed to Non-Bridging Oxygen Hole Centers (NBOHC) related to silicon or germanium atoms (Si-NBOHC or Ge-NBOHC respectively). We also found two additional luminescence bands which are not yet clearly identified: the first may be attributed to Phosphorus-Oxygen-Hole-Centers (POHC) while the second may be assigned to defects related to silica. The study of luminescence signals allowed evidencing that energy transfers exist between the radiation induced defects and the erbium ions.

Finally we also experimented with erbium-doped fibers in amplifier configurations under gamma irradiation. The gain and noise figure degradations of these optical amplifiers confirm the influence of the aluminum: an amplifier with very low aluminum concentration in the erbium doped fiber exhibits lower loss compared to the amplifiers with usual aluminum concentration levels. Furthermore we found that the gain degradation is not well fitted by the empirical model proposed in literature. We therefore developed a novel model based on the defect formations and transformations to correctly describe the gain degradation.

The highlights of this PhD research can be summarized as follows:

- The composition of the erbium doped fiber and more specifically the concentration of aluminum influences the radiation response of the fiber: the induced attenuation is lower when the aluminum concentration is reduced.
- Proton radiation has a similar effect as gamma radiation and hence the latter can be used to simulate proton radiation effects
- An original technique involving an intrinsic source created inside the fiber core by UV laser exposure allowed quantifying the influence of UV irradiation in the visible range with only a 10 - 20 cm fiber length and determining the absorption of erbium absorption without need

for cutting back the fiber and with a $\sim 10\text{m}$ fiber length. The UV irradiation effects are similar to those induced by gamma irradiation.

- Luminescence measurements allowed localizing the radiation induced defects in the core or in the cladding. Several defects could also be identified (NBOHC, POHC).
- An efficient kinetic model for the gain evolution under irradiation was proposed and has to be extended for different dose-rates and total doses.
- One important and unsolved issue so far is induced loss at visible and lasing wavelengths (or photodarkening) in high-power fiber lasers where the ytterbium ion is the rare-earth (RE) ion of choice because of higher energy conversion efficiency compared with, e.g., neodymium. This is due to the formation of color centers in the silicate glass matrix, which can typically reduce the output power of about 10% over 1000 hours. The mechanisms responsible for the formation of color centers in RE-doped glass are still not fully understood. The results obtained in this PhD work and the methods applied can be useful to tackle this challenging problem.

INTRODUCTION

Pour reprendre l'expression de Van Allen, Ray et McIlwain, suite à leurs mesures au compteur Geiger installé sur le satellite Explorer-3 en 1958, l'espace est par nature radioactif. En effet, on y trouve un grand nombre de particules et de rayonnements, de types et d'énergies très divers, dont la présence ne serait pas un problème s'ils ne dégradaient les performances des véhicules spatiaux et les dispositifs les constituant. Les installations nucléaires, comme les centrales nucléaires, sont également des environnements où les rayonnements ionisants sont présents. De part leurs propriétés inhérentes (faible poids, faible volume, insensibilité aux champs électromagnétiques extérieurs, très grande bande passante...) et de la possibilité de multiplexage en longueur d'onde, les fibres optiques présentent des avantages indéniables pour leur utilisation dans différents environnements radiatifs. Ainsi, la résistance à divers types de radiations (gamma, X, protons, UV) des composants photoniques à base de fibres optiques, doit être étudiée en vue de leur utilisation en tant que composants ou de leur intégration dans des systèmes et projets technologiques. Dans la littérature disponible, il a été montré que l'irradiation d'une fibre optique a pour conséquence d'augmenter son atténuation linéique. Les pertes ainsi induites dans la fibre sont dues à la formation et la transformation de certains défauts ponctuels présents dans la silice, dopée ou non, dont sont constituées les fibres. Dans des études antérieures [Griscom 1995, Girard 2003...], les auteurs ont étudié les mécanismes mis en jeu pour la formation et la transformation des défauts générés par une irradiation dans des fibres germanosilicates multimodes et ayant parfois différents co-dopants (Phosphore, Fluor, Chlore, Azote). La composition de la fibre optique a une influence importante sur sa réponse sous irradiation. Pour les fibres dopées erbium utilisées dans les amplificateurs optiques, des études antérieures ont également montré que les pertes linéiques augmentent considérablement sous irradiation, mais les défauts générés ainsi que leurs mécanismes de formation et transformation ne sont pas référencés dans la littérature ouverte. De plus, la fabrication des fibres dopées erbium a évolué depuis les premiers tests sous irradiations réalisés sur ces dernières. L'objectif de cette thèse est d'étudier les mécanismes à l'origine de la dégradation de propriétés des fibres optiques dopées erbium, ainsi que d'identifier les dopants responsables en grande partie des dégradations des fibres.

Pour réaliser ce travail, nous avons procédé d'une part à la mesure en ligne des pertes induites dans différentes fibres dopées erbium sous irradiation gamma, protons, X et insolation UV, et d'autre part à la caractérisation post-irradiation des fibres par des techniques spectroscopiques afin d'identifier les défauts générés responsables de la dégradation des fibres. Ces travaux ont donc été accomplis via une collaboration internationale avec différents centres de recherche. Les installations d'irradiation du centre d'étude de l'énergie nucléaire, le SCK•CEN, à Mol en Belgique ont servi pour toutes nos irradiations continues gamma. Les autres types d'irradiations (X et protons) ont été menés par le CEA-DIF au Centre d'Etude de Gramat (DGA) et également avec l'installation d'irradiation TRIUMF à Vancouver au Canada. Les insolations UV ainsi que les mesures spectroscopiques ont été réalisées au sein du département optique et photonique du laboratoire Hubert Curien de l'université Jean Monnet de Saint-Etienne. Les fibres ont été fournies par deux fabricants : le FORC (Fiber Optics Research Center, Moscou Russie) et DRAKA Comteq (fabriquant européen).

Dans le présent manuscrit (chapitre I), nous présentons les propriétés spécifiques et les utilisations des fibres dopées erbium. Nous exposons un état de l'art sur les études de ces fibres en environnements radiatifs. Et enfin, nous listons les différents défauts générés dans la silice dopée ou non qui peuvent être à l'origine des pertes induites sous irradiations.

Dans le chapitre II, nous décrivons les différents rayonnements utilisés pour notre étude ainsi que les moyens mis en place pour leur utilisation. Nous présentons également les différents dispositifs expérimentaux utilisés pour la caractérisation des pertes induites pendant et après les irradiations et insolations. Nous décrivons ensuite les montages et les techniques spectroscopiques utilisés afin d'identifier les défauts induits. Nous donnons aussi les principales caractéristiques des fibres testées.

Les résultats des mesures de pertes induites en mode passif lors des irradiations continues gamma, aux protons et sous rayons X pulsés sont exposés dans la première partie du chapitre III. La seconde partie expose les résultats de luminescence, d'absorption et de durée de vie de nos échantillons vierges et ceux irradiés afin d'identifier les défauts créés par les irradiations et d'estimer l'influence des radiations sur les propriétés des fibres dopées erbium.

S. Girard [Girard 2003] a comparé les effets induits dans les fibres optiques dopées germanium ou phosphore monomodes et multimodes par des irradiations gamma à ceux liés à une insolation UV et a montré que les défauts créés par ces deux types de radiations sont similaires. La prédiction du comportement des fibres sous irradiation continue gamma à partir d'essai sous UV est donc possible. Afin de confronter ce constat au cas des fibres dopées erbium, nous avons testé également nos fibres sous insolation UV et comparé les mesures de luminescence acquises sur les échantillons irradiés gamma et ceux insolés UV dans le chapitre IV.

Pour compléter nos résultats, nous avons testé nos fibres en configuration d'amplificateur optique sous irradiation continue gamma. Les résultats obtenus avec cette configuration d'expérience sont présentés dans le chapitre V. Et pour finir, une conclusion rappelle tous les résultats.

Chapitre I. Les fibres optiques dopées erbium en environnement ionisant et les principaux défauts de la silice

| | | |
|----------|---|----|
| I.1. | INTRODUCTION | 21 |
| I.2. | PROPRIÉTÉS DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM ET APPLICATIONS | 22 |
| I.2.1. | Spectroscopie de l'ion : transitions et durée de vie | 23 |
| I.2.2. | Principe de l'amplificateur optique | 25 |
| I.3. | LES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM SOUS ENVIRONNEMENTS IONISANTS : ÉTAT DE L'ART ET OBJECTIFS DE LA THÈSE..... | 27 |
| I.3.1. | Les fibres dopées erbium soumises à des radiations gamma | 27 |
| I.3.2. | Les EDFAs soumis à des radiations gamma | 30 |
| I.3.3. | Les EDFLs soumis à des radiations gamma..... | 33 |
| I.3.4. | Objectifs de la thèse..... | 33 |
| I.4. | LES PRINCIPAUX DÉFAUTS DE LA SILICE PURE OU DOPÉE | 34 |
| I.4.1. | Défauts présents dans la silice pure..... | 34 |
| I.4.1.A. | <i>Les centres SiE'</i> | 35 |
| I.4.1.B. | <i>Les centres NBOHC (Non-Bridging Oxygen Hole Center)</i> | 36 |
| I.4.1.C. | <i>Les radicaux peroxy (POR)</i> | 38 |
| I.4.1.D. | <i>Les centres STH (Self Trapped Holes)</i> | 39 |
| I.4.1.E. | <i>Les centres Si-ODC</i> | 39 |
| I.4.2. | Les défauts liés à la présence de germanium..... | 40 |
| I.4.2.A. | <i>Les défauts Ge(1) et Ge(2)</i> | 40 |
| I.4.2.B. | <i>Le défaut GeE'</i> | 41 |
| I.4.2.C. | <i>Le centre Ge-NBOHC</i> | 41 |
| I.4.2.D. | <i>Le centre GeNOV</i> | 41 |
| I.4.2.E. | <i>Le centre GLPC ou Ge-ODC</i> | 42 |
| I.4.3. | Les défauts liés à la présence de phosphore..... | 42 |
| I.4.4. | Les défauts liés à la présence d'aluminium | 43 |
| I.5. | RÉSUMÉ..... | 44 |

I.1. Introduction

C'est dans les années 70 que les fibres optiques ont fait leur apparition dans le domaine des télécommunications en tant que support de transmission d'information. La technologie des fibres optiques, ainsi que celle des émetteurs et récepteurs, a permis de réaliser des liaisons optiques fiables et performantes [Desurvire 2004]. Même si au début des années 60, des solides dopés aux Terres-Rares ont permis de réaliser les premiers lasers optiquement excités dans le visible, c'est seulement dans les années 85-90 que les premières fibres optiques dopées Terres-Rares ont pu être fabriquées de façon fiable [Poole 1985]. L'intérêt évident que constituent ces nouvelles fibres actives pour les télécommunications optiques a provoqué un très fort engouement de la part des industriels et des équipes de chercheurs. En particulier, l'amplificateur à fibre optique dopée erbium (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier), fonctionnant dans la fenêtre des transmissions vers 1550 nm a révolutionné le domaine des télécommunications (cette fenêtre spectrale correspond au minimum d'atténuation de la silice qui est d'environ $0.15 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ à 1550 nm). Les fibres optiques dopées erbium sont également utilisées pour fabriquer des lasers à fibre émettant autour de 1550 nm [Mears 1986]. Des liaisons tout optique (émission des signaux porteurs d'information par une diode laser, transport des signaux par fibres optiques et amplification en ligne des signaux par des EDFAs) sont aujourd'hui possibles sur de très grandes distances (liaisons transocéaniques par exemple) et avec de hauts débits. Le débit véhiculé par une fibre optique ne cesse d'augmenter grâce aux multiplexage optique et aux progrès de l'électronique, des sources, des amplificateurs... En 1995, les premiers systèmes de multiplexage en longueur d'onde (W.D.M., Wavelength Division Multiplexing), ont permis de transporter $10 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ ($4 \times 2,5 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$) sur une seule fibre optique. En 2001, la capacité totale était de $400 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ ($40 \times 10 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$) sur une fibre et actuellement elle dépasse les $10 \text{ Tbits}\cdot\text{s}^{-1}$ [Abas 2007].

Les systèmes de transmission optique possèdent des avantages indéniables qui les rendent attractifs dans d'autres domaines que les télécommunications. Les EDFAs sont largement employés dans des applications terrestres et sous-marines en tant que répéteurs pour les transmissions longues distances et dans les réseaux de télécommunications fortement distribués [Desurvire 1994]. On les trouve ainsi utilisés dans des centrales nucléaires, des installations de production et de retraitement du combustible nucléaire, des sites de stockage de déchets radiatifs. L'ensemble de la chaîne du nucléaire civil se trouve impliqué. Dans ce domaine les fibres optiques sont rendues attractives par leur faible poids, leur taille réduite ainsi que leur grande capacité de transmission qui permettent une réduction considérable du câblage et donc une réduction du volume potentiel de déchets radioactifs. Leur immunité aux interférences électromagnétiques les rend aptes à véhiculer de l'information dans des environnements très perturbés comme le voisinage des réacteurs à fusion ou celui d'accélérateur de particules.

Par ailleurs, tout objet envoyé dans l'espace est soumis à des contraintes et plus particulièrement à la contrainte radiative due au rayonnement ionisant. En effet, un grand nombre de particules, de types et d'énergie divers, se trouvent dans l'espace et sont à l'origine de dégradations des

composants et de l'instrumentation au bord des véhicules spatiaux pour les raisons similaires à celles citées pour l'environnement nucléaire civil. Avec l'accroissement de l'utilisation d'Internet et de la télévision par satellite il est nécessaire que les équipements des nouveaux satellites soient de taille réduite, qu'ils consomment un minimum d'énergie et possèdent une grande bande passante [Taylor 1998]. De plus, les systèmes photoniques ont émergé comme une technologie clé pour les futurs satellites et véhicule spatiaux [Caussanel 2005]. Par ailleurs, les gyroscopes à fibres optiques ont montré leur très bonne compétitivité par rapport à des gyroscopes mécaniques de part leur légèreté, leur faible volume et leur grande précision. La source superluminescente employée dans les gyroscopes à fibre optique utilise les fibres dopées erbium [Boucher 1996, Guillaumond 2000]. Les dispositifs optiques à fibre, amplificateur optique et laser à fibre, sont alors de bons candidats pour les missions spatiales. Il s'avère ainsi nécessaire d'étudier les comportements et l'origine des dégradations subies par de tels dispositifs optiques avant de les utiliser dans un environnement ionisant.

I.2. Propriétés des fibres optiques dopées erbium et applications

Les fibres optiques dopées erbium sont utilisées dans les amplificateurs optiques ou des sources super-luminescentes. Du point de vue de la fabrication et des caractéristiques opto-géométriques, ces fibres ressemblent aux fibres optiques classiques utilisées dans le domaine des télécommunications. La principale différence réside dans l'ajout de co-dopants dans le cœur des fibres optiques. La matrice hôte des fibres optiques dopées Terres-Rares est fabriquée à partir des mêmes verres que ceux utilisés pour la fabrication des fibres optiques. La préforme est en général fabriquée par la méthode MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition).

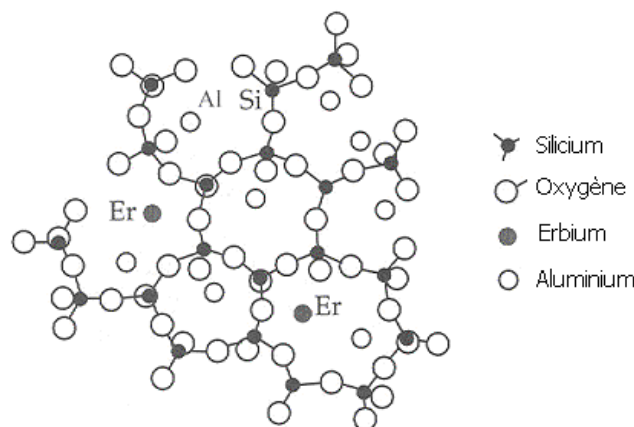


Figure I-1 : Répartition des ions Al^{3+} et Er^{3+} dans une matrice silice [Becker 1999]

En plus des dopants classiques, comme le germanium, le phosphore, on ajoute de l'aluminium pour la réalisation de la préforme de la fibre destinée à contenir des Terres-Rares. L'ajout de cet élément permet de modifier le réseau de la matrice hôte, et créer ainsi des sites pour accueillir les ions erbium (Figure I-1). Ces derniers sont incorporés à la fin du dépôt permettant la réalisation du cœur de la préforme. L'absence d'aluminium dans la composition du cœur entraîne une précipitation

de la Terre-Rare sous forme d'agrégats, entraînant une extinction de la luminescence (quenching) préjudiciable au bon fonctionnement de la source fibrée [Digonnet 1994, Davis 1995]. L'augmentation de la concentration de l'aluminium entraîne également l'élargissement de la bande de luminescence autour de 1550 nm de l'erbium utilisée pour l'amplification dans le domaine des télécommunications [Berneschi 2005].

I.2.1. Spectroscopie de l'ion : transitions et durée de vie

L'élément erbium fait partie de la famille des Terres-Rares, appelée également les Lanthanides. Dans le tableau de Mendeleïev (Figure I-2), les Lanthanides portent les numéros atomiques allant du 58 au 71, l'erbium a le numéro 68. La configuration électronique des Terres-Rares est de la forme suivante :



où N est le nombre d'électrons de la couche 4f et varie entre 1 et 14 selon la Terre Rare. Seuls trois Terres-Rares (le cérium, le gadolinium et le lutécium) ont en plus un électron dans la sous-couche 5d. La particularité de cette famille réside dans le fait que les sous-couches 5s² et 5p⁶ sont complètes et c'est la couche électronique profonde 4f qui est incomplète. Cette répartition électronique écarte les électrons de la sous-couche 4f optiquement actifs et les transitions électroniques entre les sous-niveaux de cette couche ne sont ainsi que modérément affectées par l'introduction de l'atome dans une matrice hôte. Autrement dit, les spectres d'émission et d'absorption d'une Terre-Rare incorporée dans une matrice hôte gardent les principales caractéristiques de la Terre-Rare libre et ne sont que peu affectés par l'environnement.

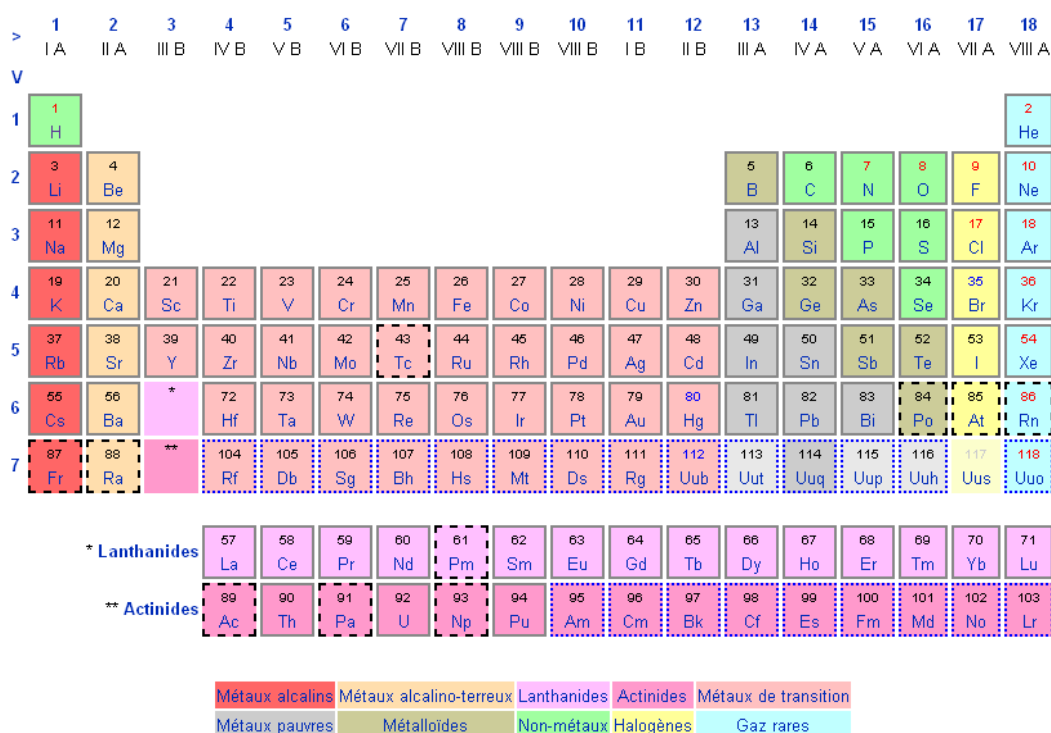


Figure I-2 : Tableau périodique des éléments.

Sous sa forme trivalente, l'ion erbium perd les deux électrons de la couche 6s et un de la couche 4f [Becker 1999, Digonnet 2001]. Par contre, les électrons des couches 5s² et 5p⁶ demeurent et servent d'écran à ceux de la couche 4f siège des transitions intraconfigurationnelles. Dans cette configuration électronique, l'état fondamental est caractérisé par un moment cinétique de spin $S = 3/2$ et le moment cinétique orbital $L = 6$ correspondant au niveau d'énergie le plus bas $^4I_{15/2}$. Lorsqu'un ion Terre-Rare est placé dans une matrice hôte, il subit différents champs électriques dus à la présence des atomes voisins. La résultante de ces champs électriques est le champ cristallin subi par l'ion Terre-Rare. Le champ cristallin provoque la levée partielle de la dégénérescence des niveaux énergétiques $^{2S+1}L_J$ en sous-niveaux Stark. Les niveaux énergétiques se décomposent en $J+1/2$ sous-niveaux Stark (J est un $1/2$ entier). La matrice hôte, via le champ cristallin, conditionne l'écart énergétique des sous-niveaux. La Figure I-3 représente schématiquement des levées de dégénérescence successives pour un niveau énergétique donné.

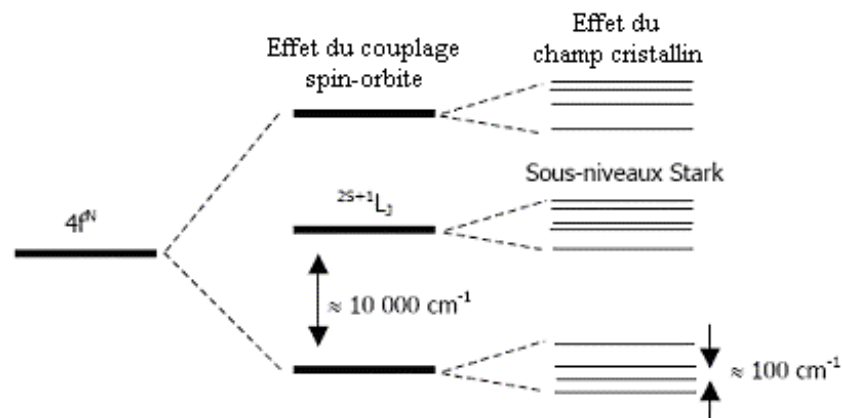


Figure I-3 : Représentation schématique des levées de dégénérescence successives du niveau énergétique $4f^n$.

La Figure I-4 présente les premiers niveaux énergétiques de l'ion erbium [Desurvire 1994]. Sur cette figure sont également reportées les longueurs d'onde d'absorption entre certains niveaux énergétiques de l'erbium.

Chaque niveau énergétique de l'erbium peut être excité et possède une durée de vie qui lui est propre. La durée de vie d'un même niveau peut varier en fonction de la matrice hôte de l'ion. Le niveau de l'erbium présentant la plus grande durée de vie est le niveau métastable $^4I_{13/2}$; sa durée de vie est de l'ordre de quelques ms. Dans la Table I-1 sont reportées différentes valeurs de durées de vie de ce niveau pour différentes matrices vitreuses [Berker 1999, et références incluses] et on constate que selon le type de matrice hôte, les durées de vie peuvent avoir de grandes différences. Le passage d'une matrice tellurite à une matrice silicate peut passer la durée de vie respectivement de 4 ms à plus de 14 ms.

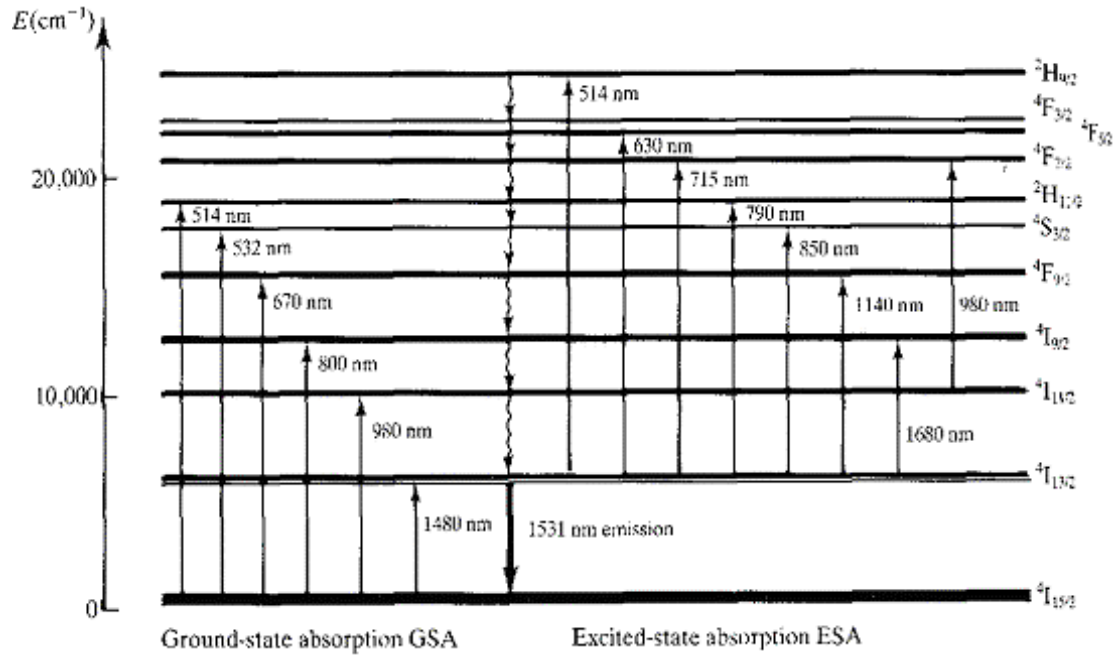


Figure I-4 : Diagramme d'énergie de l'ion Er^{3+} , avec les longueurs d'ondes d'absorption depuis l'état fondamental (GSA, ground state absorption) et depuis l'état excité ou métastable $^4I_{13/2}$ (ESA, excited state absorption) [Desurvire 1994]

| Matrice hôte | Durée de vie (ms) |
|-----------------------|-------------------|
| Na-K-Ba-silicate | 14 |
| ED-2 (silicate) | 12 |
| Silicate | 14.7 |
| Silicate L-22 | 14.5 |
| Al-P silica | 10.8 |
| Al-Ge silica | 9.5 - 10 |
| Na-MG-phosphate | 8.2 |
| LGS-E (phosphate) | 7.7 |
| LGS-E7 (phosphate) | 7.9 |
| Phosphate | 8.5 - 10.7 |
| Fluorophosphate | 8.0 |
| Fluorophosphate (L11) | 8.25 |
| Fluorophosphate (L14) | 9.5 |
| Ba-La-borate | 8.0 |
| Na-K-Ba-Al-germanate | 6.5 |
| Fluoride | 10.3 |
| Fluorozirconate F88 | 9.4 |
| Tellurite | 4 |

Table I-1 : Durée de vie du niveau $^4I_{13/2}$ de l'ion erbium dans différentes matrices vitreuses [Becker 1999]

I.2.2. Principe de l'amplificateur optique

Les fibres optiques dopées erbium sont utilisées dans les amplificateurs optiques et les lasers à fibres optiques comme milieu actif propice à une inversion de population. En effet, le niveau métastable $^4I_{13/2}$ de l'erbium possède une durée de vie relativement longue. En pompant la fibre à 980 nm, les ions erbium sont excités dans le niveau $^4I_{11/2}$. Depuis ce niveau, une partie des ions se désexcite de façon non radiative sur le niveau $^4I_{13/2}$ (Figure I-5) permettant, sous pompage adéquat,

de réaliser une inversion de population correspondant à une population du niveau ${}^4I_{13/2}$ supérieure à celle du niveau ${}^4I_{15/2}$.

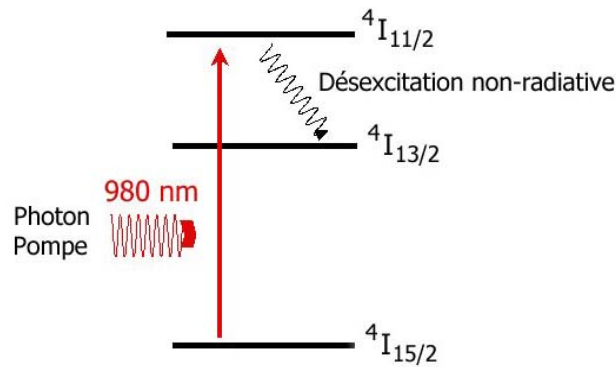


Figure I-5 : Mécanisme d'inversion de population d'un ion Er^{3+} sous pompage à 980 nm

Cette inversion de population est à la base du principe de l'amplificateur optique. Une fois cette inversion réalisée, le signal injecté dans la fibre autour de 1550 nm stimule la transition ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (Figure I-6) et se trouve de cette manière amplifié.

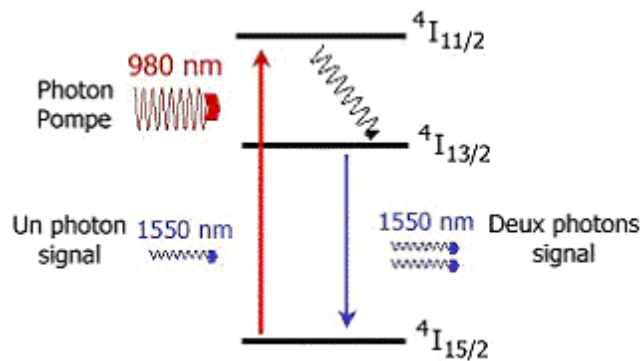


Figure I-6 : Processus de désexcitation dans un laser à fibre erbium, (a) désexcitation spontanée, (b) désexcitation stimulée

Un amplificateur optique est constitué de différents éléments (Figure I-7) : on utilise un multiplexeur pour injecter à la fois la pompe et le signal dans la fibre dopée erbium, les isolateurs imposent à la lumière un seul sens de passage et ont pour rôle de protéger les émetteurs. Des coupleurs permettent de prélever le signal pour contrôler le gain de l'amplificateur en réglant la puissance de pompe.

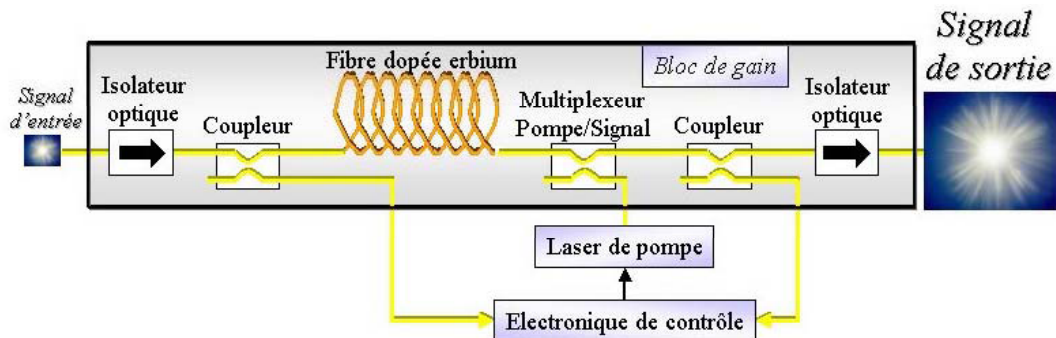


Figure I-7 : Structure d'un EDFA

I.3. Les fibres optiques dopées erbium sous environnements ionisants : Etat de l'art et objectifs de la thèse

Les fibres optiques conventionnelles, utilisées pour les télécommunications, ont fait l'objet de plusieurs études [Griscom 1993, Griscom 1994, Nagasawa 1984, Dianov 1995, Girard 2003...] afin de tester leur comportement dans divers environnements radiatifs : Gamma, flash X, UV, Neutron, Proton. La tenue à ces rayonnements a été mesurée pendant et après l'irradiation. L'atténuation linéique de ces fibres est altérée et présente une dépendance aussi bien en fonction de la dose déposée¹ que du débit de dose².

Griscom *et al.* [Griscom 1993, Griscom 1994] ont proposé un modèle empirique pour ajuster la dépendance des pertes induites permanentes A dans des fibres optiques par rapport à la dose déposée D. Ce modèle est une loi en puissance :

$$A(D) = c.D^f \quad (\text{Eq. I-1})$$

où c et f sont les paramètres d'ajustement. Ce modèle a été repris et amélioré dans de très nombreuses études sur la tenue des fibres aux radiations. Une partie de ces études traite de l'origine microscopique de l'atténuation induite³ par les différents types de radiations [Girard 2003]. Ainsi plusieurs centres optiquement actifs présentant des bandes d'absorption aussi bien dans le visible que dans l'UV et l'infrarouge ont été identifiés et leurs mécanismes de formation et de transformation déterminés [Skuja 1998, Girard 2003] ; les principaux centres seront présentés par la suite.

Pour les fibres optiques dopées Terres-Rares, très peu d'études traitent des effets de l'ultraviolet. L'ensemble de la littérature disponible sur ce sujet a montré la présence d'une atténuation induite plus élevée dans les fibres dopées Erbium que dans celles non-dopées.

I.3.1. Les fibres dopées erbium soumises à des radiations gamma

Lewis *et al.* [Lewis 1992] ont soumis différentes fibres dopées erbium à un rayonnement gamma. Les fibres testées présentent des niveaux de dopage en erbium similaires mais sont différemment co-dopées : aluminium (0 – 5 mol%), germanium (10 – 25 mol%) et phosphore (0 – 1 mol%). Suite aux irradiations, ces auteurs ont confirmé le rôle de l'aluminium dans l'augmentation des pertes induites. La présence de ce dopant est le principal facteur de l'augmentation de l'atténuation induite par irradiation dans les fibres dopées erbium. Les pertes induites de l'EDFA sont de l'ordre du dB pour une dose déposée de 40 à 50 Gy⁴. Pour des liaisons sous-marines, la dose reçue par an est de l'ordre de 5 mGy, le niveau de pertes induites reste donc marginal.

¹ Quantité d'énergie déposée dans le matériau

² Flux de l'énergie déposée

³ Atténuation additionnelle due aux radiations

⁴ Le gray (symbole Gy) est la dose d'énergie absorbée par un milieu homogène d'une masse d'un kilogramme lorsqu'il est exposé à un rayonnement ionisant apportant une énergie d'un joule, 1 Gy = 1 J·kg⁻¹. On précise entre parenthèse le matériau utilisé, Gy(Si) est l'unité de dose de radiation absorbée par 1 kg de silicium.

Fukuda *et al.* [Fukuda 1994] ont consacré une étude à la mesure de pertes induites par irradiation gamma en fonction du débit de dose ($0.15 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, $1 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, $10 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$), dans des fibres différemment dopées aluminium (0 – 3 wt%). Les mesures d'absorption pré- et post-irradiation montrent que les changements liés directement à l'erbium sont négligeables. Les pertes dues à la présence de l'aluminium sont très importantes dans l'UV et le visible et présentent une queue d'absorption qui s'étend jusqu'au proche infrarouge. Ces pertes $A_{\text{post-irr}}$ présentent une guérison suivant la loi :

$$A_{\text{post-irr}}(t) = \sum_i a_i \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) + B \quad (\text{Eq.I-2})$$

où t est le temps écoulé après la fin de l'irradiation, τ_i la constante de temps caractérisant le déclin de la $i^{\text{ème}}$ composante, a_i des constantes caractérisant la contribution de la composante i et B la constante traduisant les pertes permanentes. Le premier terme correspond aux composantes des pertes transitoires et B représente les pertes permanentes. Le suivi des pertes permanentes en fonction de la dose totale montre une différence significative entre les fibres contenant de l'aluminium et celles qui n'en contiennent pas. Les fibres dopées Al présentent des pertes permanentes plus importantes. La prédiction des pertes d'EDFA opérant en environnement sous-marin, à faible débit de dose ($5 \text{ mGy}\cdot\text{an}^{-1}$) reste rassurante ; après 25 ans les pertes induites seraient de 0.3 dB. De plus les spectres de gain d'un EDFA après irradiation ne montrent pas de changement aux longueurs d'onde autour de 1550 nm, ce qui est avantageux pour les applications multi-longueurs d'onde.

Williams *et al.* [Williams 1996] ont étudié les effets de radiations typiques du domaine spatial sur deux fibres commerciales dopées erbium. Les fibres utilisées dans un tel environnement sont exposées à une dose totale d'électrons et de protons équivalente à 2 kGy sur une période de 10 ans, soit en débit de dose $23 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Pour leur étude, les auteurs ont soumis différents échantillons, provenant de deux fibres dopées erbium ayant des concentrations d'erbium différentes, à des protons et à des rayons gamma. Ils ont utilisé le même débit de dose pour les deux types de radiations ($660 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) et déposé une dose totale de 2 kGy. Pour les rayons gamma ils ont également utilisé un débit de dose plus faible ($30 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) que le premier. Pour chaque irradiation, ils ont mesuré l'atténuation induite des fibres à trois longueurs d'ondes différentes : 980 nm la longueur d'onde de pompe pour un amplificateur, 1300 nm qui représente la réponse de la matrice hôte puisque l'erbium ne présente pas d'absorption à cette longueur d'onde, et enfin 1550 nm la longueur d'onde du signal dans un amplificateur. En comparant les résultats de ces deux fibres, ils ont constaté que la réponse sous irradiation n'évolue pas en fonction de la concentration en erbium mais en fonction de la concentration d'autres constituants présents dans le cœur de la fibre. Par ailleurs la comparaison entre l'irradiation aux protons et l'irradiation gamma ne laisse pas apparaître de différence de pertes induites pour une même longueur d'onde et une même fibre ; les protons et les rayons gamma ont les mêmes effets sur les fibres dopées erbium, offrant ainsi la possibilité de simuler les effets des protons par une irradiation gamma. Ils ont également modélisé les réponses sous irradiation et les guérisons

des fibres avec des modèles déjà existants. L'étude de ces fibres en fonction de la dose déposée D montre que l'atténuation induite obéit à une loi en puissance décrite par l'équation I-1. L'ensemble des résultats obtenus conduit à une valeur de l'exposant f égale à 0.8. Ce paramètre est donc indépendant du type de radiation, de la longueur d'onde de mesure, du débit de dose et de la concentration en erbium montrant une fois de plus que l'atténuation induite n'est pas due à des défauts liés à l'erbium. Pour les mesures de guérison, le modèle qui a donné un bon accord avec les mesures expérimentales est une somme de trois exponentielles décroissantes (Eq.1-2). Ce genre de modèle surestime les valeurs des pertes lors de la guérison pour les faibles débits de dose. Les auteurs ont remarqué que l'atténuation induite mesurée est plus faible lorsque la fibre est active, autrement dit quand l'amplificateur est en fonctionnement pendant l'irradiation.

Henschel *et al.* [Henschel 1998] ont étudié le comportement sous irradiation gamma de dix-huit fibres optiques avec différentes Terres-Rares (Nd, Ho, Yb, Pr, Gd, Sm, Er, La) et différentes concentrations de Terres-Rares et autres dopants présents dans les fibres (Al, Ge, P). Les pertes induites ont été mesurées avec un OTDR⁵ aux deux longueurs d'onde suivantes : 830 nm et 1312 nm. Une des difficultés de cette étude vient du fait que les fibres n'ont pas été fabriquées spécialement pour ces expériences mais venaient d'un reste de stock de deux fabricants de fibres optiques. Les fibres ont été fabriquées avec des paramètres différents (température, vitesse de fibrage), ce qui influe sur la sensibilité⁶ des fibres vis à vis des radiations [Hanafusa 1986, Hanafusa 1987, Lyons 1989, Girard 2006]. De plus les fibres ont des concentrations différentes en Aluminium, Germanium et Phosphore, ce qui engendre une difficulté supplémentaire pour tirer des conclusions des résultats expérimentaux. Dans leur étude, Henschel *et al.* confirment que la concentration en Terres-Rares a une influence négligeable sur les pertes induites sous irradiation gamma, et que la concentration en Al a une plus grande influence ; les pertes augmenteraient avec la concentration en Al. Ils ont également ajusté leurs résultats moyennant le modèle proposé par Griscom [Griscom 1993] (Eq.I-1) où l'atténuation induite A est décrite en fonction de la dose totale D reçue par la fibre

Ahrens *et al.* [Ahrens 1999] ont étudié les pertes d'une fibre optique co-dopée erbium et ytterbium utilisée dans un système de communication laser. Ils ont tout d'abord observé l'existence d'une relation linéaire entre les pertes induites et la dose totale reçue par la fibre. Ils ont observé la croissance de deux bandes d'absorption : l'une dans l'ultraviolet due aux défauts liés au silicium et l'autre centrée à 1600 nm liée au phosphore. Ils ont observé un effet de débit de dose sur des pertes induites. Leurs résultats suggèrent l'existence d'un seuil à partir duquel les pertes induites augmenteraient avec le débit de dose. La guérison G des pertes induites a été mesurée à différentes températures, elle peut être ajustée par la fonction suivante :

$$G(t) = k.T.\ln(\beta t) \quad (\text{Eq.I-3})$$

⁵ Optical Time Domain Reflectometer

⁶ C'est l'atténuation induite ramenée à l'unité de dose, en $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$

où k est la constante de Boltzmann, T la température en Kelvin, t le temps et β un paramètre d'ajustement. Ils ont également montré que l'effet du débit de dose sur les pertes peut être analysé avec la technique de « Courbe maîtresse », développée à l'origine pour l'analyse des réseaux de Bragg [Kannan 1999].

Brichard *et al.* [Brichard 2003] ont irradié sous rayons gamma trois fibres optiques : deux contenant de l'erbium, la première avec une faible concentration d'Er et un co-dopage avec de l'azote, la deuxième possédant une plus forte concentration d'Er, d'azote et de fluor en co-dopants, la troisième ne contenant pas d'erbium mais seulement de l'aluminium. L'accroissement de la sensibilité des deux fibres erbium est similaire sur tout le domaine spectral étudié (800 – 1700 nm), ce qui indique que la concentration d'erbium affecte uniformément les longueurs d'ondes de signal (1550 nm) et de pompe (980 nm). La sensibilité induite par les radiations n'est pas directement proportionnelle à la concentration d'erbium. De plus pour les longueurs d'ondes supérieures à 900 nm, la fibre non dopée Er montre une sensibilité induite plus faible que les fibres dopées erbium. Ils ont conclu que l'ajout de l'aluminium, comme co-dopant, ne contribue pas significativement à l'atténuation dans la région de la longueur d'onde de pompe (980 nm). En général l'atténuation induite par radiations est 5 à 10 fois plus petite dans le domaine 1400 – 1600 nm, le pompage à 1480 nm au lieu de 980 nm semble préférable dans un amplificateur à fibre optique utilisé pour des applications spatiales. Par ailleurs l'irradiation des fibres à 60°C au lieu de 30°C contribue à augmenter la durée de vie de 10% au maximum. Cela est dû à un effet de température lors d'irradiation : l'augmentation de la température permet une guérison d'une partie des défauts induits par l'irradiation.

Van Uffelen *et al.* [Van Uffelen 2003] ont mesuré spectralement les pertes induites d'une fibre optique dopée Erbium commercialisée par Corning (Er1550C[®]) sous plusieurs débits de dose. Leurs résultats montrent un très faible effet de débit de dose et une croissance pratiquement linéaire de l'atténuation induite en fonction de la dose. Comme déjà mentionnée dans d'autres publications, l'atténuation induite peut être ajustée par la loi en puissance donnée par l'équation I-1, où l'exposant f est très proche de 1. Les auteurs ont également réalisé des mesures de luminescence post-irradiation afin de déterminer l'origine de ces pertes induites : ils en ont conclu que les ions erbium ne sont pas affectés par les irradiations gamma mais que des modifications au sien de la matrice hôte seraient responsables de ces pertes induites.

I.3.2. Les EDFAs soumis à des radiations gamma

Williams *et al.* [Williams 1992, Williams 1992 bis] ont étudié les variations de l'absorption induite par l'irradiation en fonction de la composition de la fibre et modélisé les performances d'un EDFA. Ils ont montré que les pertes induites deviennent plus importantes lorsqu'on introduit de l'aluminium dans la composition de la fibre.

Simpson *et al.* [Simpson 1993] ont étudié l'impact des irradiations sur les performances des amplificateurs en fonction de la longueur d'onde de pompage optique. Ils ont ainsi montré que pour les trois pompages à 514 nm, 980 nm et 1480 nm, seules les performances du dernier restent peu affectées par l'irradiation ; les plus fortes pertes induites apparaissant pour le pompage à 514 nm et pour les hautes doses d'irradiation gamma. Les travaux de Williams et al. [Williams 1992, Williams 1992 bis] donnent le même résultat : les pertes induites dans un EDFA sont moins importantes s'il est pompé à 1480 nm plutôt qu'à une longueur d'onde moins grande (980 nm ou 800 nm).

Williams et Friebele [Williams 1998] ont étudié les performances d'un EDFA en fonctionnement sous irradiation gamma et comparé les résultats à ceux obtenus pour une fibre dopée erbium. L'atténuation induite a été ajustée moyennement la loi :

$$A(\dot{D}, D) \propto \dot{D}^{(1-f)} D^f \quad (\text{Eq.I-4})$$

où \dot{D} est le débit de dose, D la dose totale et $f = 1 - \frac{kT}{E_0}$, k la constante de Boltzmann, T la température en Kelvin et E_0 une énergie caractéristique du système (paramètre du modèle à ajuster). Les auteurs ont un bon accord entre des données expérimentales et les ajustements, ce modèle peut donc être utilisé pour prédire les pertes induites d'un EDFA utilisé dans un environnement spatial.

Taylor *et al.* [Taylor 1998] ont irradié quatre EDFAs en utilisant deux débits de doses et en déposant deux doses différentes (seuls les blocs d'amplification ont été irradiés, alors que l'électronique et les sources de pompage étaient placées en zone non irradiée). Ils ont ainsi pu évaluer les pertes permanentes induites par l'irradiation en fonction des paramètres d'irradiation. Ils ont conclu que les dommages induits à l'EDFA sont dépendants du débit de dose et attribuent l'atténuation induite à la création de centres colorés⁷. Les défauts ainsi générés affectent l'EDFA de deux façons différentes :

- Les photons de pompe sont en partie absorbés par les centres colorés conduisant à la réduction de la densité effective de l'énergie du pompage optique.
- Les photons du signal amplifié peuvent également être absorbés par les centres colorés réduisant par là-même le gain de l'amplificateur.

Rose *et al.* [Rose 2001] ont effectué des mesures de gain et de facteur de bruit d'EDFAs soumis à des radiations gamma et protons en mode actif (en configuration d'amplificateur) et des mesures de transmission en mode passif (mesures faites périodiquement pendant l'irradiation). Ils ont comparé ces deux types de radiations pour confirmer l'équivalence entre les rayons gamma (rayonnement couramment utilisé pour tester des composants) et les protons (rencontrés en particulier par des composants fonctionnant dans l'espace). D'après leurs mesures, à doses équivalentes, les rayons

⁷ Modifications ponctuelles du réseau conduisant à la formation d'un défaut optiquement actif

gamma et les protons créent une quantité comparable de centres colorés dans les fibres irradiées. Leurs tests montrent que l'utilisation des rayons gamma pour simuler des protons énergétiques présents dans un environnement spatial est correcte. Ils ont également remarqué que la sensibilité des fibres co-dopées erbium et aluminium est inversement proportionnelle au niveau de dopage en germanium de celles-ci. Quant à la fibre dopée au lanthane, elle présente les plus grandes pertes induites parmi les six fibres testées. Les mesures réalisées de façon passive ont montré un plus haut niveau de pertes que les mesures réalisées de façon active. Ces résultats suggèrent que pour les fibres fonctionnant comme amplificateur, les effets des radiations sont réduits par une guérison optique : le photoblanchiment. De plus, les dégradations de la performance d'un EDFA sont attribuées en premier lieu à l'absorption induite par radiation à la longueur d'onde de pompe (980 nm).

Caussanel [Caussanel 2004] a tout d'abord discuté dans une brève analyse les effets des rayonnements qui règnent dans l'espace au voisinage de la Terre sur les composants optoélectroniques qu'il avait à tester (EDFA, Fibre à réseaux de Bragg, connecteurs à lentilles, ...). Il en conclut que ces effets se traduisent par une ionisation due aux photons gamma. Son étude a montré que l'élément le plus sensible d'un EDFA lors d'une irradiation reste la fibre optique dopée erbium. Ses pertes induites sont environ 40 fois plus importantes que celles d'une fibre non-amplificatrice. Il a noté de surcroît que la dégradation de la fibre est proportionnelle à la quantité d'aluminium présente dans la fibre. Dans un EDFA, l'Emission Spontanée Amplifiée (ASE) est plus affectée que le gain. En effet, la puissance de ces deux signaux se répartit différemment le long de la bobine amplificatrice et la majeure partie de la puissance de l'ASE croit dans les derniers mètres de la fibre erbium alors que la puissance de pompage est majoritairement absorbée sur les premiers mètres de fibre. La première partie de la fibre est alors davantage protégée par le photoblanchiment apporté par le pompage optique. Il en a conclu que la configuration la plus robuste pour un amplificateur destiné à fonctionner en environnement radiatif est celle d'un pompage bidirectionnel à 980 nm, c'est-à-dire à la fois co- et contra-propagatif⁸.

Dans leur étude publiée en 2005, Caussanel *et al.* [Caussanel 2005] ont repris le modèle de Williams et Friebele [Williams 1998] qu'ils ont adapté pour la prédiction des pertes induites du gain d'un EDFA en environnement spatial. Ils ont ainsi proposé la loi ci-dessous (Eq.I-5) permettant de déterminer l'atténuation induite par extrapolation pour des doses cinq fois plus grandes que celles réellement reçues par la fibre lors des tests.

$$A(\lambda) = \frac{(1310 - \lambda_0)^2}{(\lambda - \lambda_0)^2} \times c \dot{D}^{1-f} D^f \quad (\text{Eq.I-5})$$

où A est l'atténuation induite en dB, \dot{D} le débit de dose, D la dose totale et λ la longueur d'onde utile à l'amplification (980 nm et 1550 nm). c , f et λ_0 sont des paramètres dont les valeurs sont extraites des données expérimentales. Ce même modèle permet aussi d'estimer les pertes induites à faibles

⁸ Co-propagatif : dans le même sens que le signal à amplifier et Contra-propagatif : dans le sens inverse.

débats de dose ($5 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ et $1.5 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$). En revanche, un débit de dose de test 10 fois plus grand que le débit de dose final surestime l'atténuation induite. Pour un environnement spatial ($\dot{D} = 5 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$), les dégradations d'un EDFA ont été estimées à 0.2 dB de perte pour une dose totale de 140 Gy. Sachant que cette valeur est légèrement surestimée, cela garantit que ce genre d'équipement peut faire face à l'environnement radiatif spatial, durant une mission de 10 ans.

I.3.3. Les EDFLs soumis à des radiations gamma

Bussjager *et al.* [Bussjager 2001] ont étudié le comportement d'un laser à fibre optique dopée erbium (EDFL) exposé à une dose totale de rayon gamma de 10 kGy. La caractérisation du laser a été effectuée avant et après l'irradiation. Leur étude a porté sur tous les composants du laser : la diode de pompe, les lentilles, le multiplexeur de longueur d'onde (WDM) 980/1550 nm, l'absorbeur saturable monté sur un miroir en or, la fibre optique dopée erbium et les fibres contenant des réseaux de Bragg. Comme cela a déjà été rapporté dans des publications antérieures, Bussjager a constaté que la fibre optique dopée erbium constitue l'élément le plus sensible aux radiations et que les pertes sont dues aux mêmes causes que dans l'amplificateur optique.

I.3.4. Objectifs de la thèse

De manière générale, tous ces travaux vont dans le même sens : l'élément le plus sensible d'un amplificateur ou d'un laser à fibre dopée erbium sous environnement gamma est la fibre dopée erbium elle-même. Les tests de la tenue aux radiations de ces fibres ont été réalisés en mode passif et actif et ont montré des niveaux de pertes induites non-négligeables pour des applications civiles et spatiales. L'étude détaillée des fibres dopées erbium est donc un point clé pour un bon fonctionnement d'un EDFA ou d'un laser à fibre en environnement ionisant. En revanche la littérature disponible sur le sujet ne traite pas de la nature des défauts formés ou transformés lors de l'irradiation comme c'est le cas pour les fibres sans erbium. Par exemple, pour ces dernières fibres les mécanismes de formation de défauts liés aux phosphores ont été déterminés par les travaux de D.L. Griscom *et al.* [Griscom 1983] et de S. Girard [Girard 2003]. Des phénomènes de conversion entre des centres colorés liés à la silice ont été mis en évidence par D.L. Griscom et M. Mizuguchi à partir de l'évolution de l'absorption optique [Griscom 1998]. Atkins *et al.* [Atkins 1993] ont proposé un modèle donneur-accepteur pour expliquer l'influence de différents co-dopants sur une luminescence bleue générée par des défauts lors de l'insolation UV d'une fibre germanosilicate. De façon certaine, nous pouvons dire que les centres colorés sont aussi responsables des dégradations des performances des fibres optiques dopées erbium en environnement radiatif. En revanche, il reste à déterminer la nature des défauts générés lors de l'irradiation et les mécanismes de leur formation. L'un des objectifs de cette thèse est donc de caractériser le comportement des fibres optiques dopées erbium en cherchant à répondre à ces deux points pour des fibres optiques dopées erbium soumises à différents

types de radiations ionisantes (rayonnement gamma, rayonnement X pulsés, protons, rayonnement UV).

De plus, la qualité et la fabrication des fibres commerciales ont évolué depuis les premières études et leurs tenues aux radiations nécessitent d'être d'examiner à nouveau. Plus particulièrement nous étudierons l'évolution, avant et après irradiation, des propriétés optiques de l'ensemble matrice hôte – luminophore que constitue la fibre.

I.4. Les principaux défauts de la silice pure ou dopée

L'atténuation induite par irradiation observée au sein des fibres optiques est due à la création de défauts absorbants, appelés également centres colorés. Dans ce paragraphe nous présentons les principaux défauts ponctuels rencontrés dans la silice amorphe pure ou dopée (germanium, phosphore, aluminium). Ces défauts ponctuels ont été largement étudiés dans le passé et les différentes études menées ont permis l'attribution d'une grande partie des bandes d'absorption ou de luminescence à différents centres colorés [Skuja 1998]. Malgré une littérature abondante dans le domaine, certaines questions ne sont pas encore totalement élucidées. La présentation des défauts faite ici n'est pas exhaustive et se limite aux principaux défauts rencontrés. Elle se base sur des bilans bibliographiques déjà réalisés [Stoneham 1975, Deparis 1997, Goutaland 1998, Van Uffelen 2001, Borgermans 2001, Girard 2003, Médjahdi 2005].

I.4.1. Défauts présents dans la silice pure

La silice constituant les fibres optiques ne présente un ordre qu'à faible distance : environ quelques liaisons atomiques. A plus grande échelle la silice amorphe ne présente pas de symétrie de translation et peut être assimilée à une structure aléatoire, à la différence par exemple du quartz qui est la forme cristalline la plus répandue de SiO_2 . La structure de base de la silice est constituée d'un atome de silicium Si et de quatre atomes d'oxygène O (Figure I-8). Ces quatre atomes d'oxygène forment un tétraèdre et l'atome de silicium se situe au centre de ce tétraèdre.

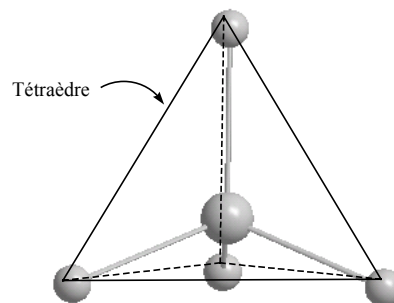


Figure I-8 : Tétraèdre de base de la structure de la silice, 4 atomes d'oxygène aux sommets et 1 atome de silicium au centre

I.4.1.A. Les centres SiE'

Le centre SiE' fait partie de la famille des centres déficitaires en oxygène. Ce centre est caractérisé par un trou piégé sur un site d'oxygène vacant, donnant lieu à un électron non apparié dans une orbitale hybride de type sp^3 d'un atome de silicium lié à trois atomes d'oxygène (Figure I-9).

Une bande d'absorption lui est attribuée dans l'ultraviolet, elle se situe autour de 212 nm (5.85 eV) [Griscom 1991]. Nishikawa *et al.* [Nishikawa 1990] ont corrélié l'intensité de cette bande d'absorption avec le signal RPE (Résonance Paramagnétique Electronique) associé.

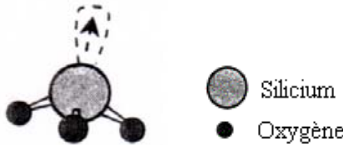


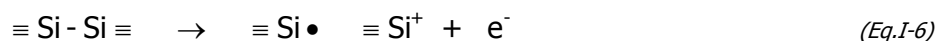
Figure I-9 : Représentation du centre SiE'

Ce centre est symboliquement représenté par $\equiv\text{Si}\bullet$ où \equiv représente les trois liaisons Si-O et \bullet marque la présence de l'électron non apparié. Lors de la formation de ce défaut, la structure autour de l'atome de silicium passe d'une configuration tétraédrique à une configuration planaire.

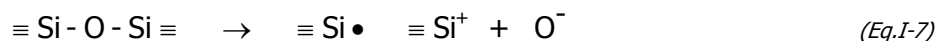
Ce défaut peut apparaître lors du fibrage de la préforme de la fibre optique. Les différences de viscosité entre le cœur de la fibre et la gaine optique et les fortes tensions sont à l'origine de la formation de ce défaut.

Plusieurs mécanismes de formation du centre SiE' ont été proposés [Griscom 1991] :

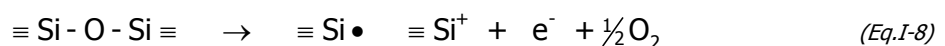
- Il peut provenir du piégeage d'un trou par une lacune d'oxygène. Dans ce schéma le SiE' résulte de la transformation d'un autre défaut ponctuel $\equiv\text{Si-Si}\equiv$ jouant le rôle de précurseur et dû à la présence d'une lacune neutre d'oxygène.



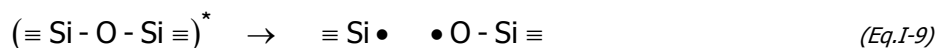
- Le SiE' peut également provenir du déplacement d'un ion oxygène par élimination d'une liaison pontante normale :



- Il peut y avoir formation de centres SiE' par évaporation d'oxygène lors de l'étirage de la fibre. L'efficacité de ce mécanisme de formation dépend des paramètres de fibrage :



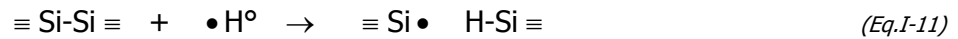
- Il peut aussi résulter de la rupture d'une liaison pontante normale sous contrainte mécanique (défaut ponctuel préexistant et symbolisé par * dans l'équation ci-dessous) avec la formation simultanée d'un autre centre coloré, un NBOHC (cf. plus loin) :



- Les impuretés présentes dans la silice sous forme de radicaux libres liés à un atome de silicium (-Cl, -H, -OH) peuvent conduire à la formation de centre SiE' par libération radiolytique de radical (exemple avec le Chlore Cl) :



- Enfin, la diffusion d'atome d'hydrogène radiolytique peut entraîner la formation de ces centres SiE' selon la réaction chimique :



Il est à noter qu'il existe différentes variétés de défaut SiE' noté E'_α, E'_β et E'_γ représentées sur la Figure I-10 [Griscom 1985, Skuja 1998]. Les centres E'_α et E'_β sont très instables à température ambiante mais peuvent être mis en évidence après une irradiation gamma à faible niveau de dose (< 10³ Gy). Les centres E'_γ sont quant à eux très stables à température ambiante.

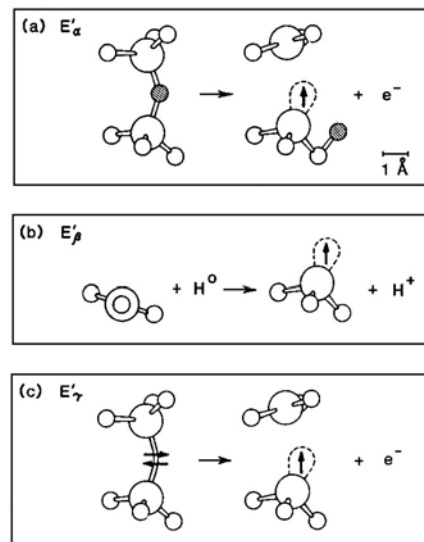


Figure I-10 : Modèles proposés pour la formation des trois variantes du centre E' d'après [Griscom 1985]

I.4.1.B. Les centres NBOHC (Non-Bridging Oxygen Hole Center)

Le centre NBOHC consiste en un trou piégé par un atome d'oxygène ne possédant qu'une seule liaison avec un atome de silicium (Figure I-11). Le trou piégé se trouve sur une orbitale de type 2p [Griscom 1991, Skuja 1998]. Il est représenté schématiquement, en utilisant les mêmes notations que dans le paragraphe précédent, par : $\equiv \text{Si} - \text{O} \bullet$.

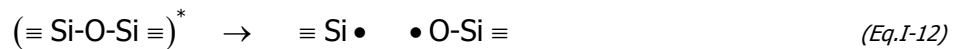


Figure I-11 : Représentation du centre NBOHC

L'identification des bandes d'absorption de ce défaut reste controversée ; le plus souvent lui est attribuée une bande d'absorption autour de 620 nm (2 eV) [Nagasawa 1986, Griscom 1991]. La position du maximum de cette bande varie selon le mécanisme à l'origine de formation de ces centres. Elle est comprise selon les cas entre 590 nm et 630 nm. Silin *et al.* [Silin 1978] et Neustruev [Neustruev 1991] attribuent aussi aux NBOHC une bande d'absorption dans l'ultraviolet. Pour Silin *et al.*, elle se situe autour de 260 nm (4.77 eV) et pour Neustruev autour de 275 nm (4.51 eV). Néanmoins, une bande de luminescence autour de 650 nm dans la silice irradiée est attribuée de façon unanime à ce défaut [Griscom 1991, Suzuki 2003].

On relève trois mécanismes de formation des NBOHC dans la littérature :

- Le premier est basé sur la rupture d'une liaison pontante Si-O-Si par l'application d'une contrainte mécanique [Griscom 1991, Munekuni 1991] tel que le fibrage de la préforme par exemple. Comme déjà mentionné précédemment, un centre SiE' se crée en même temps. La position du maximum d'absorption pour le NBOHC ainsi généré est estimée à 619 nm (2.004 eV) [Munekuni 1990].



- Le deuxième mécanisme de formation met en jeu la radiolyse d'un groupement OH [Munekuni 1990, Griscom 1991]. Ce mécanisme est fortement privilégié dans les fibres optiques dites « mouillées », c'est à dire les fibres optiques ayant une forte concentration de radicaux hydroxyles OH. Lorsque les centres NBOHC sont créés par ce processus, la bande d'absorption associée est centrée autour de 590 nm (2.102 eV) [Munekuni 1990].



- Le troisième mécanisme de création de ces défauts se rencontre dans les fibres optiques riches en oxygène et est basé sur la rupture d'une liaison peroxyde ($\equiv \text{Si-O-O-Si} \equiv$) sous irradiation [Munekuni 1990]. Dans ce cas, le centre de la bande d'absorption est localisé autour de 628 nm (1.975 eV) [Munekuni 1990].



I.4.1.C. Les radicaux peroxy (POR)

Le radical peroxy peut être considéré comme un atome de silicium associé à une molécule d'oxygène. Un spin non apparié est délocalisé sur les deux atomes d'oxygène (Figure I-12). Les deux atomes d'oxygène ne sont équivalents ni d'un point de vue chimique ni d'un point de vue physique. L'électron passe 75% de son temps sur l'atome d'oxygène le plus éloigné de l'atome de silicium et 25% sur l'autre atome d'oxygène. Sa représentation symbolique est la suivante, toujours avec les mêmes notations que précédemment : $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}\bullet$.

Aucune bande d'absorption n'a pu être affectée aux POR de façon certaine. Shelby [Shelby 1980] a corrélé l'évolution thermique des POR avec une bande d'absorption autour de 163 nm (7.6 eV), alors que Hosono et Weeks [Hosono 1990] ont attribué aux POR une bande d'absorption centrée autour de 260 nm (4.77 eV). Griscom et Mizuguchi [Griscom 1998] lui ont dernièrement assigné une bande centrée vers 620 nm dans la silice irradiée. Le fait que plusieurs bandes d'absorption coexistent autour de 260 nm et 620 nm complique leur affectation à un seul type de défaut.

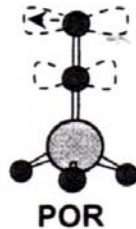
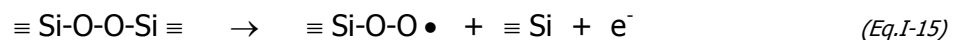


Figure I-12 : Représentation du radical peroxy

Plusieurs mécanismes de formation pour les POR ont été proposés dans la littérature.

- Comme pour les centres SiE' et les centres NBOHC, des radicaux peroxy apparaissent lors de l'étirage de la fibre optique. Leur présence est mise en évidence par des mesures de RPE [Griscom 1985 bis, Hanafusa 1987] et ils seraient créés selon le schéma :



Ce mécanisme de formation serait également à l'origine de l'apparition des POR lors d'une irradiation gamma [Griscom 1991, Griscom 1998].

- D'autres études [Griscom 1991, Neustruev 1991] ont mis en évidence la génération possible des POR par une réaction entre une molécule d'oxygène interstitielle et un défaut SiE' selon la réaction suivante :



- Griscom et Mizuguchi [Griscom 1998] ont mené des études thermiques qui ont montré que la disparition des centres NBOHC est corrélée à l'augmentation de la concentration des POR. L'un des mécanismes proposés est une recombinaison d'un centre NBOHC avec un atome d'oxygène interstitielle, comme suit :



I.4.1.D. Les centres STH (Self Trapped Holes)

Les centres STH ont pour caractéristique de posséder un atome d'oxygène lié à deux atomes de silicium et autour duquel gravite un trou capturé sur une orbitale 2p (Figure I-13). On distingue deux formes de STH :

- Soit le trou est localisé sur un atome d'oxygène pontant, il est nommé STH₁ et sa notation symbolique est : $\equiv \text{Si} - \ddot{\text{O}} - \text{Si} \equiv$
- Soit le trou est délocalisé sur deux atomes d'oxygène appartenant au même tétraèdre SiO₄, il est nommé STH₂ et sa représentation symbolique est : $\equiv \text{Si} - \text{O} \cdot - \text{O} - \text{Si} \equiv$

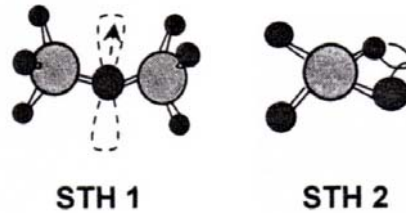


Figure I-13 : Représentation des centres STH

Ces centres sont instables à température ambiante. Par contre le centre STH₁ est stable en dessous de 180 K et le centre STH₂ est stable en dessous de 140 K. Plusieurs bandes d'absorption leur sont attribuées : 520 nm [Sasajima 2003], 660 nm, 760 nm [Griscom 1997, Griscom 2004] et 1800 nm [Chernov 1989].

I.4.1.E. Les centres Si-ODC

La notation ODC (Oxygen Deficient Center) est utilisée pour parler des défauts déficitaires en oxygène. On place devant cette abréviation l'atome qui porte la déficience en oxygène, ici c'est un atome de silicium. On distingue deux types de Si-ODC.

- *Les centres Si-ODC(I) ou SiNOV*

Les centres Si-ODC(I) ou SiNOV (Si Neutral Oxygen Vacancy) consistent en une liaison covalente entre deux atomes de silicium chacun lié à trois atomes d'oxygène (Figure I-14). Sa représentation symbolique est la suivante (toujours avec les mêmes notations que précédemment) : $\equiv \text{Si} - \text{Si} \equiv$.



Figure I-14 : Représentation des centres Si-ODC(I)

Une bande d'absorption leur est attribuée : elle est localisée à 163 nm (7.6 eV) [Tohmon 1989].

- *Les centres Si-ODC(II) ou SLPC*

Les centres Si-ODC(II) ou SLPC (Si Lone Pair Center) sont constitués d'un atome de silicium lié seulement à deux atomes d'oxygène (Figure I-15). Sa représentation symbolique est la suivante, toujours avec les mêmes notations que précédemment : =Si••. Le symbole •• représente une paire d'électrons non appariés et localisés sur la même orbitale.

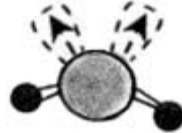


Figure I-15 : Représentation des centres Si-ODC(II)

Une bande d'absorption vers 248 nm (5 eV) est attribuée à ces centres. Deux bandes de luminescence sont également attribuées à ces centres : l'une vers 290 nm (4.3 eV) et l'autre 460 nm (2.7 eV) [Skuja 1992].

I.4.2. Les défauts liés à la présence de germanium

I.4.2.A. Les défauts Ge(1) et Ge(2)

Les centres Ge(1) et Ge(2) ont des structures peu différentes l'une de l'autre. Le centre Ge(1), également appelé GEC (Germanium Electron Center), est constitué d'un atome de germanium, ayant capturé un électron, lié à quatre atomes d'oxygène. Dans sa deuxième sphère de coordination, cet atome de germanium possède quatre atomes de silicium. Le centre Ge(2) est identique au Ge(1) sauf que cette sphère de coordination contient trois atomes de silicium et un atome de germanium. Ces deux centres sont représentés dans la Figure I-16. Cependant, la structure du Ge(2) ne fait pas l'unanimité dans la littérature. Un autre modèle est proposé par Fujimaki *et al.* [Fujimaki 1998] : il correspondrait à un GLPC (Ge Long Pair Center) ionisé (cf. I.4.2.E).

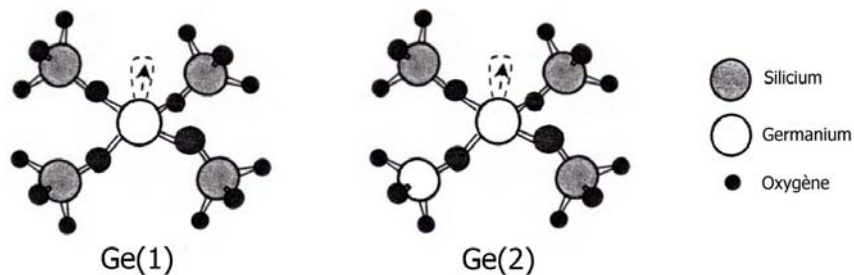


Figure I-16 : Représentation des défauts Ge(1) et Ge(2)

Deux bandes d'absorption ont été attribuées à ces centres : l'une au Ge(1) autour de 282 nm et l'autre au Ge(2) centrée autour de 214 nm [Friebele 1986, Fujimaki 1998].

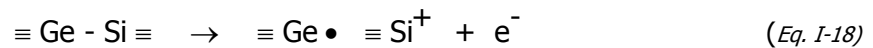
I.4.2.B. Le défaut GeE'

Ce défaut a une structure similaire au centre SiE'. Le centre GeE', ou Ge(3), est constitué d'un atome de germanium lié à trois atomes d'oxygène et d'un trou piégé sur le site d'un oxygène vacant (Figure I-17). Ce centre présente une bande d'absorption à 197 nm (6.3 eV) [Hosono 1996].



Figure I-17 : Représentation du centre GeE'

La principale réaction chimique créant ce type de défaut est analogue à celle de l'équation I-6, mais en mettant en jeu un atome de germanium et un atome de silicium au lieu de deux atomes de silicium [Friebele 1986]:



I.4.2.C. Le centre Ge-NBOHC

Le centre Ge-NBOHC (Germanium Non-Bridging Oxygen Hole Center) est similaire au centre NBOHC et consiste en un trou piégé par un atome d'oxygène ne possédant qu'une seule liaison avec un atome de germanium au lieu d'un atome de silicium (Figure I-18). Une bande de luminescence centrée à 674 nm (1.84 eV) est attribuée à ce centre [Skuja 1996]. Ces mêmes auteurs prédisent l'existence d'une bande d'absorption centrée à 620 nm (2 eV).



Figure I-18 : Représentation du centre Ge-NBOHC

I.4.2.D. Le centre GeNOV

Le centre GeNOV (Ge Neutral Oxygen Vacancy) présente une déficience en oxygène entre un atome de silicium et un atome de germanium (Figure I-19). Il est noté : $\equiv \text{Si} - \text{Ge} \equiv$. Une bande d'absorption centrée vers 245 nm a été attribuée à ce défaut par H. Hosono et al. [Hosono 1992].

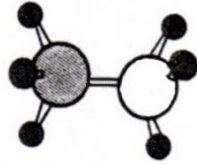


Figure I-19 : Représentation du centre GeNOV

I.4.2.E. Le centre GLPC ou Ge-ODC

Le centre GLPC (Ge Long Pair Center) ou Ge-ODC (Ge Oxygen Deficient Center) consiste en un atome de germanium lié à seulement deux atomes d'oxygène (Figure I-20). Il est noté de la façon suivante : =Ge••.

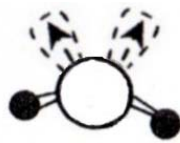


Figure I-20 : Représentation de centre GLPC

Ses premiers états excités sont donnés par le diagramme énergétique ci-dessous (Figure I-21). Les premières transitions $S_1 \rightarrow S_0$ et $T_1 \rightarrow S_0$ de ce défaut sont à l'origine de deux bandes de luminescence : l'une à 290 nm et l'autre à 400 nm respectivement [Skuja 1992].

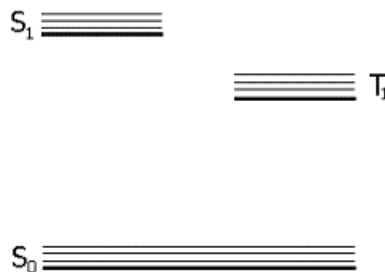


Figure I-21 : Représentation des niveaux énergétiques des GLPC

I.4.3. Les défauts liés à la présence de phosphore

L'introduction de phosphore, même en très faible quantité (< 1%) dans une fibre optique peut générer plusieurs types de défauts. Griscom *et al.* [Griscom 1983] ont identifié quatre défauts distincts associés au phosphore : le centre P_1 qui correspond à la structure PO_3^{2-} , le centre P_2 qui est associé à la structure PO_4^{4-} , le centre P_3 (également appelé POHC, Phosphorus Oxygen Hole Center) qui est associé à PO_4^{2-} , et le centre P_4 qui correspond au radical $PO_2^{\cdot-}$. La Figure I-22 montre les différents mécanismes de formation de ces quatre défauts, ainsi que leur représentation symbolique.

On constate que le centre P_1 possède une structure analogue aux centres SiE' (I.4.1.A) et GeE' (I.4.2.B). Son influence est importante dans les fibres optiques destinées aux applications télécoms puisqu'il présente une bande d'absorption centrée à 1600 nm, c'est à dire dans la fenêtre de transmission des télécommunications. Il existe également deux types de centres POHC selon que le spin non apparié est localisé sur un seul ou sur les deux atomes d'oxygène. La première variante est cependant beaucoup moins stable que la seconde. Les centres POHC sont responsables de plusieurs bandes d'absorption dans l'ultraviolet et le visible : 240 nm, 400 nm, 510 nm et 570 nm [Griscom 1983]. Les centres P_2 et P_4 absorbent quant à eux dans l'ultraviolet, autour de 260 nm et 270 nm [Griscom 1983].

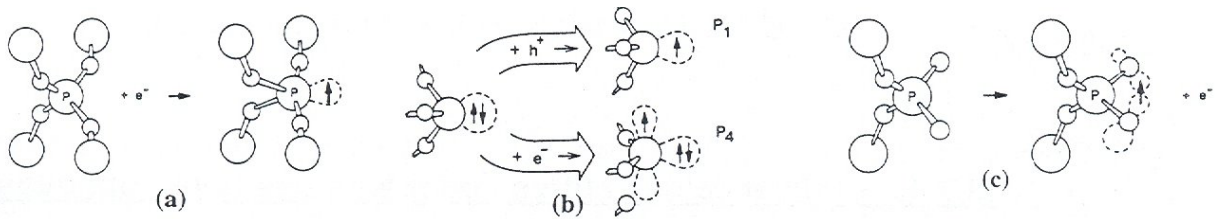


Figure I-22 : Mécanismes de formation de défauts associés au phosphore, (a) le centre P_2 , (b) les centres P_1 et P_4 , (c) le centre P_3 [Griscom 1983]

I.4.4. Les défauts liés à la présence d'aluminium

Trois types de défauts induits par irradiation et liés à la présence de l'aluminium dans une matrice vitreuse de silice ont été identifiés [Amosov 1982]. Ces auteurs ont répertorié de la façon suivante les centres colorés induits par irradiation :

- Al(I) : ce centre coloré consiste au remplacement d'un atome Si par un atome de Al avec une compensation ionique⁹ dans une région où la matrice a une structure de type quartz cristallin. Deux bandes d'absorption sont attribuées à ce défaut, l'une centrée à 400 nm et la seconde centrée à 600 nm. Sous traitement thermique, les maximums de ces deux bandes d'absorption se décalent vers 450 nm et 700 nm respectivement avant de disparaître.
- Al(II) : dans ce centre, un atome de Al remplace également un atome de Si avec une compensation ionique mais dans une région où la matrice vitreuse est un réseau similaire à celui des verres alcalisilicate. Une bande d'absorption est attribuée à ce centre avec un maximum autour de 550 nm. Pour ce centre également, le traitement thermique est à l'origine d'un déplacement du maximum mais cette fois vers les courtes longueurs d'onde pour se retrouver à 520 nm.

⁹ La compensation ionique correspond à l'addition d'une charge pour maintenir la neutralité électrique du milieu. En effet dans le cas du remplacement de l'atome de Si par un atome de Al, de valence de +3, qui nécessite une compensation de charge [Leyderman 1999].

- Al(III) : pour ce centre également, un atome de Si est remplacé par un atome de Al, par contre dans ce cas il n'y a pas de compensation ionique. Il serait possible que ce centre présente une bande d'absorption avec un maximum autour de 520 nm.

I.5. Résumé

Les fibres optiques dopées erbium sont des composants clés pour les télécommunications optiques. Il est nécessaire de connaître leur comportement dans des environnements radiatifs tels que l'espace ou certains domaines du nucléaire du civil (réacteur, accélérateur de particules ...). Comme le montre l'état de l'art de ce chapitre (§ I.3), plusieurs travaux ont été consacrés à la mesure de l'atténuation induite par radiation dans ce type de fibre, mais ils ne traitent pas de la nature des défauts responsables de ces pertes induites. Dans les fibres non dopées aux Terres-Rares, plusieurs défauts et leurs mécanismes de formation et de transformation ont été identifiés. Ces défauts sont soit intrinsèques comme les SiE', le NBOHC, soit extrinsèques et liés à un dopant en cœur ou en gaine, comme le POHC ou le GeE'. Ces différents défauts sont également créés par une irradiation de la silice dopée ou non. Fort de la connaissance de ces défauts dans la silice sans erbium, l'un des objectifs de cette thèse est d'identifier leur contribution à la dégradation lors de l'irradiation des fibres dopées erbium. Dans ce chapitre nous avons répertorié certaines propriétés de l'erbium et donné le fonctionnement de l'amplificateur optique à fibre dopée (EDFA). Les chapitres suivants de ce travail de thèse traitent de l'impact de l'irradiation sur des fibres dopées erbium à travers la formation et la transformation de certains de ces défauts.

Chapitre II. Environnements radiatifs - méthodes de caractérisation et fibres utilisées

| | |
|--|----|
| II.1. ENVIRONNEMENTS RADIATIFS, PARTICULES, RAYONNEMENTS ET SOURCES D'IRRADIATION UTILISÉES | 47 |
| II.1.1. Particules et rayonnements utilisés | 48 |
| II.1.2. Source d'irradiation gamma et installation des fibres optiques | 49 |
| II.1.3. Source d'irradiation X et installation des fibres optiques | 51 |
| II.1.4. Source d'irradiation proton et installation des fibres optiques | 52 |
| II.1.5. Insolation UV des fibres optiques | 53 |
| II.2. CARACTÉRISATION DES PERTES INDUITES SOUS IRRADIATION | 54 |
| II.2.1. Caractérisation de l'évolution temporelle et spectrale des pertes induites dans des fibres optiques lors d'une irradiation continue gamma | 54 |
| II.2.1.A. <i>Transmission dans le proche IR</i> | 54 |
| II.2.1.B. <i>Excitation à 980 nm et 1480 nm</i> | 55 |
| II.2.2. Caractérisation de l'évolution temporelle des pertes induites dans les fibres optiques sous irradiation avec des rayons X pulsés | 56 |
| II.2.3. Caractérisation de l'évolution temporelle et spectrale des pertes induites des fibres optiques lors d'une irradiation continue aux protons | 57 |
| II.2.3.A. <i>Excitation à 980 nm</i> | 57 |
| II.2.3.B. <i>Montage utilisant une source superluminescente</i> | 57 |
| II.2.4. Caractérisation d'amplificateurs optiques à fibres dopées erbium sous irradiation continue gamma | 58 |
| II.3. ANALYSES PRÉ- ET POST-IRRADIATION DES FIBRES OPTIQUES | 59 |
| II.3.1. Spectroscopie de luminescence | 59 |
| II.3.1.A. <i>Microspectroscopie de luminescence</i> | 60 |
| II.3.1.B. <i>Mesure de luminescence dans l'infrarouge</i> | 61 |
| II.3.2. Mesure de durée de vie | 62 |
| II.3.3. Mesure d'absorption | 62 |
| II.4. CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM ÉTUDIÉES | 63 |
| II.5. RÉSUMÉ | 63 |

Dans la section II.1 de ce chapitre, nous présentons les différents environnements radiatifs et les sources de rayonnements utilisées lors des travaux de cette thèse ainsi que les conditionnements des fibres pendant les irradiations. Dans la section II.2, nous décrivons les dispositifs expérimentaux utilisés pour les mesures de sensibilités des fibres optiques dopées erbium et pour les mesures de gain et de facteur de bruit des EDFA avant, pendant et après leurs expositions à des radiations ionisantes.

En section II.3, nous détaillons les bancs de caractérisation utilisés pour mesurer la réponse spectrale des fibres optiques avant et après irradiation. Les mesures effectuées sur les fibres sont réalisées avec des échantillons vierges et irradiés provenant de la même souche de fibre optique.

Nous donnons, en section II.4, les principales caractéristiques des fibres optiques dopées erbium utilisées.

II.1. Environnements radiatifs, particules, rayonnements et sources d'irradiation utilisées

Pour définir un environnement radiatif, il convient de connaître le type et l'énergie des particules ou des rayonnements (X , γ , neutrons, ions lourds...), la quantité d'énergie déposée dans le matériau cible (la dose) et la vitesse à laquelle cette énergie est déposée (le débit de dose). Dans la Figure II-1 les doses et les débits de dose extrêmes de quelques environnements radiatifs permettent d'avoir une idée des ordres de grandeurs rencontrés dans ces environnements radiatifs.

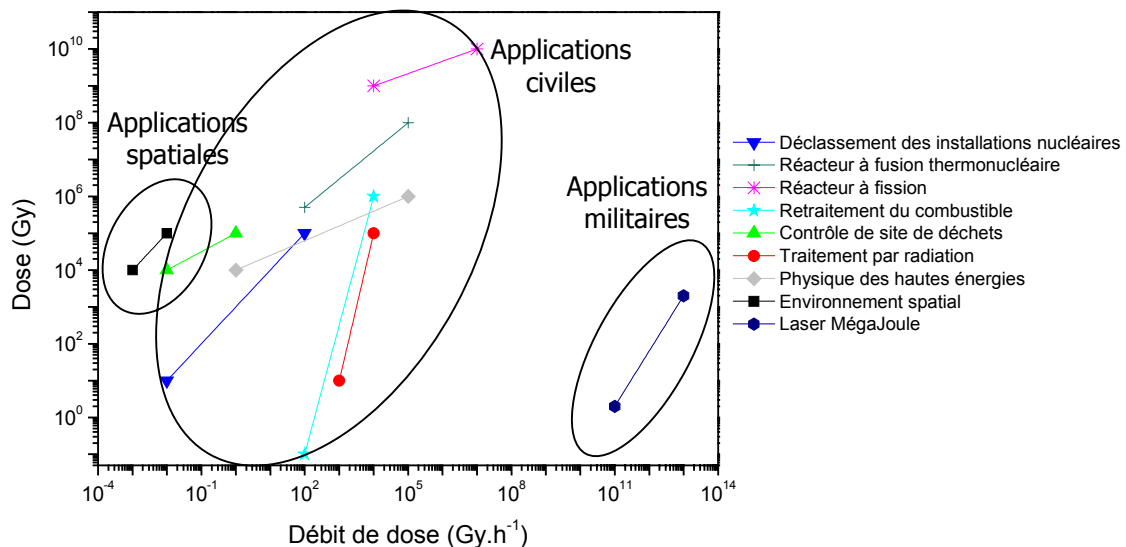


Figure II-1 : Différents environnements radiatifs en fonction de leur dose et de leur débit de dose (figure inspirée de [Van Uffelen 2000])

L'environnement militaire est caractérisé par des niveaux faibles de dose déposés (< 1 kGy) mais des débits de dose extrêmement élevés (> 1 MGy \cdot s⁻¹). L'environnement spatial est, quant à lui, caractérisé par des niveaux de dose déposés importants (quelques dizaines de kGy) mais des débits de dose extrêmement faibles ($< 10^{-4}$ Gy \cdot s⁻¹). L'environnement du nucléaire civil et la physique des

hautes énergies sont caractérisés par des niveaux variables de dose déposée mais des débits de dose faibles par rapport aux applications militaires. Dans le cadre de cette thèse nous nous intéresserons essentiellement aux environnements spatiaux et civils.

Les particules et les rayonnements que l'on rencontre dans l'espace au voisinage de la terre ou simplement au voisinage d'un réacteur (ou autre source de radiations) peuvent être de natures différentes. Les rayonnements cosmiques rencontrés dans l'espace sont corpusculaires (électrons, protons, noyaux lourds) ou photoniques (rayons γ , X, ultraviolets, visibles, infrarouges). Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux rayons γ , X ainsi qu'aux protons qui font partie de la catégorie des rayonnements ionisants.

II.1.1. Particules et rayonnements utilisés

Les rayons gamma possèdent une longueur d'onde très courte, inférieure à 5 pm et sont donc les plus énergétiques (> 0.25 MeV). Ils sont très pénétrants et notamment plus pénétrants que les rayonnements alpha (particules constituées de deux protons et deux neutrons) et les rayonnements bêta (électrons issus d'une désintégration bêta), mais sont moins ionisants. Pour se donner un ordre d'idée, les particules alpha sont arrêtées par une simple feuille de papier tandis que les électrons sont stoppés par une feuille d'aluminium. Les rayons gamma, quant à eux, sont amortis lors de la traversée de la matière dense et ne sont arrêtés qu'au bout de plusieurs mètres de béton, par exemple.

Les rayons X sont une forme de rayonnements électromagnétique à haute fréquence issus de transitions électroniques vers des niveaux mettant en jeu des électrons profonds, dont la longueur d'onde se situe dans une plage de quelques pm à quelques nm. Leur énergie va de quelques centaines d'eV, à plusieurs centaines de keV. La distinction entre les rayons X et les rayons gamma (qui sont de même nature) vient de leur mode de production : les rayons X sont des photons produits par des transitions entre niveaux électroniques provoquées en général par la collision d'un atome avec un électron à haute vitesse, alors que les rayons gamma sont produits par des transitions nucléaires au sein des noyaux d'atomes. Comme il est possible pour certaines transitions électroniques d'être plus énergétiques que des transitions nucléaires, il existe un certain chevauchement entre les rayons X de haute énergie et les rayons gamma de faible énergie.

Les protons sont des particules de charge électrique positive, numériquement égale à celle de l'électron, mais de masse 1836 fois plus grande que ce dernier. Les protons avec les neutrons (de masse voisine et de charge nulle) sont les deux constituants du noyau où se concentre presque toute la masse de l'atome. On les appelle les nucléons. Le proton constitue à lui seul le noyau de l'atome le plus simple, l'atome d'hydrogène, le plus abondant dans l'Univers. La cohésion du noyau est assurée par une interaction dite nucléaire forte, qui piège les nucléons dans un volume très restreint, quelques 10^{-45} m³, tout en dominant la répulsion électrostatique entre les protons. Cette force assure la stabilité de nombreux noyaux. Une énergie de liaison considérable se libère lorsque les protons et les neutrons

se combinent pour former un noyau ; mécanisme de fusion nucléaire. Elle est à la base des bombes dite H, et de l'activité stellaire. Les protons constituent en effet une partie essentielle du combustible des étoiles.

Chacun de ces trois types de rayonnements a été utilisé pour tester le comportement des fibres dopées erbium. Pour avoir accès à des sources de rayonnements gamma, rayonnements X ou protons nous avons travaillé en collaboration avec deux grands centres de recherche : le SCK·CEN en Belgique et le CEA en France. Nous allons maintenant décrire les sources d'irradiations utilisées ainsi que le conditionnement des fibres optiques pour les irradiations.

II.1.2. Source d'irradiation gamma et installation des fibres optiques

Les irradiations continues gamma ont été réalisées au SCK·CEN, le centre de l'Etude de l'Energie Nucléaire, à Mol en Belgique. La source d'irradiation utilisée est la source dénommée RITA (Radio Isotope Test Arrangement). Cet équipement d'irradiation est constitué de quatre sources de cobalt 60 disposées autour d'un conteneur dans lequel sont installés les échantillons à tester [Fernandez Fernandez 2002]. Toute cette installation est plongée dans une piscine d'eau de dix mètres de profondeur (Figure II-2). L'énergie des photons est d'environ 1 MeV.

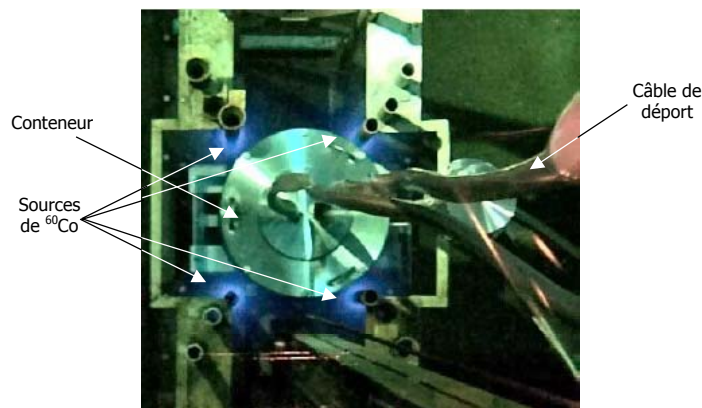


Figure II-2 : Installation de la source RITA [Fernandez Fernandez 2002]

Les échantillons de fibres optiques sont connectés à des bretelles de déport. Ces dernières sont des câbles de fibres optiques protégés de l'eau et longs de plus d'une dizaine de mètres. Ils permettent de véhiculer le signal transmis par les échantillons en dehors de la piscine, dans la zone protégée des irradiations. Dans ce câble de déport, des lignes électriques reliées à un thermocouple permettent le contrôle de la température au niveau des échantillons lors de l'irradiation.

La dose reçue varie en fonction de la position des échantillons à tester dans le conteneur. Dans la partie supérieure du conteneur (partie qui se trouve au-dessus des sources de ^{60}Co) la dose déposée peut varier de quelques $\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ jusqu'à environ $450 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$. Alors que dans la partie inférieure (c'est à dire la partie se situant au niveau des sources de ^{60}Co), la dose est de plusieurs $\text{kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ (Figure II-3).

Pour chacune des mesures réalisées sous irradiation gamma, les fibres optiques ont été installées dans la partie supérieure du conteneur de façon à toujours recevoir une dose comprise entre 30 et 45 Gy·h⁻¹, seuls les appareils de mesures changent d'une expérience à une autre.

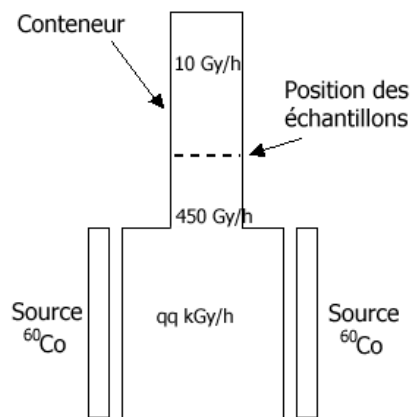


Figure II-3 : Représentation schématique du conteneur de RITA et de sa position vis-à-vis des sources de ⁶⁰Co

La dose déposée est estimée par des dosimètres de type « Red Perspex ». Ces dosimètres sont fabriqués à partir d'un matériau sensible aux radiations : le PolyMethylMethAcrylate (PMMA). Des morceaux de ce matériau sont scellés hermétiquement et individuellement dans des sachets stratifiés. Lorsque ce matériau est irradié, il noircit. Après l'irradiation et à l'aide d'un spectromètre, on mesure l'assombrissement du matériau qui est fonction de la dose de radiation absorbée. Ce type de dosimètre peut mesurer une dose totale variant de 5 à 50 kGy avec une précision de 10% [Berghmans 2001].

Les fibres optiques dopées erbium sous tests sont préalablement soudées de chaque côté à des jarretières de fibres monomodes standards connectées en FC/PC. La fibre dopée erbium est bobinée sur un diamètre de 5 cm et est connectée à un raccord FC/PC installé sur un support allant dans la partie supérieure du conteneur d'irradiation (Figure II-4 et Figure II-5).

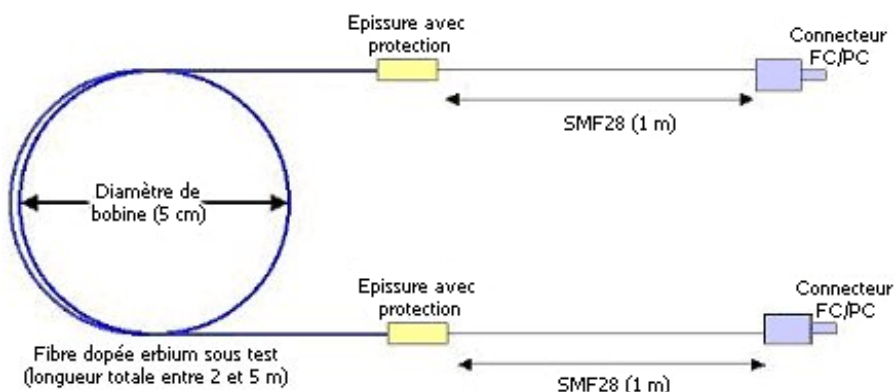


Figure II-4 : Mise en place d'un échantillon de fibre dopée erbium sous test

De l'autre côté du raccord FC/PC, sont connectées les bretelles de déport permettant de ramener le signal dans la zone d'instrumentation où se trouvent tous les appareils de mesures et les

opérateurs. Ces bretelles sont également des fibres optiques monomodes standards du type Corning® SMF28.

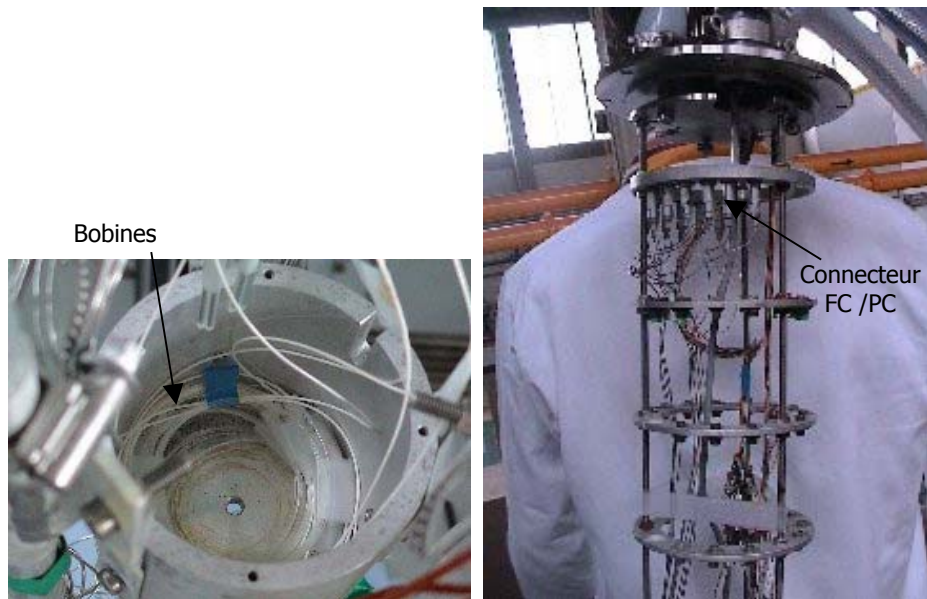


Figure II-5 : Photos de l'installation des bobines sous test dans le support allant dans la partie supérieure du conteneur, à gauche les bobines positionnées à une hauteur choisie pour recevoir une dose totale déterminée préalablement, à droite le support allant dans le conteneur avec les connexions de fibres

II.1.3. Source d'irradiation X et installation des fibres optiques

Les irradiations X pulsées ont été réalisées avec le générateur Astérix du Centre d'Etude de Gramat (DGA) [Johan 1989]. Les rayons utilisés ont une énergie d'environ 1 MeV. Les irradiations ont été réalisées avec un débit de dose supérieur à $10^6 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$. Chaque pulse est d'environ 35 ns. La zone d'essais est formée de deux grandes parties distinctes séparées par un épais mur de protection : une zone d'instrumentation et une zone d'irradiation. L'ensemble des moyens de mesure non-durcis aux radiations ainsi que les chercheurs doivent se situer dans la cage de Faraday constituant la zone d'instrumentation afin d'être protégés des importantes perturbations électromagnétiques générées lors d'une impulsion de photons X.

Les échantillons sous test se présentent sous la forme de bobines de fibre de 1 m de longueur enroulée sur un diamètre de 6 cm. A chaque extrémité de la bobine, deux jarretières connectorisées FC-PC ont été soudées et protégées par des gaines polymères, de la même façon que pour les irradiations gamma (Figure II-4). Les jarretières sont constituées de fibre Corning SMF28 et ne sont pas soumises à l'irradiation. Les bobines sont placées dans l'axe du générateur Astérix. La distance entre celles-ci et le générateur de photons X est ajustée en fonction de la dose totale visée. Les bobines de fibres optiques sont connectées, à l'aide de raccords FC-PC / FC-PC, à des bretelles de fibres optiques traversant le mur de protection entre les deux zones (20 m). Ces bretelles permettent de déporter l'ensemble des appareils de mesure dans la cage d'instrumentation.

Pour les essais sous rayonnement X, trois types de dosimètre ont été utilisés :

- des dosimètres thermoluminescents (TLD) de type Li₂B₄O₇:Mn. La mesure de dosimétrie est effectuée juste après l'essai à l'aide d'un lecteur de dosimètre. L'incertitude liée à cette mesure est estimée à $\pm 20\%$.
- une photodiode placée dans l'axe du générateur (nettement plus loin que les échantillons sous test) permet d'avoir une indication sur la dose déposée en temps réel.
- des diodes rapides 1N4148 permettent de connaître la forme et l'amplitude de l'impulsion.

II.1.4. Source d'irradiation proton et installation des fibres optiques

Les irradiations continues aux protons ont été réalisées avec l'installation d'irradiation TRIUMF à Vancouver, au Canada [Blackmore 2000]. Les irradiations ont été effectuées à deux énergies distinctes : 50 MeV et 105 MeV. Elles sont obtenues par dégradation du faisceau primaire de 116 MeV en utilisant une plaque de plastique d'épaisseur appropriée. Les estimations calculées de la longueur de pénétration dans la silice donnent pour les protons de 50 MeV et 105 MeV 11 mm et 40 mm respectivement. Le conditionnement des fibres sous test diffère de celui utilisé pour les deux premiers types d'irradiation. Pour être certain qu'une fibre entière soit exposée uniformément au faisceau de protons, l'échantillon, soudé à des jarretières de fibres monomodes standards (SMF28) connectés en FC/PC, est enroulé en spirale sur un cône (Figure II-6).

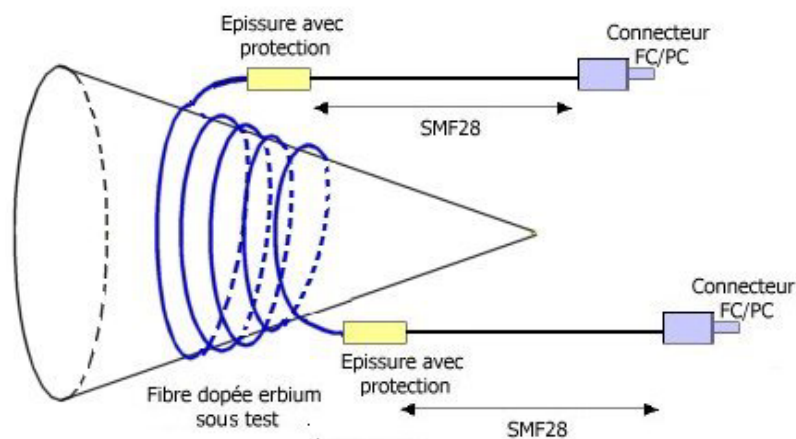


Figure II-6 : Représentation de la disposition d'un échantillon d'une fibre dopée erbium sous test pour une irradiation proton

Le débit de dose utilisé pour les deux types d'irradiation est de l'ordre de $0.12 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$. Le flux des protons à 105 MeV est de $1.4 \times 10^8 \text{ p} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et celui des protons à 50 MeV est de $8 \times 10^7 \text{ p} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Une estimation de la dose déposée équivalente par rapport au silicium peut être obtenue en utilisant les facteurs de conversion suivants :

- $1 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} = 1.6 \times 10^{-9} \text{ Gy}(\text{Si})$ pour les protons à 50 MeV
- $1 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-2} = 8.9 \times 10^{-10} \text{ Gy}(\text{Si})$ pour les protons à 105 MeV

Le pouvoir d'arrêt des protons de 50 MeV est supérieur à celui des protons de 105 MeV. Pour une même épaisseur de matériau traversé, les protons de 50 MeV ont donc une perte d'énergie plus importante que les protons de 105 MeV. La dose totale déposée dans le matériau par des protons de 50 MeV est alors plus grande que celle déposée par des protons de 105 MeV.

II.1.5. Insolation UV des fibres optiques

Nous avons procédé à l'insolation de certaines de nos fibres avec un laser UV continu. Le dispositif expérimental utilisé pour cette irradiation a été mis en place au laboratoire Hubert Curien lors de la thèse de K. Médjahdi [Médjahdi 2005]. Le laser utilisé pour cette insolation est un laser Argon doublé émettant à 244 nm. Le faisceau laser est focalisé via une lentille sphérique sur la fibre optique mais perpendiculairement à son axe optique (Figure II-7). La zone insolée est préalablement dénudée en enlevant la gaine de protection en polymère afin d'éviter l'absorption du faisceau UV par cette dernière. Le faisceau laser crée des défauts dans la partie de la gaine optique et du cœur qu'il éclaire. La fibre est rendue solidaire d'un fil qui permet son déplacement longitudinal par traction à vitesse constante devant le faisceau laser. Une masse est accrochée à un bout du fil pour le maintenir tendu alors que l'autre bout est accroché à un arbre de rotation commandé par un moteur continu. La zone irradiée peut ainsi être ajustée à loisir. La densité d'énergie déposée sur la fibre, également appelée fluence, est calculée en fonction du diamètre du faisceau laser, de la focale de la lentille et de la vitesse de déplacement de la fibre [Médjahdi 2005].

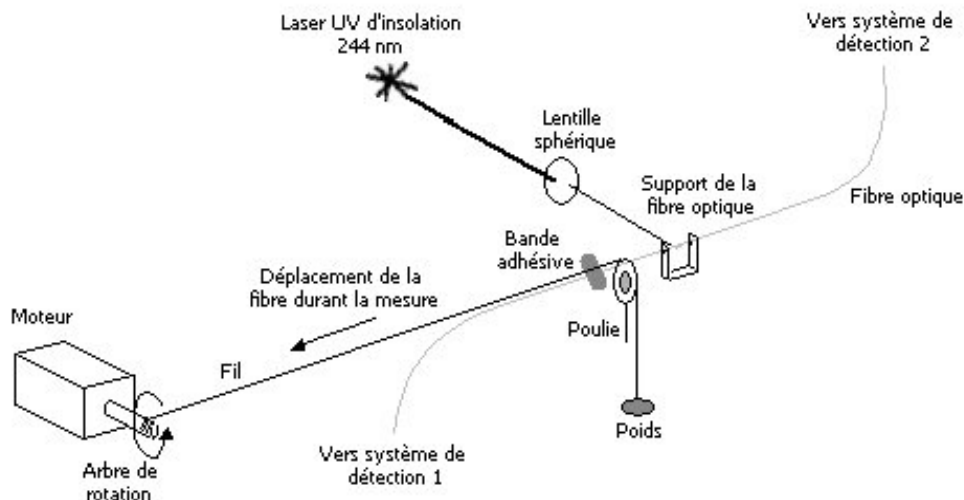


Figure II-7 : Schéma synoptique de l'irradiation d'une fibre avec un laser UV continu

Ce dispositif permet, en plus de l'insolation à densité d'énergie contrôlée, le suivi en temps réel de certaines modifications des propriétés des fibres. L'insolation UV permet l'excitation dans les fibres silicatées d'une luminescence centrée autour de 400 nm [Skuja 1992], cette luminescence est due à des centres intrinsèques déficients en oxygène. Notre dispositif exploite cette luminescence comme une source intrinsèque pour mesurer l'absorption induite dans la plage spectrale 300 - 850 nm. De

chaque coté, la fibre est connectée à un spectromètre. Le système de détection 1 sur la Figure II-7 suit le signal après traversée de la partie insolée, alors que le système de détection 2 sert de référence : nous vérifions avec ce dernier que l'intensité de la luminescence bleue reste constante au cours du déplacement.

De cette manière, en suivant l'évolution du signal au niveau du détecteur 1 en fonction de la longueur de fibre insolée, on détermine l'absorption induite par insolation UV et ce en fonction de la longueur d'onde sur l'ensemble de la plage spectrale correspondant à la bande d'émission excitée sous UV. Le coefficient d'absorption α se calcule facilement en tenant compte de la longueur L de fibre isolée (en cm), de l'intensité $I_0(\lambda)$ injectée dans l'échantillon et de l'intensité $I(\lambda)$ émergeant au bout de la longueur L .

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (\text{Eq. II-1})$$

II.2. Caractérisation des pertes induites sous irradiation

II.2.1. Caractérisation de l'évolution temporelle et spectrale des pertes induites dans des fibres optiques lors d'une irradiation continue gamma

Les différents montages utilisés pour la caractérisation des pertes induites lors des irradiations gamma continues sont décrits dans les deux paragraphes suivants.

II.2.1.A. Transmission dans le proche IR

Pour réaliser les mesures de transmission dans le domaine du proche infrarouge, nous avons utilisé une source laser accordable de 1260 nm à 1630 nm comme source de lumière et une photodiode comme récepteur. Le banc de mesure utilisé est représenté en Figure II-8.

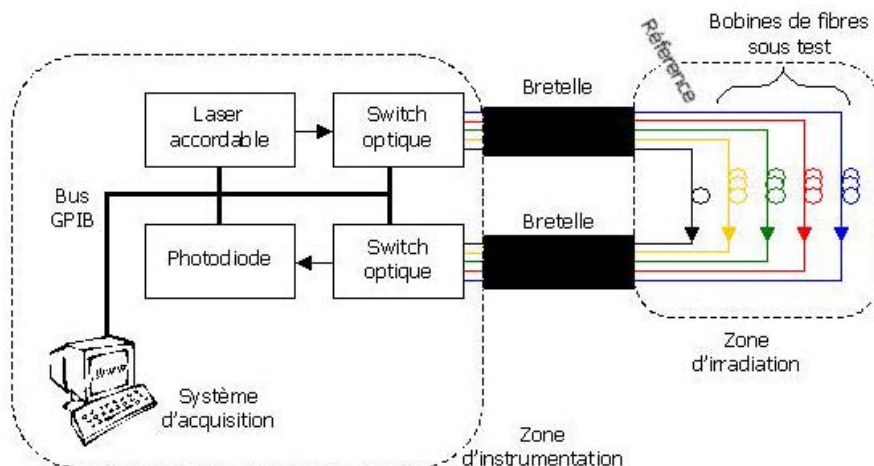


Figure II-8 : Schéma synoptique du banc de mesure de la transmission des fibres optiques dans le proche IR sous irradiation gamma

Quatre fibres optiques peuvent être irradiées en même temps. Par le laser, chaque longueur d'onde est injectée successivement grâce au commutateur optique dans chacune des fibres. Le signal transmis est mesuré par la photodiode via un deuxième commutateur optique. Pendant une irradiation, une fibre est testée sur le domaine spectral 1260 - 1630 nm toutes les 15 min. Ainsi il est possible d'enregistrer pour chaque fibre sa transmission en fonction de la longueur d'onde à un instant donné de l'irradiation. Il est également possible de connaître l'évolution temporelle de la transmission de la fibre au cours de l'irradiation pour chaque longueur d'onde utilisée. A partir des données acquises, les pertes induites par radiations (A_{IR}) pour une longueur d'onde donnée et à un temps donné de l'irradiation sont calculées à partir de la relation suivante:

$$A_{IR}(t,\lambda) = \frac{10}{L} \cdot \text{Log} \left(\frac{P(t,\lambda)}{P(0,\lambda)} \right) \quad (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (\text{Eq.II-2})$$

où L est la longueur de l'échantillon, $P(t,\lambda)$ la puissance transmise par la fibre au temps t et à la longueur d'onde λ , et $P(0,\lambda)$ la puissance transmise par la fibre avant irradiation et à la même longueur d'onde λ ; les pertes induites s'expriment en $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$. Ces dernières peuvent être normalisées par la dose D déposée dans l'échantillon. Dans ce cas on parle de sensibilité induite (RIS, Radiation Induced Sensitivity) :

$$\text{RIS}(t,\lambda) = \frac{1}{D} \times \frac{10}{L} \times \text{Log} \left(\frac{P(t,\lambda)}{P(t_0,\lambda)} \right) \quad (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}) \quad (\text{Eq.II-3})$$

où la dose D est exprimée en Gy et la sensibilité en $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}$.

II.2.1.B. Excitation à 980 nm et 1480 nm

Nous avons également procédé aux tests des fibres excitées par diodes laser, pendant et après l'irradiation gamma, à deux longueurs d'onde distinctes (980 nm et 1480 nm) et avec différentes puissances d'excitation. Durant toute la durée de l'irradiation et pendant encore quelques heures après son arrêt (c'est à dire lors du début de la période de guérison des fibres), les spectres de luminescence autour de 1550 nm et l'intensité transmise par l'excitation sont enregistrés par un analyseur de spectre optique (OSA, Optical Spectrum Analyzer). Le banc de mesure utilisé est représenté en Figure II-9.

Puisque les données sont enregistrées toutes les 15 minutes, il est possible d'acquérir les spectres de l'excitation et de la luminescence de l'erbium à un instant donné de l'irradiation. Nous pouvons alors calculer l'évolution temporelle de l'intensité de l'excitation et celle de la luminescence de l'erbium. L'utilisation des relations II-2 et II-3, permet le calcul des pertes induites et de la sensibilité.

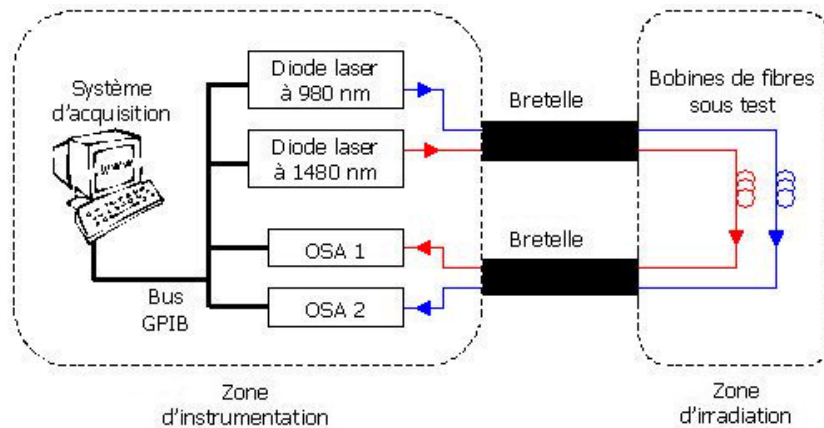


Figure II-9 : Schéma synoptique du banc de mesure de la luminescence des fibres optiques dans le proche IR avec une excitation à 980 nm ou 1480 nm sous irradiation gamma. (OSA : Optical Spectrum Analyzer)

II.2.2. Caractérisation de l'évolution temporelle des pertes induites dans les fibres optiques sous irradiation avec des rayons X pulsés

Le banc de mesure utilisé pour ces irradiations a été doublé (une expérience à 1310 nm et une autre à 1550 nm) afin d'optimiser l'utilisation des moyens d'irradiations. Les fibres sont testées à 1310 nm et à 1550 nm par mesure de l'évolution des pertes induites au cours du temps, juste après l'impulsion de photons X. Une photodiode placée en sortie de fibre transforme le signal transmis en tension, analysé par des oscilloscopes qui suivent son évolution temporelle. Pour chaque expérience, deux oscilloscopes sont nécessaires pour enregistrer les temps les plus courts, le premier couvre la plage $10^{-7} - 10^{-3}$ s et le second la plage $10^{-4} - 10^{-1}$ s. Le photomètre sert à mesurer l'intensité lumineuse transmise par les fibres pour les temps les plus longs. Le schéma synoptique de ce banc de mesure est représenté en Figure II-10.

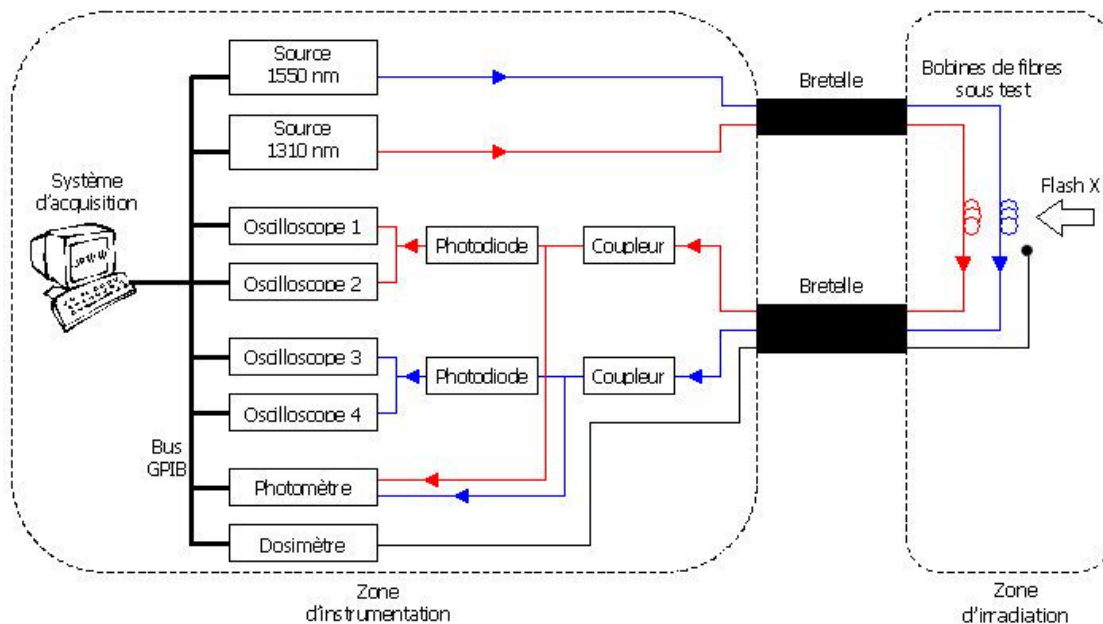


Figure II-10 : Schéma synoptique du banc de mesure pour les irradiations X pulsées.

II.2.3. Caractérisation de l'évolution temporelle et spectrale des pertes induites des fibres optiques lors d'une irradiation continue aux protons

Deux types de mesures ont été réalisés sous irradiation continue aux protons. Les montages sont décrits dans les deux paragraphes suivants.

II.2.3.A. Excitation à 980 nm

Pour cette configuration de test, les fibres dopées erbium sont excitées avec une diode laser émettant à 980 nm pendant et après une irradiation continue aux protons, le montage est représenté en Figure II-11. Les fibres sont excitées avec trois puissances de diode laser différentes (3, 23 et 54 mW). La lumière transmise par les fibres optiques est analysée avec un OSA. Un cycle de mesure enregistre le spectre d'excitation à 980 nm puis la luminescence de l'erbium entre 1450 et 1650 nm pour les trois puissances d'excitation. L'évolution de l'excitation ainsi que celle de la luminescence sont suivies pendant toute la durée de l'irradiation et durant plus d'une heure après l'arrêt de celle-ci, cette période correspond au début de la guérison des fibres. Pour une puissance d'excitation donnée, la puissance d'excitation et la luminescence transmises sont mesurées toutes les 10 minutes. La stabilité de la diode laser est contrôlée via un puissance-mètre associé à un coupleur 90/10.

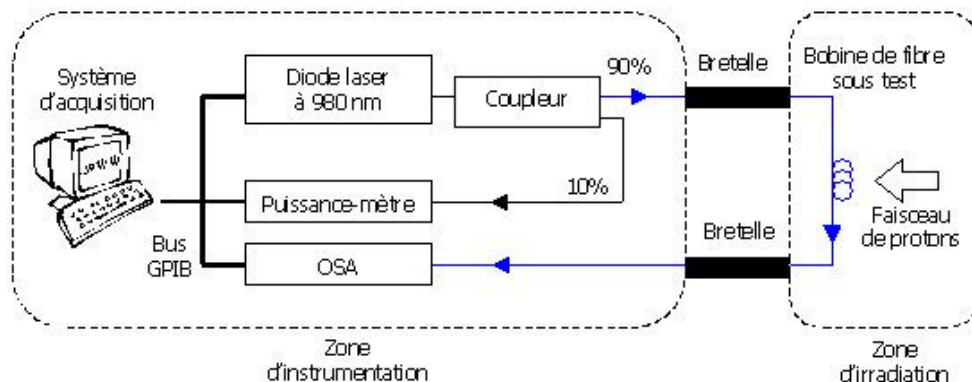


Figure II-11 : Schéma synoptique du banc de mesure de la luminescence des fibres avec une excitation à 980 nm sous irradiation continue aux protons

Les pertes et la sensibilité induites par l'irradiation sont évaluées de la même façon que pour les autres bancs de mesures sous irradiation, en utilisant respectivement l'équation II-2 et l'équation II-3.

II.2.3.B. Montage utilisant une source superluminescente

Afin d'évaluer la réponse des fibres optiques dopées erbium sous l'impact des protons et dans tout le domaine spectral 600-1700 nm, nous avons utilisé un nouveau type de source superluminescente dont la puissance disponible par unité de longueur d'onde est assez importante pour permettre un suivi dynamique des pertes induites sur la globalité du domaine étudié. Cette source est basée sur la propagation du pulse (ns) d'un laser YAG dans une fibre microstructurée qui se traduit en bout de fibre par la génération d'un super-continuum intense [Pagnoux 2003]. Le signal

en sortie de la fibre optique dopée erbium sous test est injecté dans un coupleur 50/50. L'un des bras du coupleur est branché à un spectromètre visible dont le domaine de détection se trouve entre 300 nm et 1100 nm et l'autre bras est branché sur un spectromètre proche IR dont le domaine de détection se situe entre 1000 nm et 1700 nm (Figure II-12).

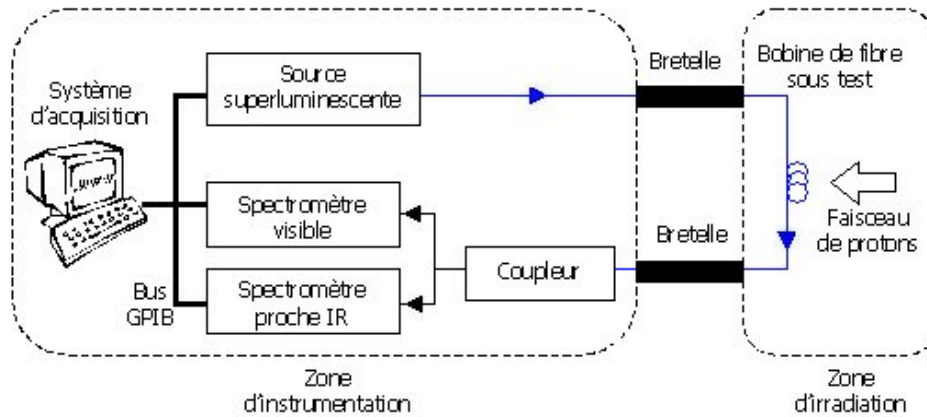


Figure II-12 : Schéma synoptique du banc de mesure de la transmission des fibres entre 600 nm et 1700 nm sous irradiation continue aux protons

La transmission des fibres dopées erbium est ainsi mesurée entre 600 nm et 1700 nm. Sur cette plage spectrale, les spectres ont été enregistrés à intervalles de temps régulier, il est donc possible d'acquérir la réponse des fibres en fonction de la longueur d'onde à un temps donné de l'irradiation et il est également possible d'acquérir l'évolution de la transmission de la fibre au cours de l'irradiation à une longueur d'onde donnée. De même que précédemment, les pertes et la sensibilité induites par l'irradiation se déterminent à partir des équations II-2 et II-3.

II.2.4. Caractérisation d'amplificateurs optiques à fibres dopées erbium sous irradiation continue gamma

Après avoir testé les fibres optiques dopées erbium de façon passive, nous les avons testées en configuration d'amplificateurs optiques, c'est à dire avec une pompe optique et un signal à amplifier en entrée de la fibre dopée erbium. Dans notre configuration, seule la fibre optique dopée erbium est soumise à l'irradiation gamma.

Le dispositif expérimental utilisé est schématisé en Figure II-13. Ce banc de mesure nous permet d'acquérir simultanément le gain et le facteur de bruit pour quatre amplificateurs différents.

Pour réaliser le signal à amplifier, nous avons utilisé un laser accordable entre 1520 nm et 1570 nm. Afin que ce signal soit de faible amplitude, le laser accordable est branché à un atténuateur optique. Cet ensemble laser + atténuateur nous permet de générer un signal de faible amplitude à différentes longueurs d'onde entre 1520 et 1570 nm. Ce signal est envoyé dans un commutateur optique qui le renvoie à tour de rôle dans les différents amplificateurs optiques. Chaque amplificateur est constitué d'un coupleur 50/50, d'une diode de pompe à 980 nm et d'une fibre optique dopée

erbium. En entrée du coupleur, sont injectés le signal de faible amplitude et la pompe à 980 nm, la sortie du coupleur est envoyée dans la fibre dopée erbium. L'analyse des signaux se fait avec un analyseur de spectre optique (OSA) via un deuxième commutateur optique pour collecter les signaux venant des quatre amplificateurs.

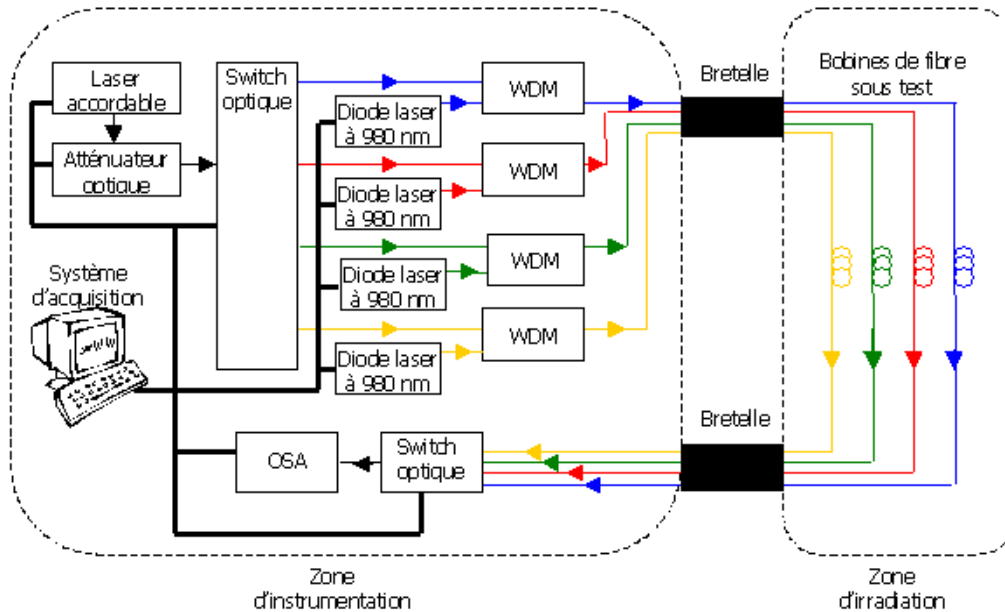


Figure II-13 : Schéma synoptique du banc de mesure du gain et du facteur de bruit d'amplificateurs optiques sous irradiation gamma continue

II.3. Analyses pré- et post-irradiation des fibres optiques

Les fibres optiques dopées erbium testées ont été découpées en plusieurs échantillons pouvant avoir des tailles différentes en fonction de leur utilisation. Plusieurs échantillons ont été utilisés pour les différentes irradiations, mais nous avons gardé pour chaque fibre un échantillon vierge n'ayant subi aucune irradiation afin de comparer les résultats lors de mesures post-irradiation. En effet, les échantillons vierges et irradiés proviennent de la même souche de fibre. Ils ont donc la même composition et les mêmes caractéristiques de fabrication : tension de tirage, température... Nous avons réalisé différentes études post-irradiation : luminescence, durée de vie, absorption que nous avons comparées à l'échantillon vierge témoin. Toutes les méthodes utilisées pour ces différentes études sont décrites ci-après.

II.3.1. Spectroscopie de luminescence

Nous avons réalisé deux types de mesure de luminescence, l'une avec une excitation dans le domaine du visible pour observer d'éventuels changements dans la luminescence de l'erbium et l'apparition ou l'évolution des défauts qui émettent dans ce domaine, et une seconde avec une

excitation dans le domaine du proche IR pour étudier les effets des radiations sur la bande de luminescence de l'erbium autour de 1550 nm utilisé pour les EDFA.

II.3.1.A. Microspectroscopie de luminescence

Pour les mesures dans le domaine du visible et jusqu'à 900 nm, nous avons utilisé une installation de microspectroscopie, combinant un microscope à un spectromètre [Girard 2004, Girard 2007, Sidiroglou 2005]. Le laser d'excitation est focalisé par l'intermédiaire d'un objectif de microscope sur la section transverse d'une fibre optique clivée. Une zone de la fibre est ainsi excitée par ce laser et une partie de la luminescence est récupérée par un objectif de microscope et est envoyée vers le spectromètre via une lame séparatrice. Ce dispositif est schématisé sur la Figure II-14. La section transverse de la fibre peut être déplacée sous le point focal pour choisir la zone à étudier. Ainsi nous étudions séparément le comportement du cœur de la fibre, de la gaine et de l'interface cœur-gaine.

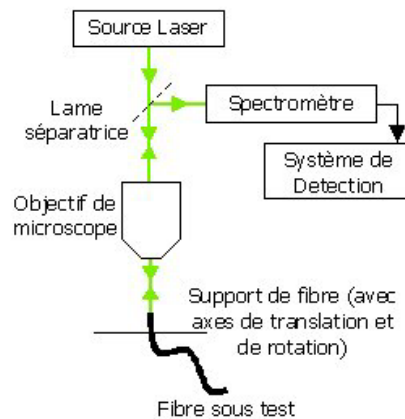


Figure II-14 : Schéma synoptique du microscope confocal

Le diamètre du spot de lumière focalisée sur la section transverse de la fibre varie en fonction du grossissement de l'objectif de microscope utilisé. Pour un objectif 100x la taille du spot est de l'ordre du μm . Avec une telle taille de spot, il est possible de sonder soit la gaine seule soit le cœur de la fibre seul (Figure II-15) et ainsi différencier les spectres de luminescence du cœur et de la gaine.

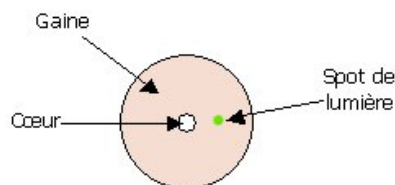


Figure II-15 : Schéma de la section transverse d'une fibre optique lors d'une mesure avec l'installation de microspectroscopie

Les fibres optiques sont excitées avec un laser Argon émettant à 514.5 nm. La puissance utilisée ne dépasse pas 2 mW, le photoblanchiment des fibres irradiées est ainsi limité. Les spectres de luminescence sont acquis entre 518 nm et 900 nm et ce aussi bien pour le cœur que pour la gaine. Nous avons également réalisé une cartographie de la luminescence le long d'un diamètre de la fibre

avec un pas de $1 \mu\text{m}$ en prenant soin de passer par l'axe de la fibre. Les résultats ainsi obtenus sont directement comparables en intensité sans avoir recours à aucune modification ; le long d'un diamètre les spectres sont obtenus dans les mêmes conditions.

II.3.1.B. Mesure de luminescence dans l'infrarouge

Pour les mesures de luminescence dans le proche infrarouge, les fibres optiques sont excitées avec un laser Titane-Saphir émettant autour de 830 nm . Le laser est injecté dans la fibre via un objectif de microscope. Les ions erbium du cœur ainsi excités émettent de la lumière qui est guidée dans les deux sens de propagation dans la fibre. Le signal mesuré en transmission, c'est-à-dire en sortie de fibre et dans le même sens de propagation que celui de l'excitation, se propage dans le sens co-propagatif. Le signal mesuré en réflexion, c'est-à-dire à l'entrée de la fibre et dans le sens de propagation opposé à celui de l'excitation, se propage dans le sens contra-propagatif (Figure II-16).

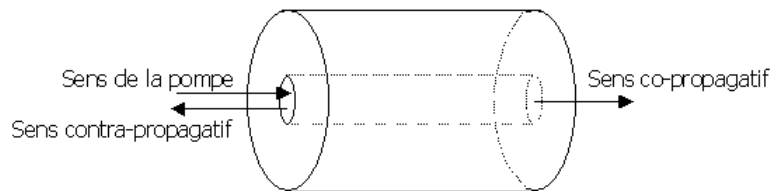


Figure II-16 : Sens de propagation de la luminescence dans le cœur d'une fibre optique dopée erbium

Selon la configuration choisie, il est possible de mesurer la luminescence émise soit dans le sens contra-propagatif (coté gauche sur la Figure II-17) soit dans le sens co-propagatif (coté droit sur la Figure II-17). Pour le montage contra-propagatif, la lumière est récupérée par l'objectif de microscope et dirigée vers l'ensemble spectromètre - photomultiplicateur (PM) grâce à une lame séparatrice. Une lentille convergente est utilisée juste avant le spectromètre pour focaliser la lumière sur la fente d'entrée du spectromètre. Pour le montage co-propagatif, le signal à la sortie de la fibre est collecté au moyen de deux lentilles convergentes avant d'être envoyé sur la fente d'entrée du spectromètre.

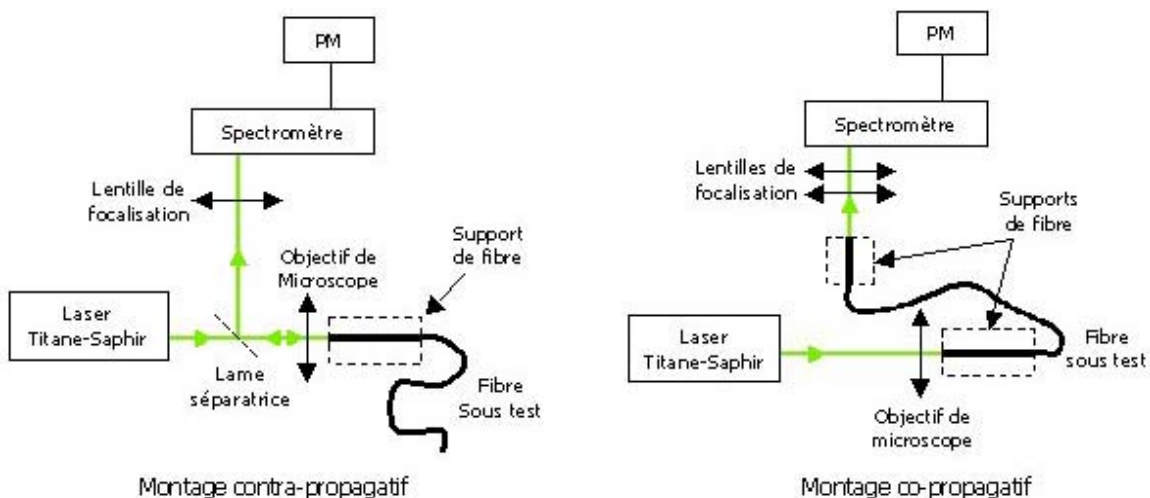


Figure II-17 : Schéma synoptique du banc de mesure de la luminescence IR avec à gauche le montage contra-propagatif et à droite le montage co-propagatif

La puissance du laser est ajustée de façon à avoir une bonne dynamique de mesure dans la plage spectrale 1425-1625 nm et ce pour les deux configurations co- et contra-propagatives.

II.3.2. Mesure de durée de vie

Les mesures de durée de vie ont été réalisées pour le niveau métastable $^4I_{13/2}$. Nous avons donc mesuré la décroissance de la luminescence autour de 1550 nm à partir des deux bancs de mesure précédemment décrits (II.3.1.B). Pour les deux configurations de montage, nous avons ajouté un « chopper » à la sortie du laser Titane-Saphir pour moduler le faisceau d'excitation. Une fois la longueur d'onde sélectionnée, le signal à la sortie du PM est envoyé sur un oscilloscope pour suivre la décroissance de la luminescence suite à l'impulsion laser délivrée après le chopper. L'oscilloscope est déclenché par une photodiode éclairée après le chopper au moyen d'une lame séparatrice (Figure II-18).

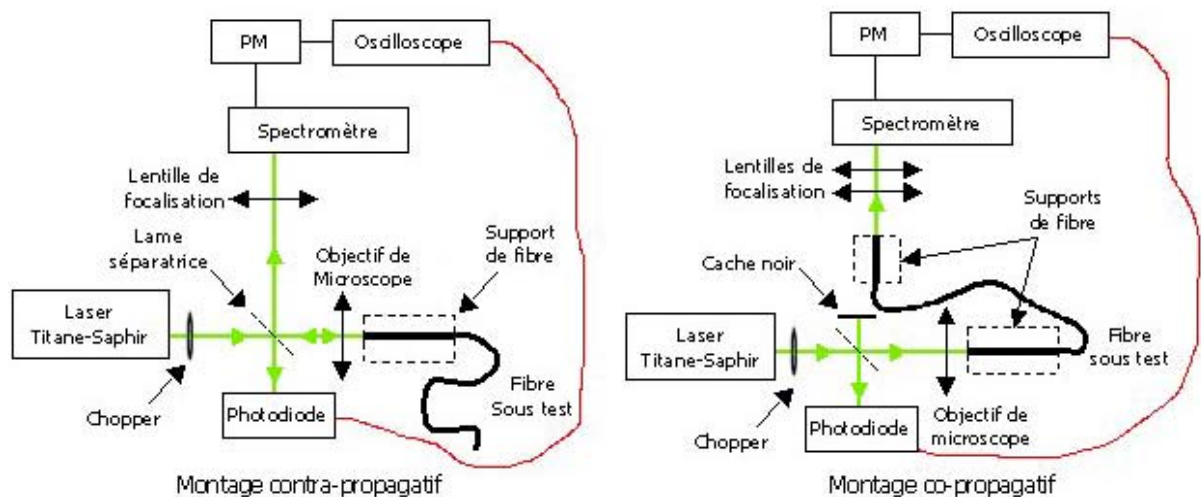


Figure II-18 : Schéma synoptique du banc de mesure de durée de vie dans l'IR avec à gauche le montage contra-propagatif et à droite le montage co-propagatif

II.3.3. Mesure d'absorption

Les mesures d'absorption sont utiles pour la caractérisation des centres colorés permanents créés lors des irradiations. En effet, comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre I, les centres colorés présentent souvent des bandes d'absorption. La méthode utilisée pour l'acquisition de spectre d'absorption est la méthode bien connue dite du « cut-back » [Marcuse 1981]. Cette méthode consiste à enregistrer dans un premier temps le signal transmis par une fibre, suite à l'injection d'une lumière blanche (source à spectre étendu) en entrée avant de couper une portion de la fibre, et à enregistrer à nouveau le spectre transmis sans changer les conditions d'injection, voir montage schématisé dans la Figure II-19.

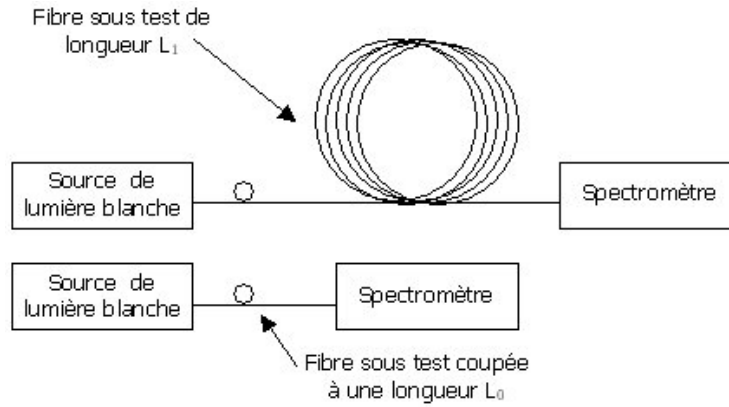


Figure II-19 : Schéma de principe de la méthode dite du « cut back »

Cette méthode s'affranchit des pertes par injection qui sont non reproductibles d'une injection à une autre puisque la fibre n'est pas déconnectée de la source de lumière blanche entre les deux mesures. Le spectre d'absorption $\alpha(\lambda)$ s'obtient alors moyennant la relation :

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L_1 - L_0} \cdot \text{Log} \left(\frac{P(L_0, \lambda)}{P(L_1, \lambda)} \right) \quad (\text{Eq.II-4})$$

avec $P(L_1, \lambda)$ la puissance transmise par la fibre de longueur L_1 et $P(L_0, \lambda)$ la puissance transmise par la fibre coupée de longueur L_0 .

II.4. Caractéristiques des fibres optiques dopées erbium étudiées

Nous avons testé plusieurs fibres optiques dopées erbium au cours de ces travaux. Les fibres testées proviennent de deux fabricants : FORC (Fiber Optics Research Center, Moscou Russie) et DRAKA Comteq (fabricant européen) et sont des prototypes. Les principales caractéristiques des fibres FORC et DRAKA sont données dans les Tables II-1 et II-2 respectivement.

| Fibre | Dopage en Er ³⁺ dans le cœur (ppm) | Dopage en Al dans le cœur (mol.%) | Absorption de Er ³⁺ (dB·m ⁻¹) | Longueur d'onde de coupure (nm) | Atténuation à 1100 nm (dB·km ⁻¹) | Diamètre de cœur (μm) |
|-------|---|---|--|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| Y192 | 720 | 10.8 | 22.3 | 1000 | 10 | 3.8 |
| Y195 | 71 | 11.4 | 4.7 | 890 | ≈7.0 | 3.7 |
| Y200 | 144 | 8.8 | 10 | 970 | ≈3.5 | 3.9 |
| Y202 | 100 | 9.37 | 7.5 | 850 | 4.5 | 3.6 |
| Y206 | 143 | 11.3 | 7.9 | 910 | 6 | 3.4 |
| Y230 | ≈4600 | 9.8 | 82 | ≈800 | 10 | 3.1 |

Table II -1 : Principales caractéristiques des fibres optiques dopées erbium testées de FORC.

| Fibre | Dopage en Er ³⁺ dans le cœur (ppm) | Dopage en Al dans le cœur (wt%) | Absorption de l'erbium (dB·m ⁻¹) | Longueur d'onde de coupure (nm) | Atténuation à 1310 nm (dB·km ⁻¹) | Diamètre de mode à 1558 nm (μm) |
|-------|---|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| D#1 | ≈288 | ≈10 | 4.8 | ≈ 1100 | 26.4 | ≈ 5.1 |
| D#2 | ≈240 | ≈8 | 4 | ≈ 930 | 33 | 6 |
| D#3 | ≈288 | ≈7 | 4.8 | ≈ 1100 | 26.4 | ≈ 5.3 |
| D#4 | ≈4380 | ≈6 | 73 | ≈ 1100 | 145.7 | 5.0 |
| D#5 | ≈138 | ≈0.3 | 2.3 | ≈ 1100 | 8.0 | 4.3 |
| D#6 | ≈282 | ≈6 | 4.7 | ≈ 1150 | 15.4 | 5.1 |

Table II-2 : Principales caractéristiques des fibres optiques dopées erbium testées de DRAKA.

Les gaines et les cœurs des fibres DRAKA D#1, D#2, D#3, D#4 et D#6 contiennent également du phosphore et du germanium en faibles quantités ; la somme de leur concentration restant inférieure à 1 wt%. La fibre D#5 contient du germanium dans le cœur en plus grande quantité (> 10 wt%), et ne contient pas de phosphore.

II.5. Résumé

Dans ce chapitre nous avons décrit les différentes installations d'irradiation et d'insolation utilisées dans cette thèse ainsi que les sources employées pour les études sur les fibres optiques dopées Terres-Rares et les EDFA sous environnements radiatifs. L'ensemble des dispositifs expérimentaux utilisés pour la réalisation de ces études est aussi décrit dans ce chapitre. Enfin, nous avons donné deux tables récapitulant les principales caractéristiques des deux séries de fibres optiques dopées erbium testées.

Chapitre III. 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.

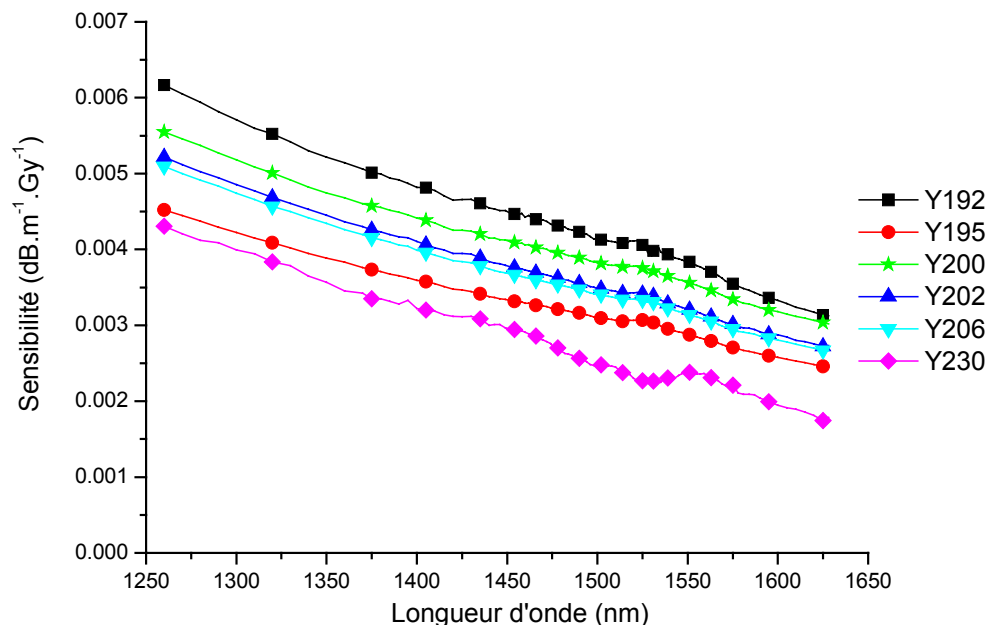


Figure III-1 : Sensibilité des fibres Y191, Y195, Y200, Y202, Y206 et Y230 en fonction de la longueur d'onde, lors de la mesure de transmission dans le proche IR, à 2 kGy

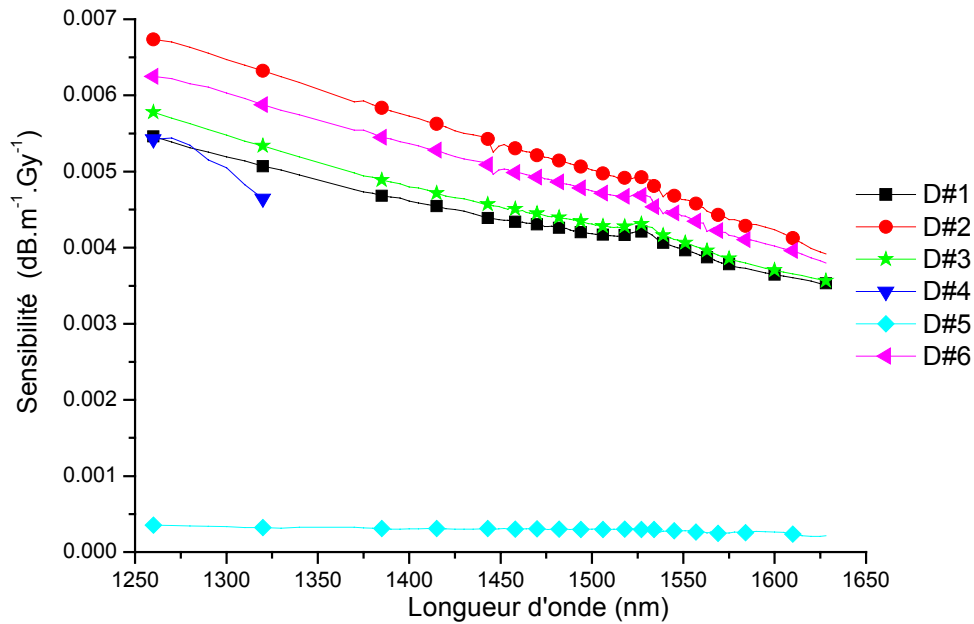


Figure III-2 : Sensibilité des fibres D#1, D#2, D#3, D#4, D#5 et D#6 en fonction de la longueur d'onde, lors de la mesure de transmission dans le proche IR, à 2 kGy

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 Gy·h⁻¹ et 45 Gy·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.

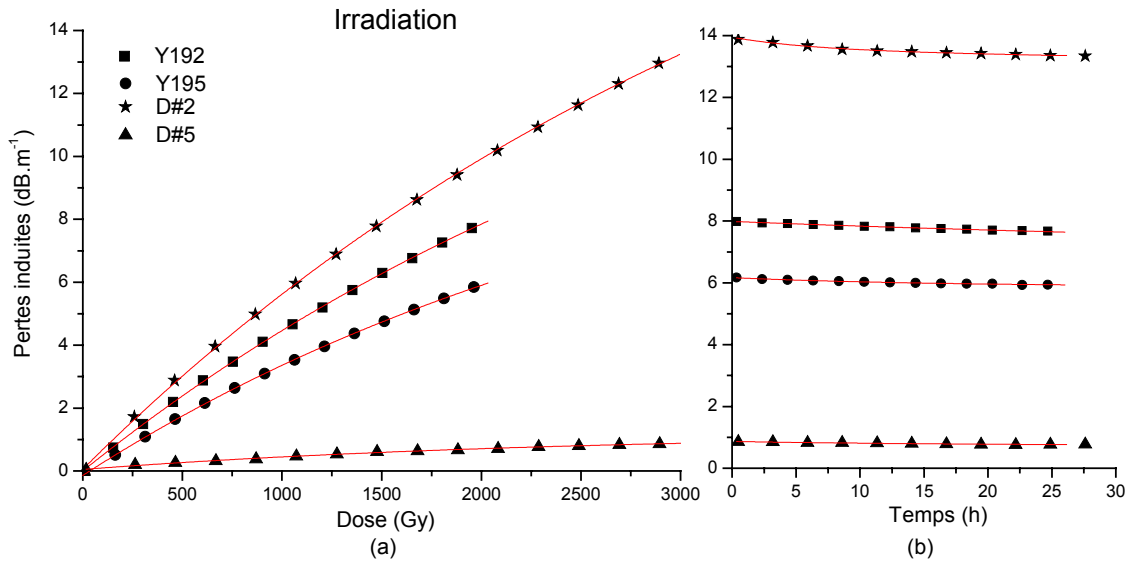


Figure III-3 : (a) Evolution des pertes induites en fonction de la dose lors d'une irradiation gamma à 1530 nm pour les fibres Y192, Y195, D#2 et D#5. (b) Evolution temporelle des pertes induites après la fin de l'irradiation. Les motifs correspondent aux données acquises et les lignes continues aux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

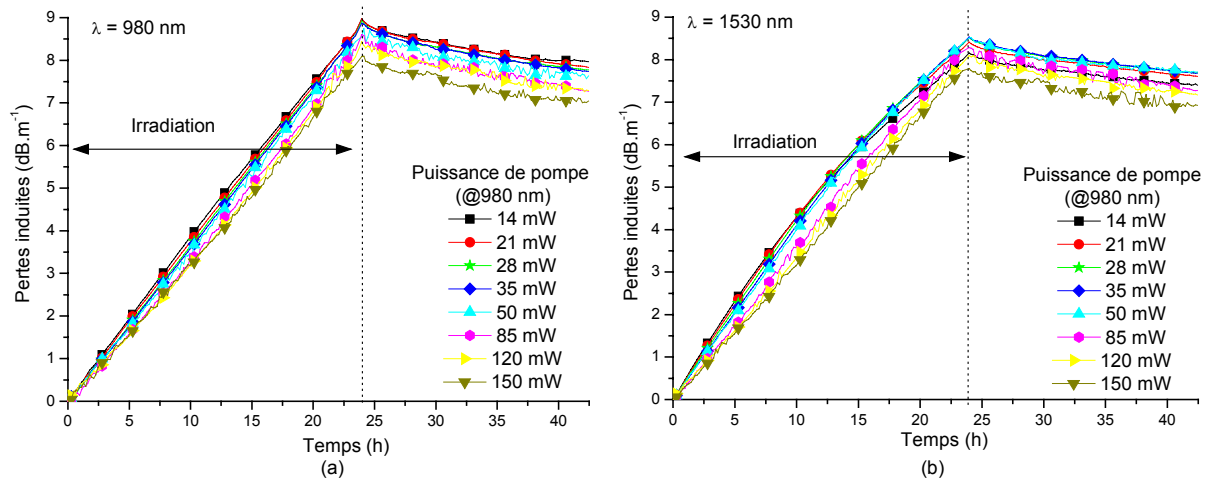


Figure III-4 : Evolution temporelle des pertes induites à 980 nm (a) et à 1530 nm (b) de la fibre D#3 pour différentes puissances de pompe à 980 nm pendant et après l'irradiation (Débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

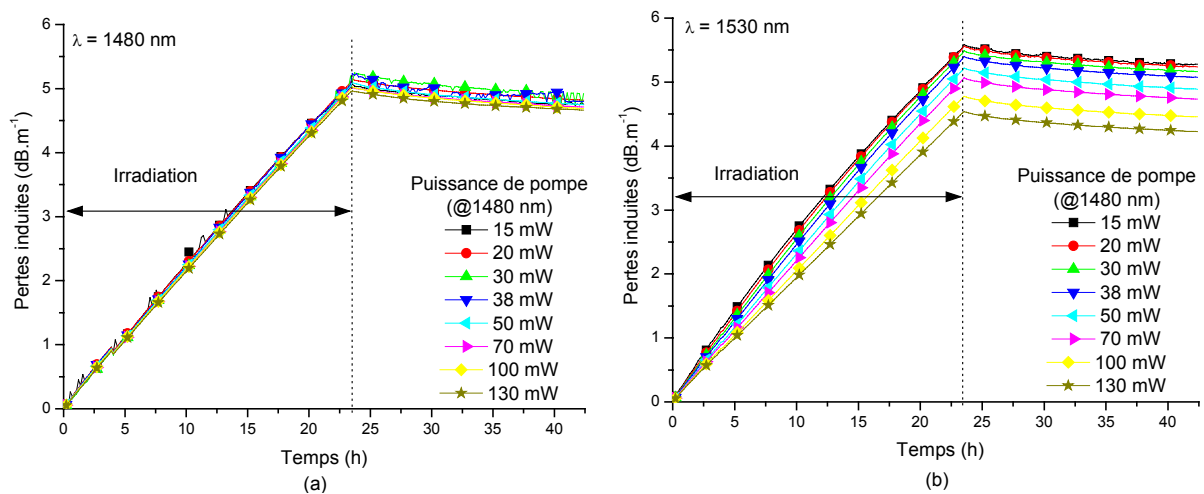


Figure III-5 : Evolution temporelle des pertes induites à 1480 nm (a) et à 1530 nm (b) de la fibre D#3 pour différentes puissances de pompe à 1480 nm pendant et après l'irradiation (Débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

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, $8.10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$.

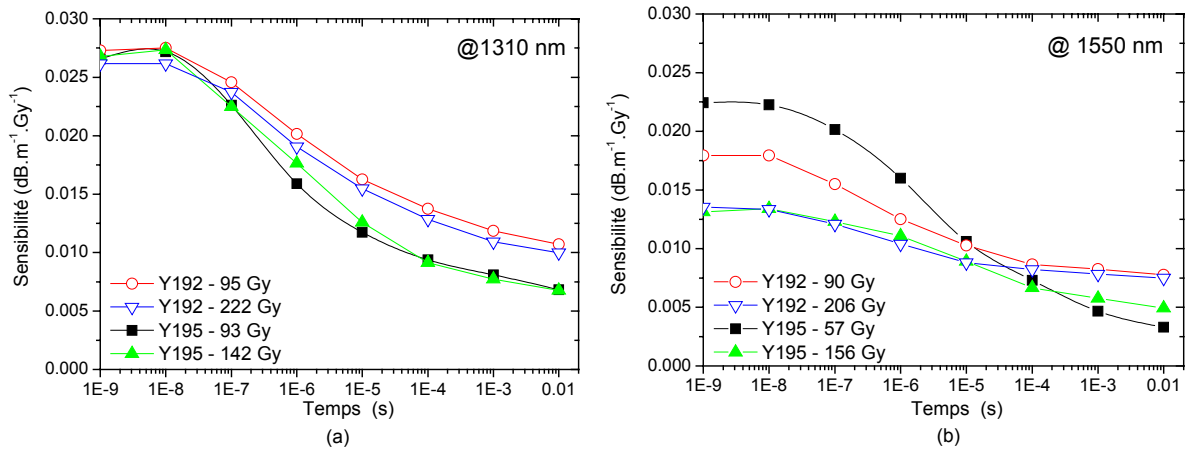


Figure III-6 : Evolution de la sensibilité à 1310 nm (a) et à 1550 nm (b) des fibres Y192 et Y195 après différents tirs de flash X

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 Y92 et d'environ $4.10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$ pour le 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.

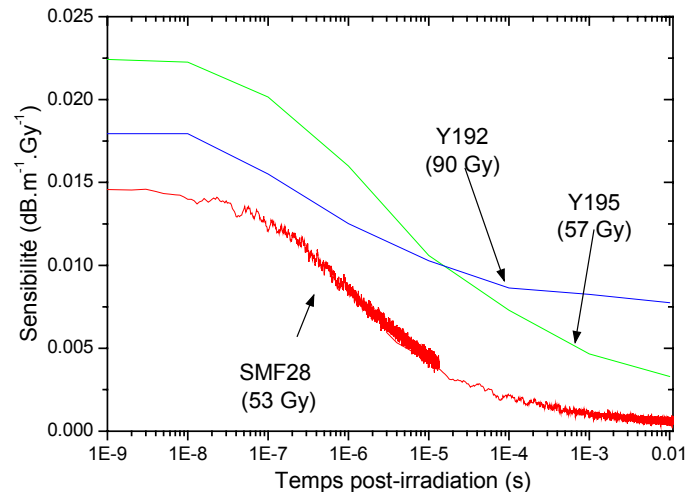


Figure III-7 : Evolution temporelle post-irradiation à 1550 nm de la sensibilité des fibres Y192, Y195 et d'une fibre SMF28 après un tir de flash X

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

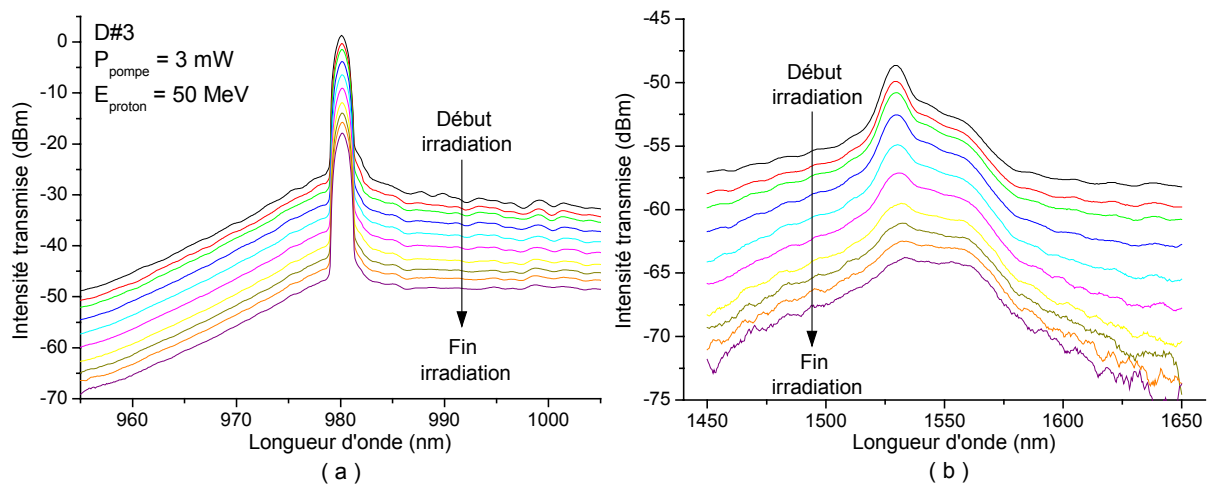


Figure III-8 : Evolution de l'intensité transmise (en dBm¹⁰) de l'excitation (a) et de la luminescence autour de 1530 nm (b) de la fibre D#3 sous excitation à 980 nm et à 3 mW lors de l'irradiation aux protons à 50 MeV

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.

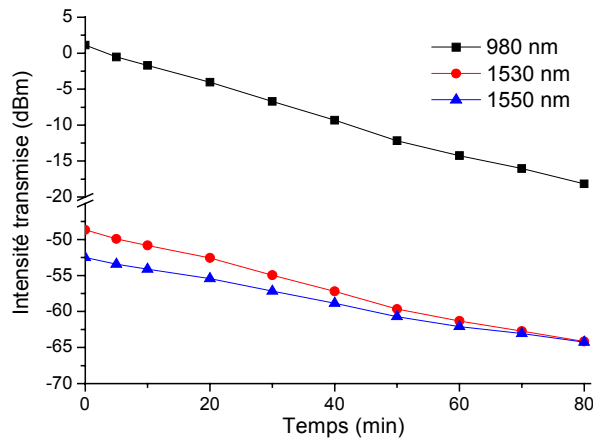


Figure III-9 : Evolution temporelle de l'intensité transmise de l'excitation et de la luminescence à 1530 nm et 1550 nm de la fibre D#3 sous excitation à 980 nm et à 3 mW pendant l'irradiation aux protons à 50 MeV

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.

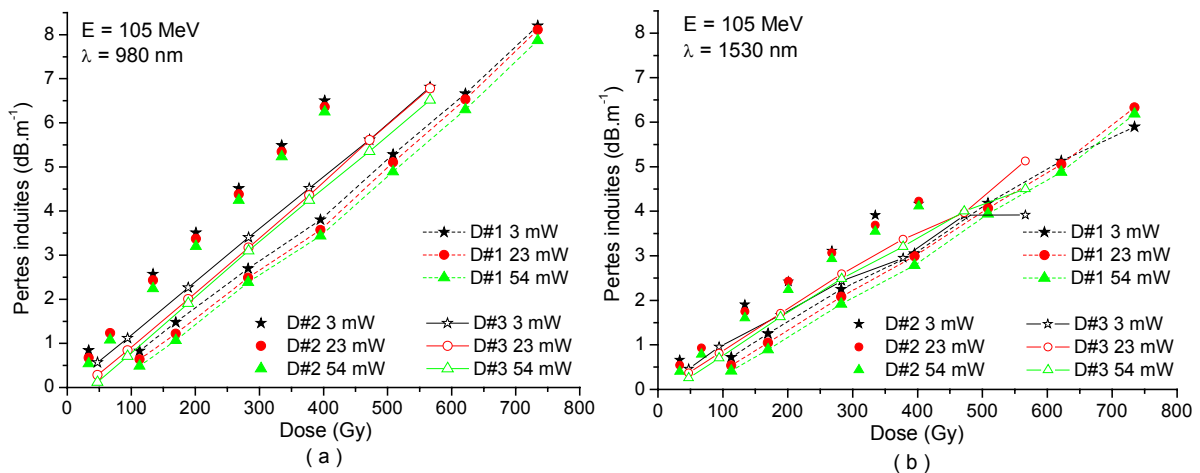


Figure III-10 : Evolution des pertes induites à 980 nm (a) et à 1530 nm (b) sous irradiation aux protons d'énergie 105 MeV des fibres D#1, D#2 et D#3 pompées à 980 nm avec différentes puissances (3, 23 et 54 mW)

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).

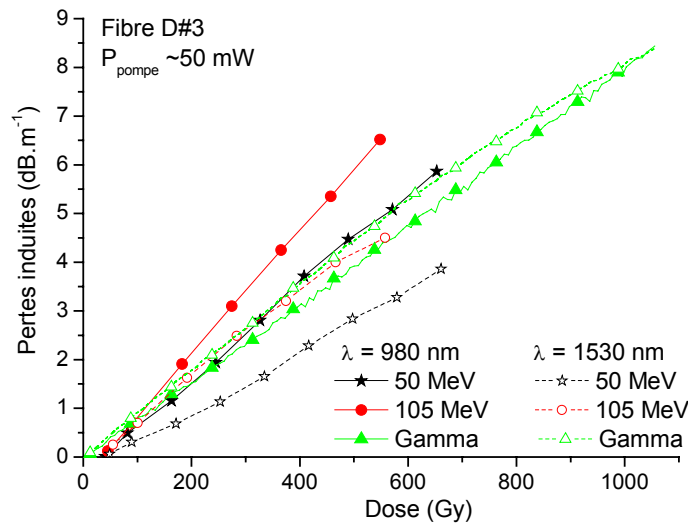


Figure III-11 : Evolution des pertes induites à 980 nm et à 1530 nm de la fibre D#3 pompée à environ 50 mW sous différentes irradiations (proton 50 MeV, proton 105 MeV et Gamma)

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).

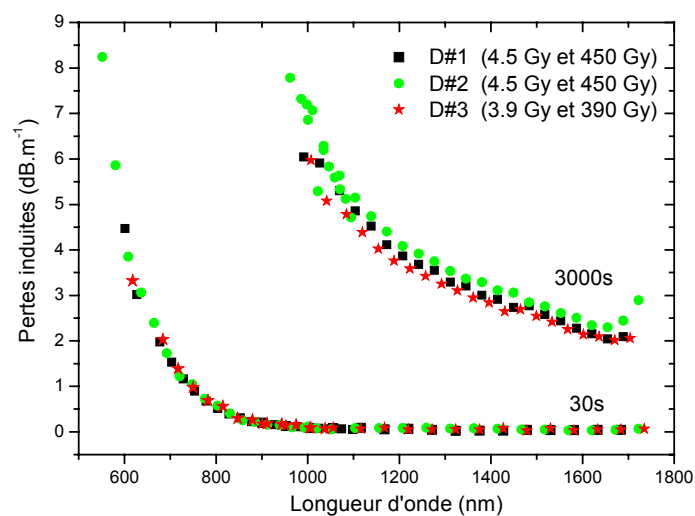


Figure III-12 : Pertes induites des fibres D#1, D#2 et D#3 au bout de 30 s et 3000 s d'irradiation aux protons (E = 105 MeV) sur le domaine spectral 600 – 1800 nm

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.

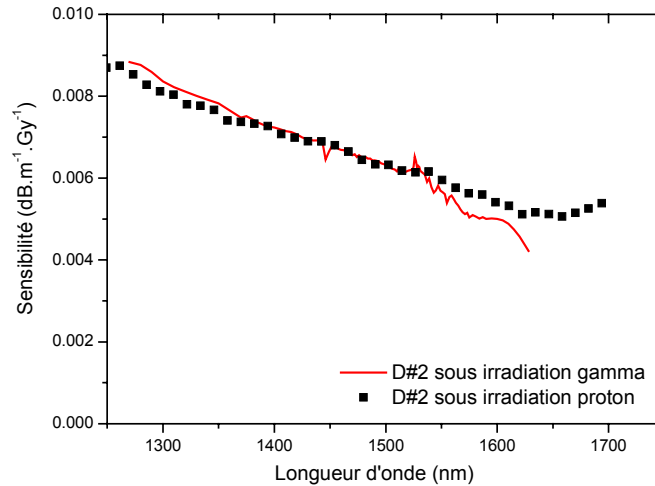


Figure III-13 : RIA de la fibre D#2 sous irradiation gamma et sous irradiation proton pour une dose cumulée d'environ 450 Gy.

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.

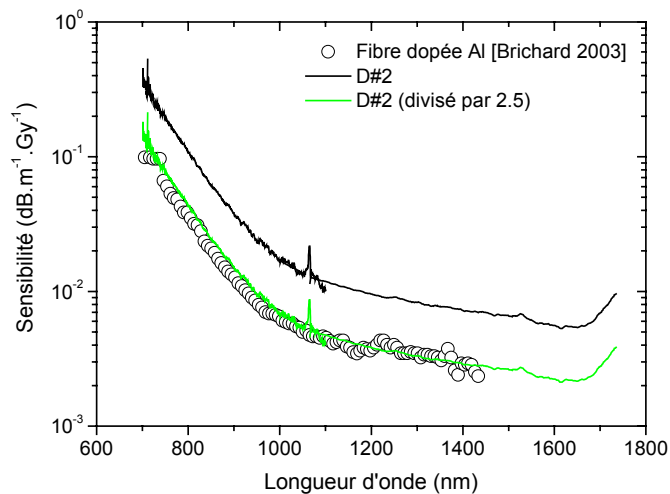


Figure III-14 : Comparaison de la sensibilité de la fibre D#2 sous irradiation aux protons et d'une fibre dopée aluminium sous irradiation gamma [Brichard 2003].

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.

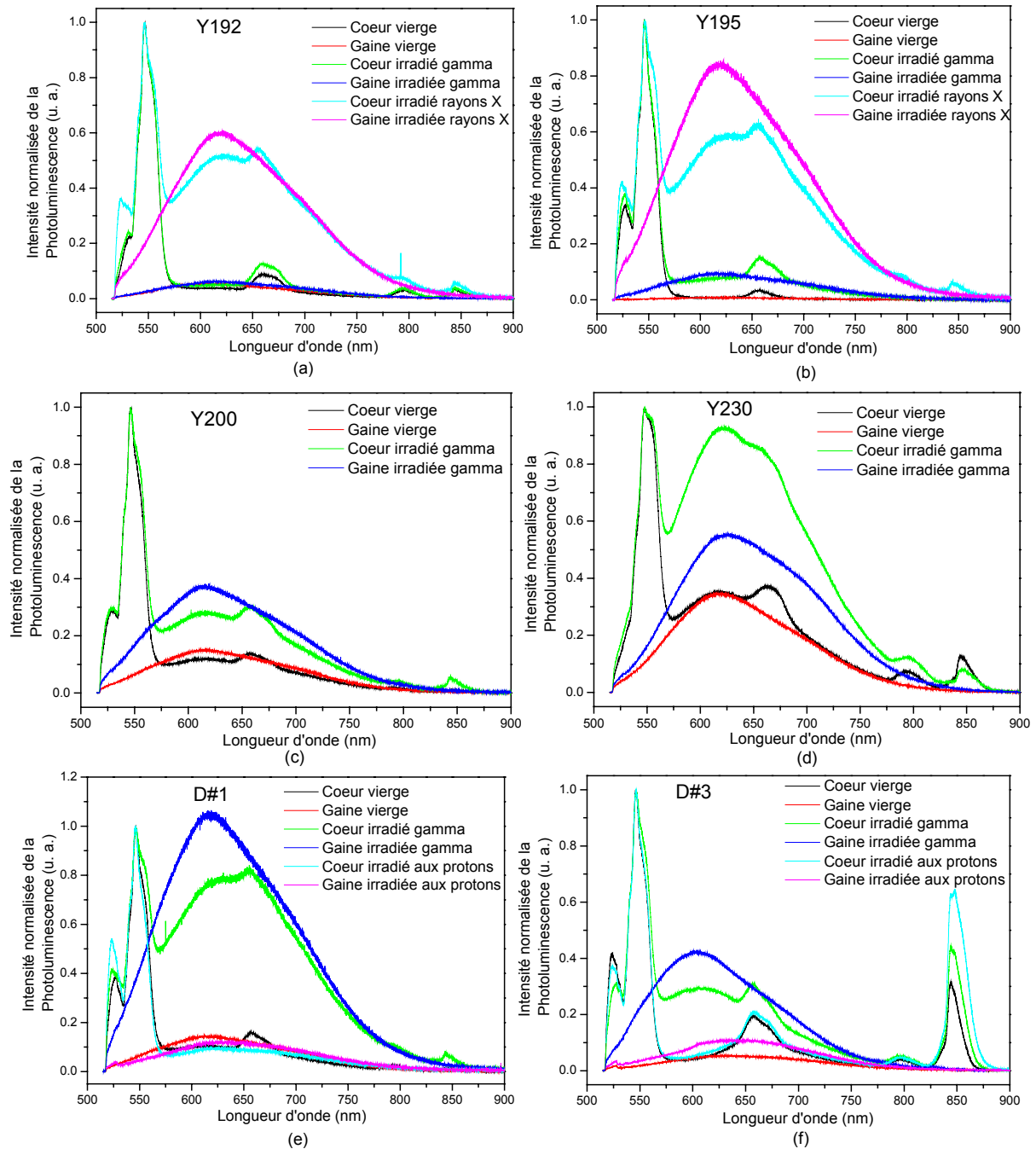


Figure III-15 : Spectres de photoluminescence normalisés acquis dans le cœur et la gaine des différents échantillons vierges et irradiés (gamma, protons ou flash X) des fibres Y192 (a), Y195 (b), Y200 (c), Y230 (d), D#1 (e) et D#3 (f). Excitation laser à 514.5 nm, à 2 mW de puissance.

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 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.

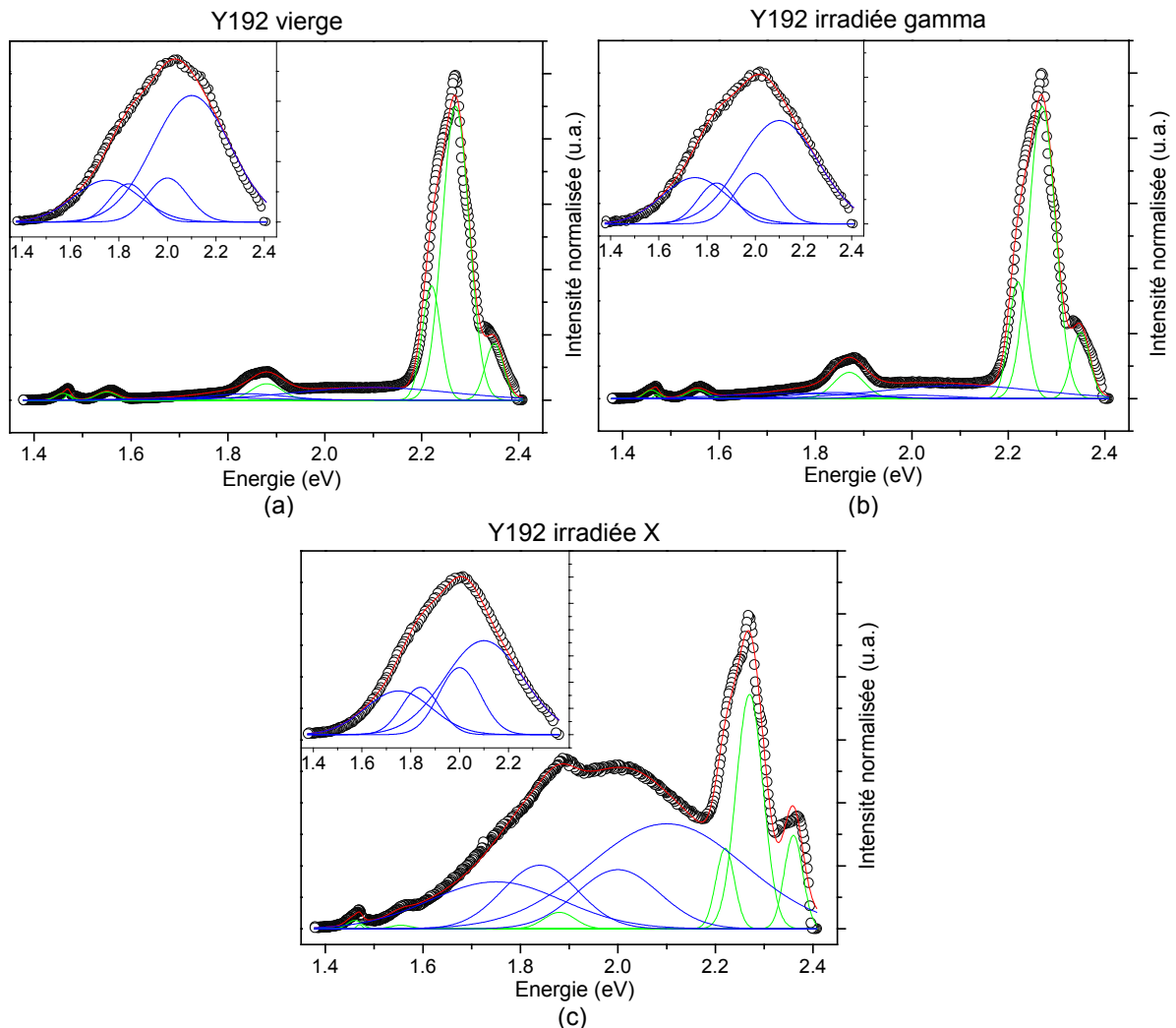


Figure III-16 : Spectres de photoluminescence normalisés au niveau du cœur (en insert spectres de la gaine) des échantillons vierge (a), irradié gamma (b) et irradié X (c) de la fibre Y192. Les spectres sont ajustés par des Gaussiennes. Les cercles représentent les données expérimentales, les lignes 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.

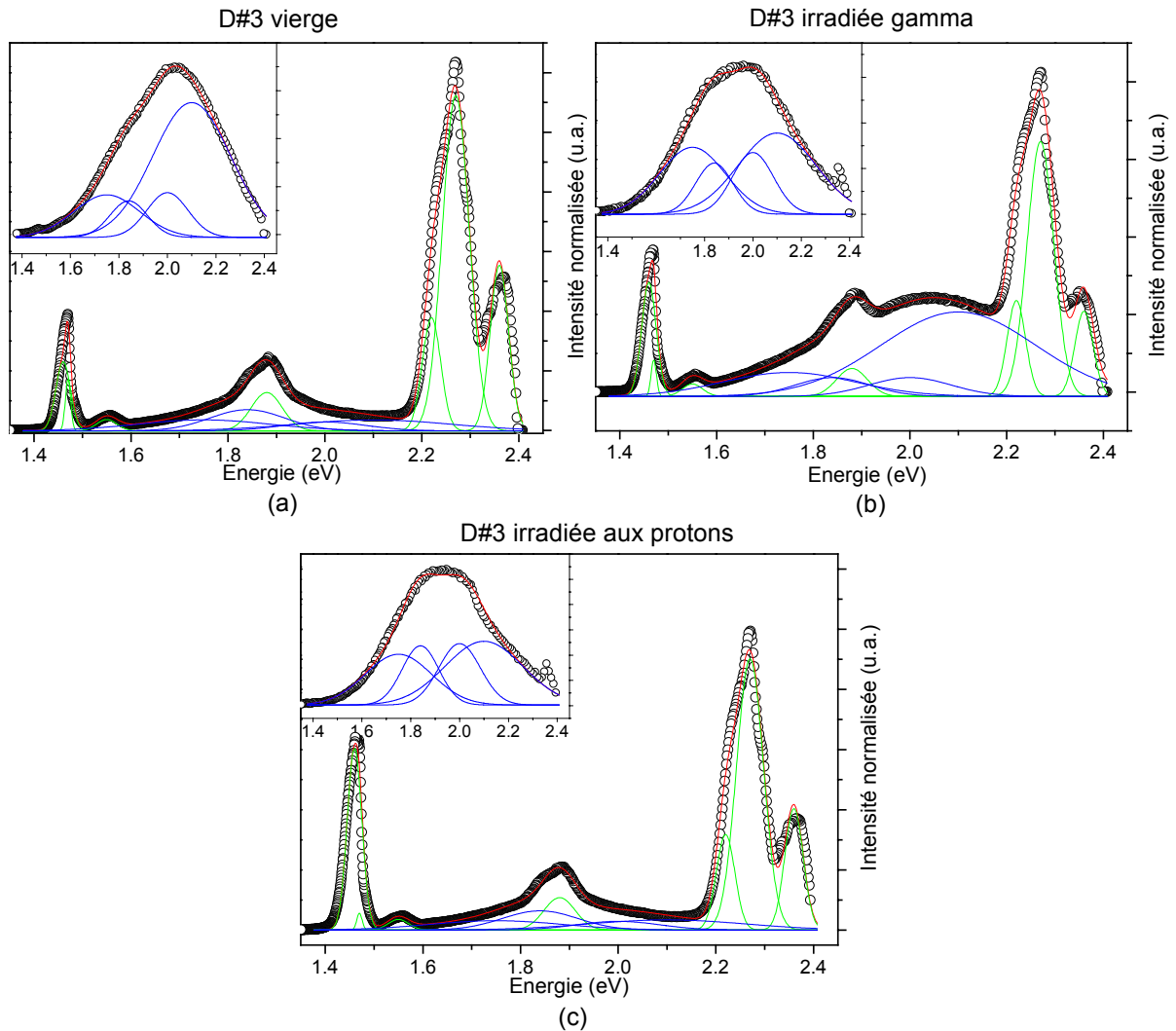


Figure III-17 : Spectres de photoluminescence normalisés au niveau du cœur (en insert spectres de la gaine) des échantillons vierge (a), irradié gamma (b) et irradié aux protons (c) de la fibre D#3. Les spectres sont ajustés par des Gaussiennes. Les cercles représentent les données, les lignes rouges 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.

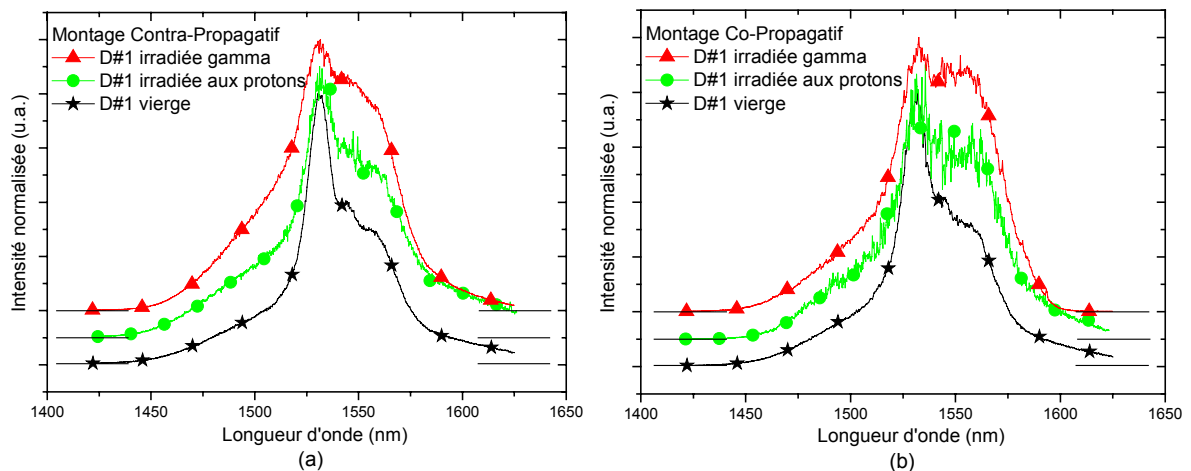


Figure III-18 : Spectres de luminescence normalisés, sur la raie la plus intense (1530 nm), des échantillons vierges, irradiés gamma et aux protons de la fibre D#1 dans le domaine de l'infrarouge enregistrés avec le montage contra-propagatif (a) et le montage co-propagatif (b). Les échantillons sont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

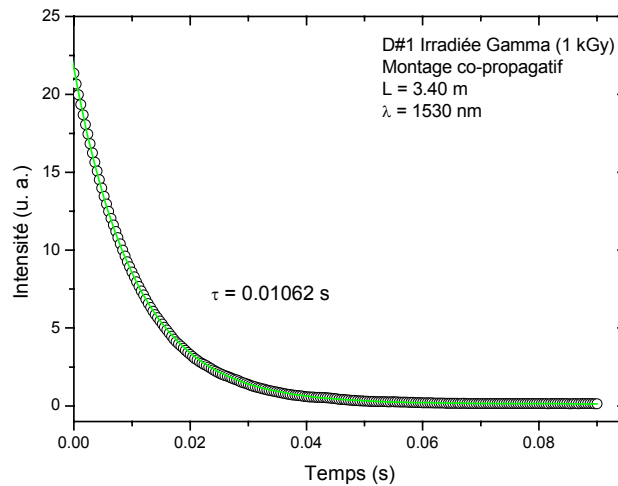


Figure III-19 : Déclin de l'émission à 1530 nm de l'échantillon de la fibre D#1 d'une longueur de 3.4 m et irradié gamma sous excitation à 850 nm avec le montage co-propagatif, en noir les données expérimentales et en rouge l'ajustement par une loi exponentielle

| 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.

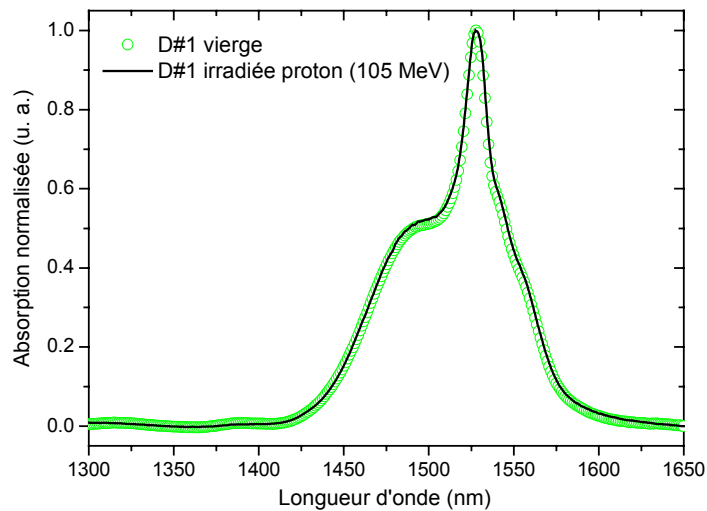


Figure III-20 : Spectres d'absorption dans le domaine du proche IR des échantillons vierge et irradié proton à 105 MeV de la fibre Draka D#1

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 d'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'accroître 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.

Chapitre IV. Comportements des fibres optiques dopées erbium soumises à des insulations UV et comparaison avec les irradiations gamma

| | |
|---|-----|
| IV.1. COMPORTEMENT DE FIBRES OPTIQUES DOPÉES ERBIUM SOUS INSOLATION UV | 94 |
| IV.1.1. Fibres optiques dopées erbium excitées de manière transversale à 244 nm..... | 94 |
| IV.1.1.A. Absorption des fibres non insolées..... | 95 |
| IV.1.1.B. Détermination des coefficients d'absorption..... | 97 |
| IV.1.2. Absorption induite dans les fibres insolées à 244 nm..... | 98 |
| IV.2. MESURES POST-INSOLATION..... | 101 |
| IV.2.1. Luminescence dans le domaine du visible..... | 101 |
| IV.2.2. Comparaison des spectres de luminescence dans le domaine du visible des échantillons insolés UV et irradiés gamma | 104 |
| IV.3. RÉSUMÉ..... | 107 |

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la composition de la fibre joue un rôle important pour la tenue aux radiations des fibres optiques dopées erbium. De plus, d'autres études sur des fibres optiques non-dopées Terres-Rares ont montré que la composition des fibres optiques [Fribele 1980, Tavernier 1981] ainsi que les paramètres de fabrication [Hanafusa 1986, Hanafusa 1987, Lyons 1989, Girard 2006] influent sur leur réponse en environnements radiatifs. Ces différents paramètres sont susceptibles d'être modifiés par les fabricants des fibres tout en continuant à les commercialiser sous la même référence. Il sera donc nécessaire de connaître le comportement sous irradiation de ces nouvelles fibres. La mise en œuvre d'essai de la tenue des fibres optiques à des radiations ionisantes tels que les rayons gamma ou des protons reste assez lourde et coûteuse. Pour cette raison, la mise en place d'un test permettant au moins une première validation des nouvelles souches de fibres s'avère indispensable.

S. Girard [Girard 2003] a comparé les effets induits par des irradiations X pulsée et γ continue à ceux mesurés lors d'une insolation UV des fibres optiques multimodes germano-silicates. L'ensemble de ses résultats montre des corrélations très fortes entre les mécanismes de création de défaut sous irradiation γ et sous insolation UV pour la gamme de longueur d'onde allant de 400 nm à 1700 nm. Leurs résultats confirment qu'il est possible de prédire le comportement des fibres multimodes sous irradiation gamma à partir d'essais sous insolation UV. Il serait donc intéressant de savoir si une insolation UV permet également de prédire le comportement d'une fibre monomode dopée erbium sous environnement gamma. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'étude de plusieurs de nos fibres dopées erbium sous insolation UV ainsi que les mesures de luminescence post-insolation réalisées sur les échantillons insolés afin de les comparer à ceux obtenus pour les échantillons irradiés gamma.

Les insolations UV ont été réalisées au laboratoire Hubert Curien avec un laser argon doublé délivrant un faisceau à 244 nm. Le dispositif expérimental est détaillé au paragraphe II.1.5. La fibre est déplacée le long de son axe devant le faisceau laser. Ce dernier est focalisé sur la fibre grâce à une lentille. Le diamètre du faisceau a été déterminé au niveau de la fibre. La vitesse de déplacement de la fibre est contrôlée et réglable. A l'aide de ces paramètres et de l'équation IV-1 démontrée dans la thèse de K. Médjahdi [Médjahdi 2005], nous pouvons calculer la fluence ou densité d'énergie D_e de l'insolation, qui correspond au débit de dose pour les irradiations gamma ou proton.

$$D_e = \frac{2 \times P}{\pi \times R_{\text{spot laser}} \times v} \quad (\text{Eq. IV-1})$$

où P est la puissance du laser en W , $R_{\text{spot laser}}$ le rayon de faisceau laser mesuré au point focal de la lentille et exprimé en cm , v est la vitesse de déplacement de la fibre devant le faisceau laser en $cm \cdot s^{-1}$. De cette façon la fluence est exprimée en $J \cdot cm^{-2}$. Dans notre cas, les insolations ont été faites avec une fluence de $5.6 J \cdot cm^{-2}$.

Du fait que nous ne disposons plus de souche suffisante de fibre D#5, nous avons demandé au fabricant de fibres de nous fournir une fibre supplémentaire ayant des caractéristiques proches de la fibre D#5. Cette nouvelle fibre est nommée D#7. Elle a la même composition de matrice hôte et une concentration légèrement plus élevée en erbium que D#5. La Table IV-1 donne les principales caractéristiques de ces deux fibres optiques.

| Fibre | Dopage en Al dans le cœur (wt%) | Dopage en Ge dans le cœur (wt%) | Dopage en Er ³⁺ dans le cœur (ppm) | Absorption de l'erbium (dB·m ⁻¹) | Longueur d'onde de coupure (nm) | Diamètre de mode à 1558 nm (μm) |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|---|--|---------------------------------|---------------------------------|
| D#5 | ≈0.3 | > 10 | 138 | 2.3 | ≈ 1100 | 4.3 |
| D#7 | ≈0.3 | > 10 | 141 | 2.35 | ≈ 1100 | 4.4 |

Table IV-1 : Principales caractéristiques des fibres optiques dopées erbium D#5 et D#7

IV.1. Comportement de fibres optiques dopées erbium sous insolation UV

IV.1.1. Fibres optiques dopées erbium excitées de manière transversale à 244 nm

Dans les deux prochains paragraphes, nous présentons les résultats spectroscopiques obtenus lors de l'excitation transversale des fibres dopées erbium. Ces résultats ont été obtenus moyennant une approche bien différente de celle habituellement utilisée pour réaliser les études spectroscopiques. En effet, l'excitation UV transversale à 244 nm permet de générer dans la fibre une luminescence s'étendant pratiquement de manière continue sur la plage spectrale 300 – 600 nm. Cette luminescence centrée sur le bleu nous sert de source de lumière continue intrinsèque à la fibre pour évaluer l'absorption induite par insolation UV. La Figure IV-1 montre le spectre généré lors de l'excitation transversale à 244 nm d'une fibre dopée germanium, Corning SMF28. Cette approche, utilisant une source intrinsèque, a été développée au laboratoire Hubert Curien et est détaillée dans la thèse de K. Médjahdi [Médjahdi 2005]

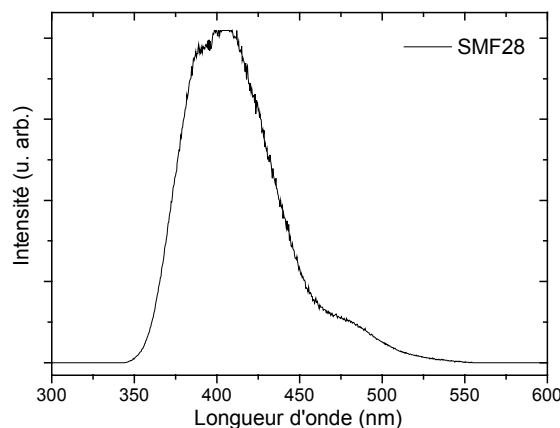


Figure IV-1 : Spectre généré lors de l'excitation transversale à 244 nm d'une fibre dopée germanium, Corning SMF28

Dans un premier temps et pour réaliser le spectre de référence, la fibre optique n'est pas déplacée devant le faisceau laser. Nous réalisons une insolation par point pendant une durée très courte afin d'obtenir les spectres transmis par la fibre avant l'insolation UV proprement dite. Une fois ce spectre obtenu, nous procédons à l'insolation continue de la fibre pour évaluer son absorption induite.

IV.1.1.A. Absorption des fibres non insolées

Nous avons testé quatre fibres : deux avec une concentration en aluminium non négligeable (comprise entre 8 et 10% en poids), ce sont les fibres D#1 et D#2, et deux avec une concentration en aluminium proche de zéro ($\sim 0.3\%$ en poids), ce sont les fibres D#5 et D#7.

Dans le domaine spectral de notre étude, 2 eV – 4.1 eV (300 nm – 600 nm), les défauts, excités sous 5.1 eV (244 nm), Ge-ODC et Si-ODC(II) de la fibre présentent deux bandes de luminescence centrées autour de 2.7-2.8 eV (442 – 460 nm) et 4.3-4.4 eV (281 – 288 nm) pour les Si-ODC(II) et de 3.0 -3.2 eV (387 – 414 nm) et 4.2-4.3 eV (288 – 295 nm) pour les Ge-ODC [Skuja 1998]. La Figure IV-2 présente leur diagramme d'énergie. L'excitation sous 244 nm permet la transition entre l'état fondamental singulet (S_0) et l'état excité (S_1). Les deux bandes de luminescence sont générées lors des transitions $S_1 \rightarrow S_0$ et $T_1 \rightarrow S_0$, comme cela est illustré sur la Figure IV-2.

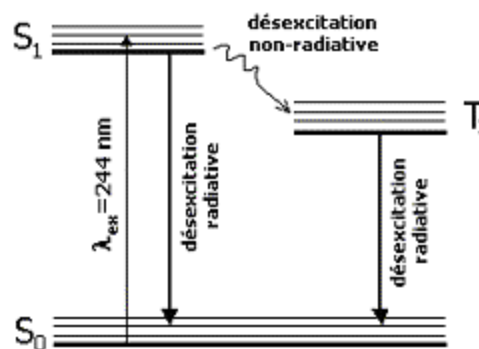


Figure IV-2 : Représentation des niveaux énergétiques et des transitions des Si-ODC et Ge-ODC.

La Figure IV-3 nous présente les spectres en sortie des fibres D#1 et D#5 lors d'une insolation ponctuelle et transversale sous laser UV à 244 nm. Pour chacun de ces deux spectres nous avons cherché à tracer les courbes enveloppes (en trait continu) à la lumière du spectre de la Figure IV-1. Ces courbes sont une somme de Gaussiennes représentant les bandes de luminescence des deux défauts précédemment cités. Pour cela, nous avons utilisé trois Gaussiennes centrées à 2.7 eV, 3.1 eV et 4.2 eV.

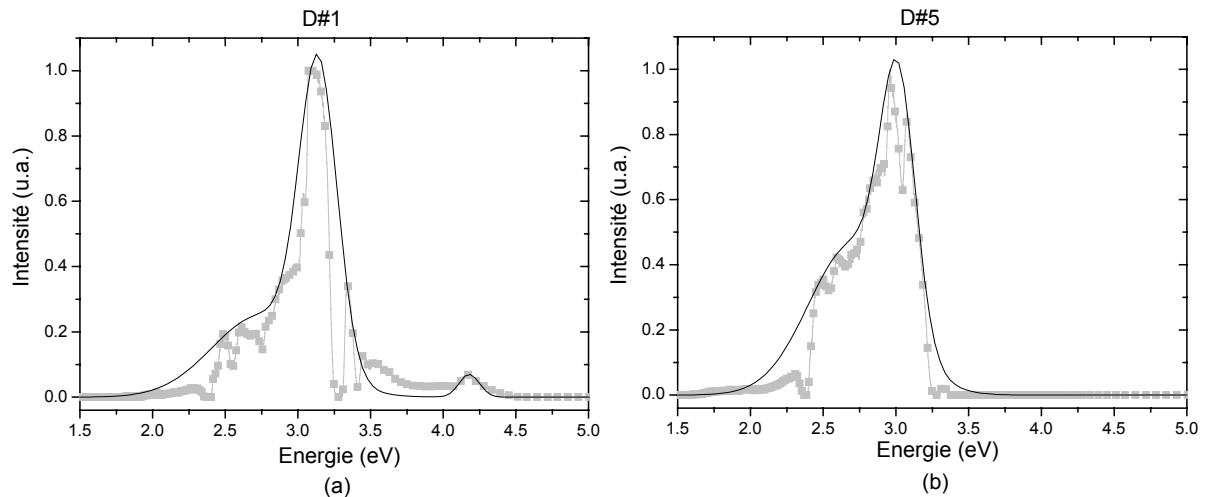


Figure IV-3 : Spectres de la luminescence des fibres D#1(a) et D#5 (b) lors d'une insolation ponctuelle et transversale par un laser UV (244 nm). Les données expérimentales sont tracées avec les symboles noirs. Les lignes rouges correspondent à la luminescence des défauts ODC.

La luminescence générée lors de l'excitation ponctuelle est absorbée partiellement par les ions erbium lors de sa propagation dans la fibre. Par-dessus ces spectres de luminescence de défauts s'ajoute l'absorption des ions erbium présents dans le cœur de nos fibres. La Figure IV-4 présente les spectres, sous excitation ponctuelle, en sortie de fibre pour nos quatre échantillons. Ces spectres sont normalisés à l'unité pour faciliter la comparaison. Nous pouvons ainsi observer les raies d'absorption dues aux transitions suivantes de l'erbium : ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{7/2}$ (355 nm), ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$ (364 nm), ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$ (377 nm), ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{9/2}$ (407 nm), ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$ (451 nm), ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ (487 nm) et ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ (552 nm).

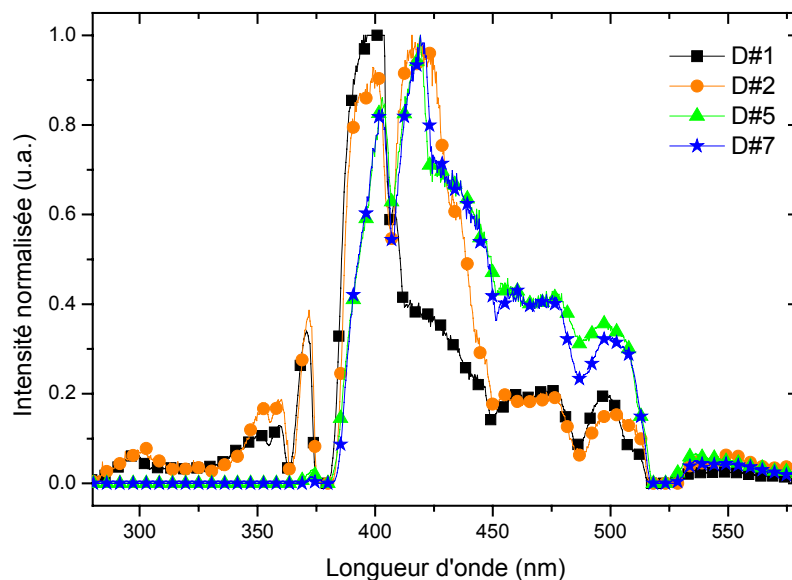


Figure IV-4 : Spectres en sortie des fibres D#1, D#2, D#5 et D#7 lors d'une excitation ponctuelle et transversale sous UV à 244 nm

Les quatre fibres possèdent un comportement fort semblable dans la plage spectrale étudiée. La fibre D#7, ayant une concentration en erbium un peu plus élevée que la fibre D#5, présente une absorption plus importante que cette dernière. Les spectres des fibres D#1 et D#2 ne diffèrent

appréciablement que dans le domaine spectral 400 - 450 nm. Dans ce domaine la fibre D#2 se comporte comme les fibres D#5 et D#7. Ces trois fibres se caractérisent par une plus faible concentration en aluminium par rapport à la fibre D#1. De ce fait, l'excès de l'absorption entre 400 et 450 nm de la fibre D#1 pourrait être imputable à des centres liés à l'aluminium.

IV.1.1.B. Détermination des coefficients d'absorption

Nous avons acquis plusieurs spectres de luminescence de la fibre D#1 de la même manière que précédemment (c'est à dire avec une brève insolation ponctuelle et transversale par le laser UV) mais en réduisant la longueur de fibre qui sépare le point d'insolation et le détecteur. Lors du déplacement de la fibre entre deux insolutions successives, le faisceau laser est obstrué. Nous avons réalisé cette expérience avec 9 m de fibre D#1 et en déplaçant la fibre de 90 cm entre chaque mesure. Cette procédure revient à reproduire la méthode du « cut-back » sans avoir ni à couper la fibre ni à modifier l'injection. La Figure IV-5 reproduit les spectres acquis pour trois longueurs différentes. Cette méthode présente l'avantage d'avoir une excellente reproductibilité et est indépendante de la puissance du laser utilisé pour l'insolation.

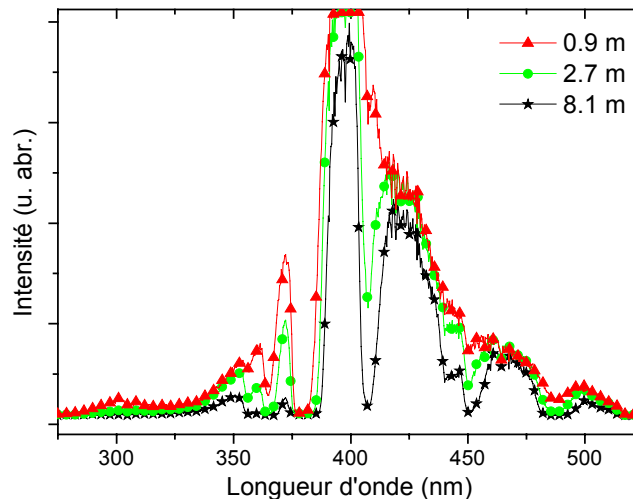


Figure IV-5 : Spectres de la fibre D#1 pour plusieurs longueurs de fibres entre le point d'insolation avec le laser UV (244 nm) et le détecteur

Cette figure montre clairement que l'amplitude des pics d'absorption de l'erbium (identifiés dans le paragraphe précédent) augmente avec la longueur de fibre séparant le point d'insolation et le détecteur.

Dans la Figure IV-6, nous avons reporté l'intensité de la luminescence I de la fibre D#1 en fonction de la longueur de fibre x entre le point d'insolation avec le laser UV (244 nm) et le détecteur placé en sortie de fibre pour trois longueurs d'onde différentes : deux relatives à l'erbium (407 nm et 450 nm) et une à 510 nm en dehors de l'absorption de ce dernier ; cette dernière correspondant à la réponse de la matrice hôte. Nous avons ajusté nos résultats avec une exponentielle décroissante où I_0

est une constante correspondant à l'intensité guidée et générée au point d'impact du laser UV et $\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption :

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot X} \quad (\text{Eq. IV-2})$$

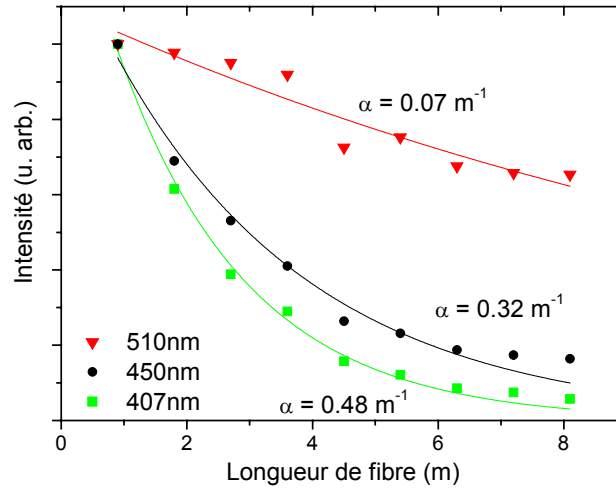


Figure IV-6 : Evolution de l'intensité de la luminescence de la fibre D#1 en fonction de la longueur de fibre entre le point d'insolation avec le laser UV à 244 nm et le détecteur pour différentes longueurs d'onde. Les symboles correspondent aux données expérimentales et les lignes continues aux ajustements.

A partir des ajustements des courbes, nous pouvons calculer le coefficient d'absorption α de la fibre pour chaque longueur d'onde. Pour les trois longueurs d'onde que nous avons tracées dans la Figure IV-6, nous trouvons les valeurs suivantes :

- $\alpha = 0.48 \text{ m}^{-1}$ pour $\lambda = 407 \text{ nm}$
- $\alpha = 0.32 \text{ m}^{-1}$ pour $\lambda = 450 \text{ nm}$
- $\alpha = 0.07 \text{ m}^{-1}$ pour $\lambda = 510 \text{ nm}$

Moyennant cette approche nous sommes donc en mesure de déterminer l'absorption des ions erbium ainsi que celle de la matrice hôte de nos fibres optiques en utilisant le même principe que dans la méthode du « cut back » (méthode décrite dans paragraphe II.3.3) et sans avoir à couper la fibre ni à modifier l'injection, comme nous l'avons montré dans l'une de nos communications [Tortech 2007-quater].

IV.1.2. Absorption induite dans les fibres insolées à 244 nm

Après la détermination des coefficients d'absorption à différentes longueurs d'onde des fibres vierges, nous avons procédé à l'insolation à 244 nm de nos fibres. Pour cela nous avons déplacé la fibre le long de son axe perpendiculairement au faisceau laser comme décrit dans le paragraphe II.1.5. La fluence des insolutions est calculée à partir des paramètres du laser et du montage expérimental moyennant l'équation IV-1 donnée dans l'introduction de ce chapitre. Nous avons utilisé une fluence de $5.6 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ pour nos insolutions. La Figure IV-7 présente différentes courbes

enregistrées au cours du déplacement de la fibre devant le faisceau laser. Nous pouvons constater que le profil des courbes ne change pas au cours de l'insolation mais l'intensité de la lumière transmise par la fibre diminue avec l'insolation.

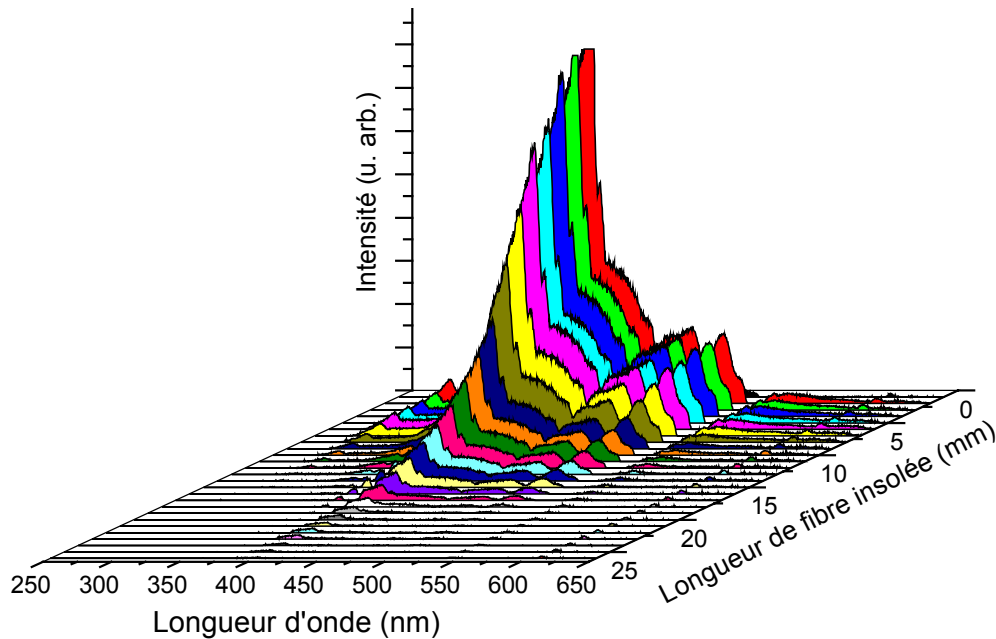


Figure IV-7 : Evolution des spectres transmis en bout de fibre D#1 en fonction de la longueur de fibre insolée à 244 nm.

Afin de suivre l'évolution de l'intensité transmise au cours de l'insolation, nous avons tracé sa variation à différentes longueurs d'onde en fonction de la longueur insolée pour les quatre fibres testées (D#1, D#2, D#5 et D#7), Figure IV-8. Nous avons ajusté nos différentes courbes expérimentales avec une exponentielle décroissante (Eq.IV-3).

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta(\lambda) \cdot x} \quad (\text{Eq. IV-3})$$

où β est le coefficient d'absorption induite par insolation UV.

Pour chaque fibre, nous avons représenté l'évolution de l'intensité de la luminescence à six longueurs d'onde différentes : 400 nm, 420 nm, 535 nm correspondant à la réponse de la matrice hôte et 407 nm, 452 nm, 487 nm correspondant à des bandes de l'absorption de l'erbium. Les valeurs des coefficients d'absorption $\beta(\lambda)$ calculés avec les ajustements sont données en Table IV-2, les valeurs ainsi calculées correspondent aux conditions expérimentales utilisées lors de nos insolutions ; vitesse de déplacement, puissance de laser et focale de la lentille.

Les valeurs des coefficients d'absorption induites des fibres D#1 et D#2 sont inférieures à celles des coefficients des fibres D#5 et D#7. Dans la gamme spectrale (domaine du visible) l'aluminium ne semble pas jouer un rôle important puisque l'atténuation induite ne suit pas l'évolution de la concentration en aluminium. En revanche, nous pouvons constater que de manière générale, pour une fibre donnée, l'évolution est sensiblement la même quelque soit la longueur d'onde. Ceci prouve que la transmission d'une fibre diminue dans son ensemble lors d'une insolation UV : les longueurs

d'onde situées dans les plages spectrales de l'absorption de l'erbium diminuent de la même façon que les longueurs d'onde se situant en dehors de l'absorption de l'erbium. Nous pouvons penser que les pertes induites par l'insolation UV ne sont dues qu'à la matrice hôte de nos fibres. Nous en arrivons donc à la même conclusion que lors des irradiations gamma : les ions erbium d'une fibre dopée ne sont pas directement affectés lorsque cette dernière est soumise à un rayonnement ionisant.

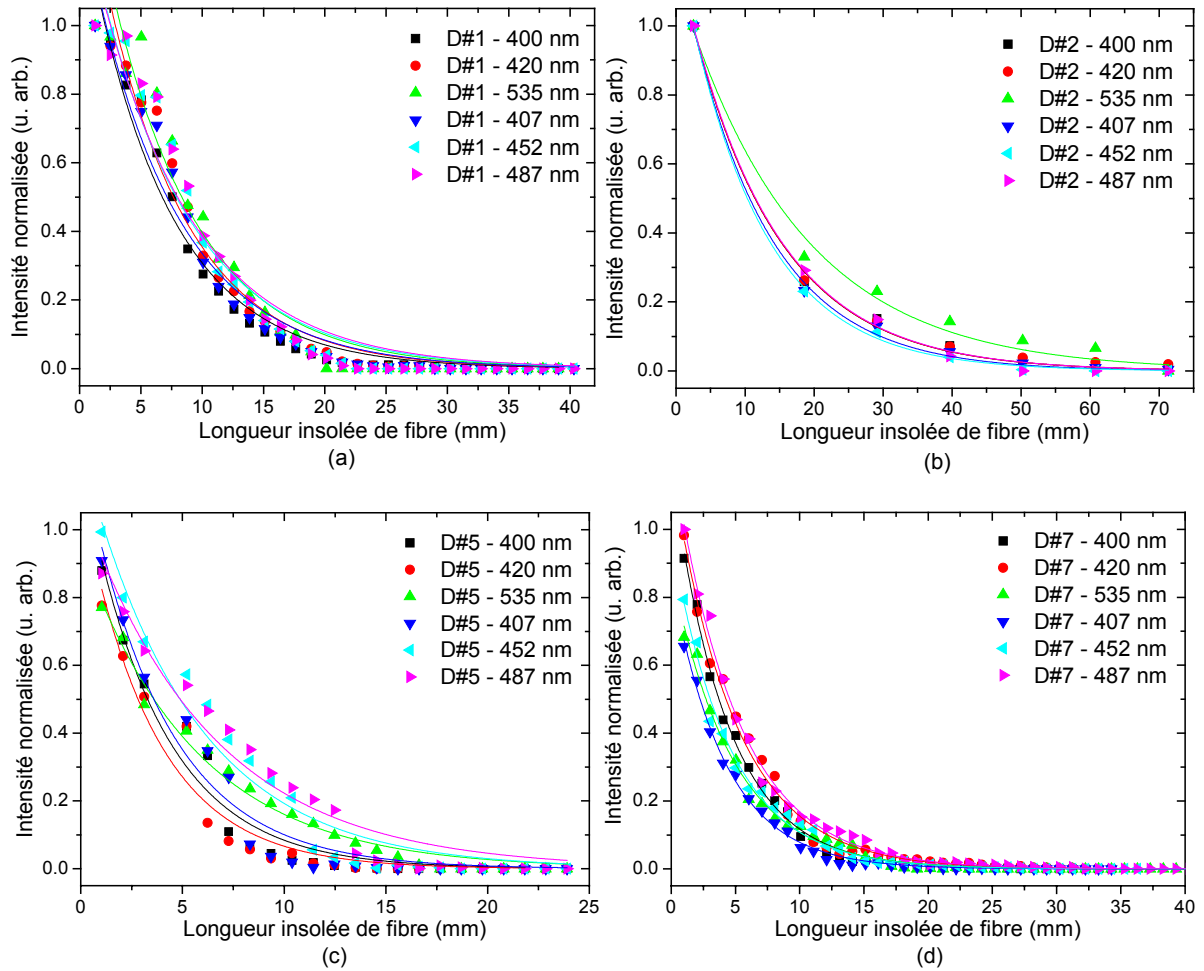


Figure IV-8 : Evolution de l'intensité de la luminescence, à différentes longueurs d'onde, des fibres D#1 (a), D#2 (b), D#5 (c) et D#7 (d) en fonction de la longueur de fibre insolée. Les symboles correspondent aux données expérimentales et les lignes continues aux ajustements des courbes expérimentales.

| | D#1 | D#2 | D#5 | D#7 |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 400 nm | 0.149 mm ⁻¹ | 0.077 mm ⁻¹ | 0.265 mm ⁻¹ | 0.231 mm ⁻¹ |
| 420 nm | 0.147 mm ⁻¹ | 0.077 mm ⁻¹ | 0.281 mm ⁻¹ | 0.204 mm ⁻¹ |
| 535 nm | 0.139 mm ⁻¹ | 0.058 mm ⁻¹ | 0.177 mm ⁻¹ | 0.21 mm ⁻¹ |
| 407 nm | 0.134 mm ⁻¹ | 0.085 mm ⁻¹ | 0.25 mm ⁻¹ | 0.239 mm ⁻¹ |
| 452 nm | 0.13 mm ⁻¹ | 0.089 mm ⁻¹ | 0.186 mm ⁻¹ | 0.22 mm ⁻¹ |
| 487 nm | 0.127 mm ⁻¹ | 0.077 mm ⁻¹ | 0.158 mm ⁻¹ | 0.2 mm ⁻¹ |

Table IV-2 : Coefficients d'absorption induite $\beta(\lambda)$ calculés par les ajustements des évolutions de l'intensité de la lumière transmise par les fibres D#1, D#2, D#5 et D#7 à différentes longueurs d'ondes

IV.2. Mesures post-insolation

De la même manière que pour les trois autres types d'irradiation, gamma continue, proton et X pulsée, nous avons analysé la luminescence dans le domaine du visible de nos fibres après une insolation UV à 244 nm. Nous n'avons pas utilisé la même installation de microspectroscopie que pour les investigations présentées dans le chapitre III (§ II.3.1.A).

Nous avons excité nos fibres avec un laser Argon émettant à 488 nm en utilisant une puissance inférieure à 2 μ W afin d'éviter le photoblanchiment des fibres. Pour chaque fibre testée, insolée UV ou non, nous avons enregistré un spectre dans le cœur et un second dans la gaine sans changer les réglages du microscope, seule la fibre est déplacée sous le faisceau sonde afin de passer du cœur à la gaine. Les intensités acquises diffèrent d'une fibre à l'autre puisque les réglages sont modifiés à chaque changement de fibres. Afin de les comparer plus facilement nous avons normalisé les spectres de cœur sur la raie à 547 nm. Les spectres de gaine ont été divisés par le même coefficient que celui du spectre de cœur associé afin de ne pas modifier les intensités relatives entre le cœur et la gaine d'un même échantillon.

IV.2.1. Luminescence dans le domaine du visible

Dans la Figure IV-9, nous présentons les spectres de photoluminescence acquis, avec le protocole précédemment décrit, dans le cœur des quatre fibres vierges et insolées UV, et en insert de chaque graphe, nous avons tracé les spectres acquis dans la gaine de nos échantillons.

Dans tous les cas, les spectres de gaines donnent le même profil de courbe, seules les intensités changent d'un spectre à l'autre. Ce sont donc les mêmes défauts qui sont à l'origine de cette luminescence dans les échantillons vierges et insolés, c'est la concentration des défauts qui change : elle est plus élevée dans les échantillons insolés.

Afin d'identifier les défauts présents dans la gaine de nos fibres, nous avons ajusté les spectres de luminescence avec des Gaussiennes dont les paramètres (position du centre et largeur à mi-hauteur) sont fixes et les valeurs prises dans la littérature. Nous avons utilisé quatre Gaussiennes pour ajuster tous nos spectres acquis en gaine. Les paramètres des quatre défauts utilisés sont récapitulés en Table IV-3. Un exemple des ajustements que nous avons effectués est donné en Figure IV-10 pour les spectres de gaine vierge et insolée UV de la fibre D#1.

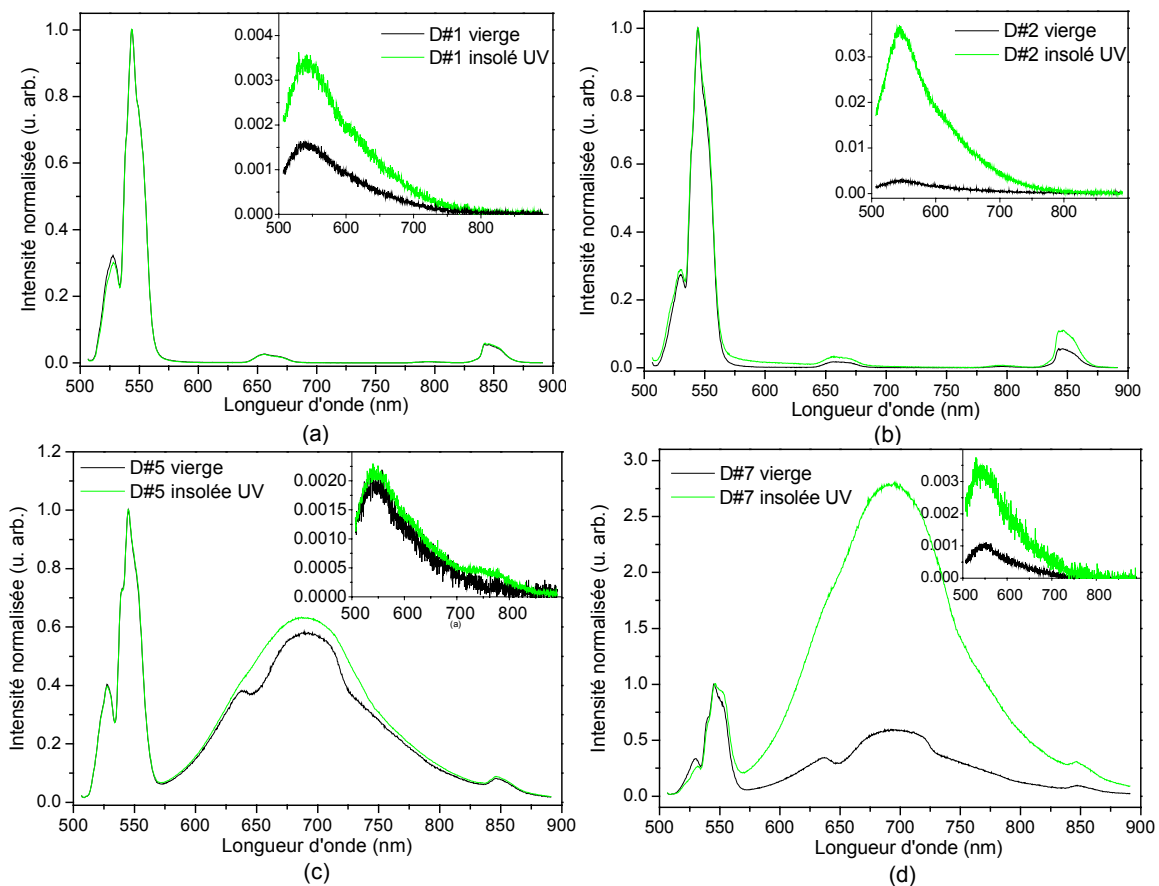


Figure IV-9 : Spectres normalisés de la photoluminescence acquise dans le cœur et en insert dans la gaine des différents échantillons vierges et insolés UV des fibres D#1 (a), D#2 (b), D#5 (c) et D#7 (d). Le laser d'excitation émet à 488 nm.

| Position du centre (eV) | Position du centre (nm) | FWHM (eV) | Défaut | Référence |
|-------------------------|-------------------------|-----------|---------------------|----------------|
| 1.75 | 709 | 0.32 | Défaut relatif à Si | [Girard 2005] |
| 1.84 | 674 | 0.2 | Ge-NBOHC | [Skuja 1996] |
| 2 | 620 | 0.2 | Si-NBOHC | [Chan 2003] |
| 2.27 | 546 | 0.37 | POR | [Sakurai 2000] |

Table IV-3 : Paramètres des Gaussiennes d'ajustement relatives aux défauts pour les spectres de photoluminescence de la gaine de nos fibres.

Les trois premiers défauts de la Table IV-3 ont déjà été identifiés dans le chapitre III pour les échantillons irradiés gamma, protons ou aux rayons X. Nous avons deux types de NBOHC (l'un lié aux atomes silicium [Chan 2003] et l'autre lié aux atomes de germanium [Skuja 1996]) et des défauts relatifs aux atomes de silicium [Girard 2005]. Nishikawa *et al.* [Nishikawa 1996] associe la bande à 1.75 eV (709 nm) à des nanocristaux de silicium formés à partir d'agrégats de silicium présents dans la silice lors d'irradiation gamma à haute dose. Cette hypothèse n'est pas en contradiction avec les travaux de Girard *et al.* [Girard 2005]. La dernière bande de luminescence centrée vers 2.27 eV (546 nm) n'avait pas été utilisée lors des premiers ajustements dans le chapitre III, cela n'est pas dû au changement de type du rayonnement utilisé mais au changement de la longueur d'onde

d'excitation pour les mesures de luminescence comme nous le verrons dans le paragraphe suivant (§ IV.2.2).

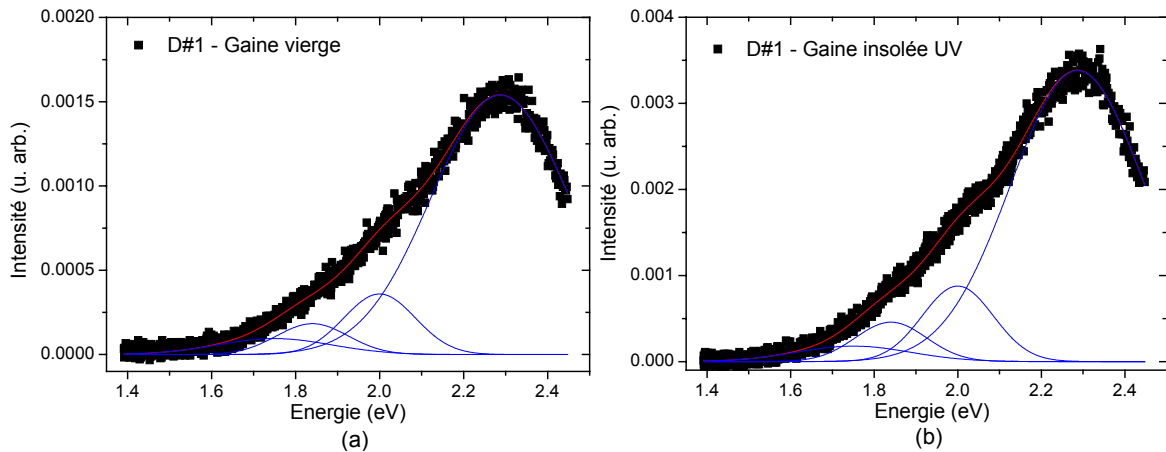


Figure IV-10 : Spectres de luminescence des gaines vierge (a) et insolée UV (b) de la fibre D#1. Les données expérimentales sont tracées avec les symboles et les ajustements tracés avec les lignes sont une somme de quatre Gaussiennes.

Nous avons également fait les ajustements des spectres de cœurs de nos quatre fibres vierges et insolées UV. Un exemple est donné en Figure IV-11 pour la fibre D#5. Les Gaussiennes tracées en bleu correspondent aux défauts et les Gaussiennes tracées en vert correspondent aux bandes de luminescence des ions erbium.

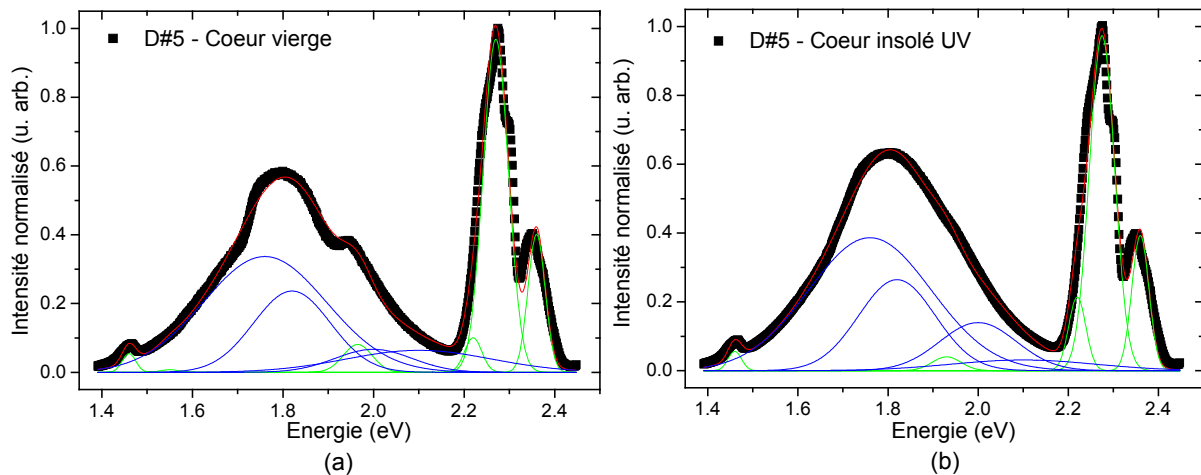


Figure IV-11 : Spectres de luminescence des cœurs vierge (a) et insolé UV (b) de la fibre D#5. Les données expérimentales sont tracées avec les symboles et les ajustements tracés avec les lignes sont une somme de Gaussiennes.

Pour ajuster les spectres acquis pour les cœurs des fibres, nous avons utilisé les mêmes paramètres de Gaussiennes que ceux pris pour les gaines en ce qui concerne les défauts (Table IV-3) et éventuellement le défaut centré à 2.1 eV (590 nm) (FWHM ≈ 0.38 eV) identifié dans le chapitre III (cf. Table III-7). Pour les bandes relatives aux ions erbium, nous avons utilisé les mêmes bandes que dans le chapitre III (§ III.2.1.A) à l'exception de celle dont le centre se situe vers 1.88 eV dont le centre est décalé à 1.94 eV (663 nm). La Table IV-4 récapitule les paramètres des Gaussiennes relatives aux transitions de l'erbium.

| Position du centre (eV) | Position du centre (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 | $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ |
| 1.94 | 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 IV-4 : Paramètres des Gaussiennes d'ajustement relatives aux transitions de l'erbium pour les spectres de photoluminescence du cœur de nos fibres.

Les ajustements de nos courbes montrent que les mêmes défauts sont présents dans le cœur et la gaine de nos fibres. Nous notons que, à l'inverse des fibres D#5 et D#7, les fibres D#1 et D#2 ne présentent pas de luminescence significative due aux défauts dans leurs spectres de cœur (cf. Figure IV-9). Les différences entre ces deux groupes de fibres sont liées à la différence de concentrations du cœur en aluminium et germanium. Les fibres D#5 et D#7 ont une concentration beaucoup plus élevée en germanium et n'ont pratiquement pas d'aluminium. Les défauts les plus présents dans les fibres D#5 et D#7, même avant l'insolation UV, sont des défauts relatifs au silicium et les Ge-NBOHC. Les fibres D#1 et D#2 ne présentent pas de luminescence significative autour de 1.77 eV (700 nm). Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette observation :

- L'introduction d'aluminium, quoiqu'à l'origine de la formation de défauts spécifiques, empêche la formation des défauts générant une luminescence autour de 1.77 eV (700 nm)
- Les défauts à l'origine de la luminescence vers 1.77 eV (700 nm) dans les fibres D#5 et D#7 sont bien présents aussi dans les fibres D#1 et D#2 mais la présence d'aluminium modifie leur couplage à la matrice et entraîne une désexcitation non radiative.

Pour vérifier ces hypothèses des mesures supplémentaires d'absorption autour de 1.77 eV (700 nm) sont nécessaires.

IV.2.2. Comparaison des spectres de luminescence dans le domaine du visible des échantillons insolés UV et irradiés gamma

Afin de vérifier si une insolation UV et une irradiation gamma créent les mêmes défauts dans nos fibres, nous allons comparer les spectres de luminescence de nos fibres après irradiation gamma et insolation UV. Nous avons repris les spectres des fibres irradiées gamma dans les mêmes conditions que ceux des fibres insolées UV. En effet, depuis le début des travaux de thèse, nous avons changé d'installation de microspectrométrie. Les mesures faites sur les fibres insolées UV ont été réalisées sous excitation à 488 nm alors que celles antérieures sur les fibres irradiées gamma ont été effectuées moyennant une excitation à 514.5 nm (§ III.2.1.A).

Les figures IV-12 et IV-13 présentent les spectres de photoluminescence acquis dans le cœur et dans la gaine des fibres D#2 et D#7 vierges, insolées UV et irradiées gamma (à 3kGy). Les spectres de cœur sont toujours normalisés sur le pic de l'erbium à 547 nm. Pour ne pas alourdir la présentation, nous n'avons pas reproduit les spectres des fibres D#1 et D#5 puisque le comportement de ces deux fibres est similaire à celui des fibres D#2 et D#7 respectivement. Si nous comparons ces spectres de luminescence de cœur et de gaine avec ceux du chapitre III (§ III.2.1.A) pour les échantillons irradiés gamma, nous constatons que les bandes dont l'intensité augmente sous l'effet des radiations ne sont pas identiques. Ceci est dû au changement de la longueur d'onde d'excitation qui entraîne une modification du spectre d'émission.

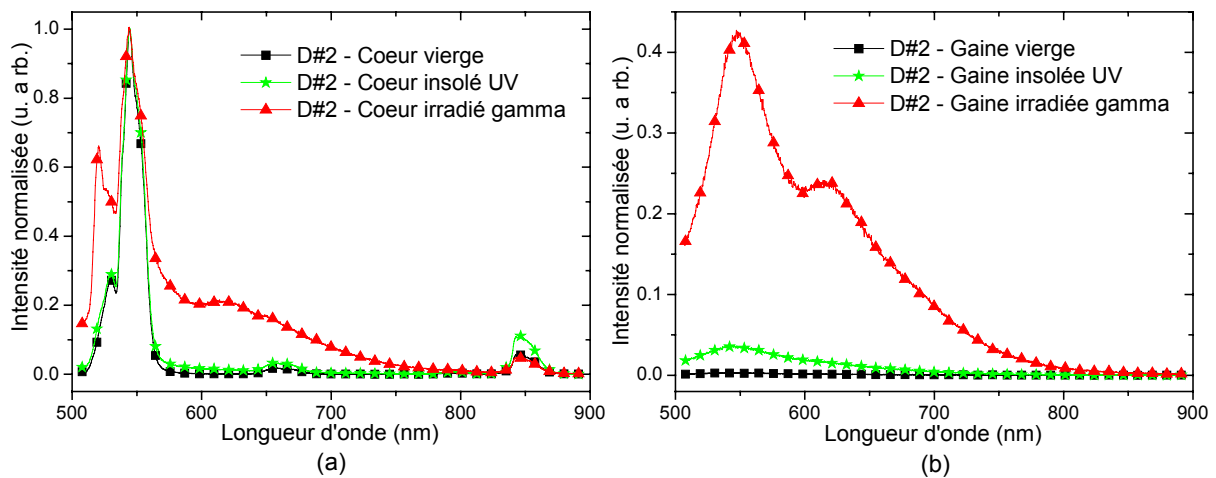


Figure IV-12 : Spectres de photoluminescence acquis dans le cœur (a) et dans la gaine (b) de la fibre D#2 vierge, insolée UV et irradiée gamma

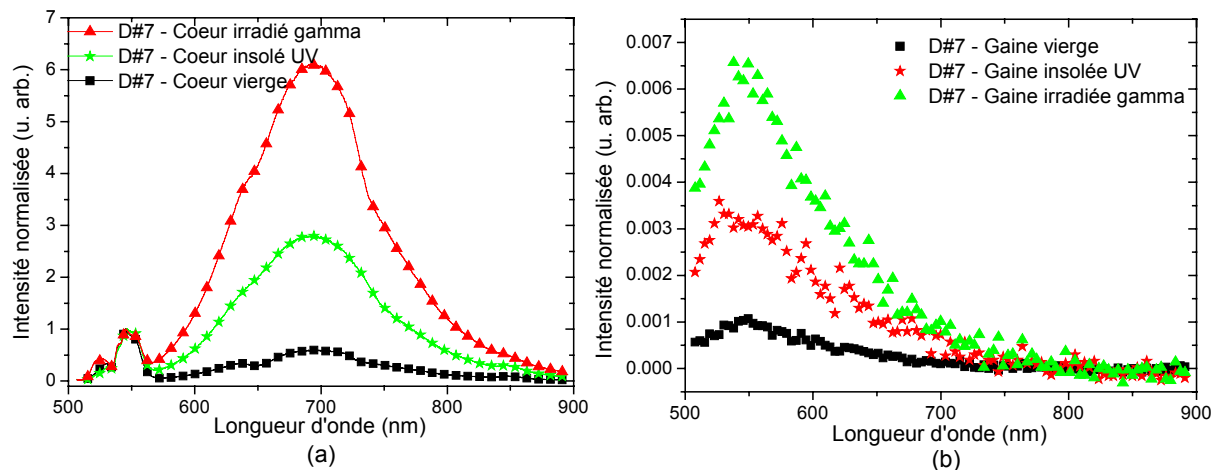


Figure IV-13 : Spectres de photoluminescence acquis dans le cœur (a) et dans la gaine (b) de la fibre D#7 vierge, insolée UV et irradiée gamma

Nous constatons, pour les deux fibres, que les spectres acquis dans les gaines ont des profils similaires (une bande de luminescence centrée vers 550 nm qui s'étend jusque vers 750 nm) mais les intensités sont plus grandes pour les échantillons irradiés gamma que pour les échantillons insolés UV. Dans le cœur de la fibre D#2, nous observons une faible augmentation de l'intensité de la bande de luminescence centrée vers 550 nm qui s'étend jusque vers 750 nm (la même bande que dans la gaine

de nos fibres) pour l'échantillon insolé UV et une plus forte augmentation pour l'échantillon irradié gamma, par rapport à l'échantillon vierge. Dans le cœur de la fibre D#7, c'est la bande autour de 700 nm qui augmente sous l'effet des radiations ionisantes. Cette bande est déjà présente dans l'échantillon vierge mais son intensité augmente significativement dans l'échantillon insolé UV et est plus importante dans celui irradié gamma. Ces observations nous conduisent à penser que les défauts créés par une insolation UV sont de même nature que ceux créés par irradiation gamma.

Afin de vérifier si les bandes de luminescence dont l'intensité augmente sous l'effet des radiations sont bien les mêmes pour les deux types de rayonnement (UV et rayons gamma) nous avons ajusté nos courbes par une somme de Gaussiennes, avec les mêmes paramètres que précédemment utilisés (cf. Table IV-3 et Table IV-4) pour les fibres D#1 et D#2. Les spectres ajustés des cœurs des fibres D#2 et D#7 insolées UV et irradiées gamma sont présentés en Figures IV-14 et IV-15 respectivement ; en insert de ces figures sont présentés les spectres ajustés acquis en gaine des mêmes fibres.

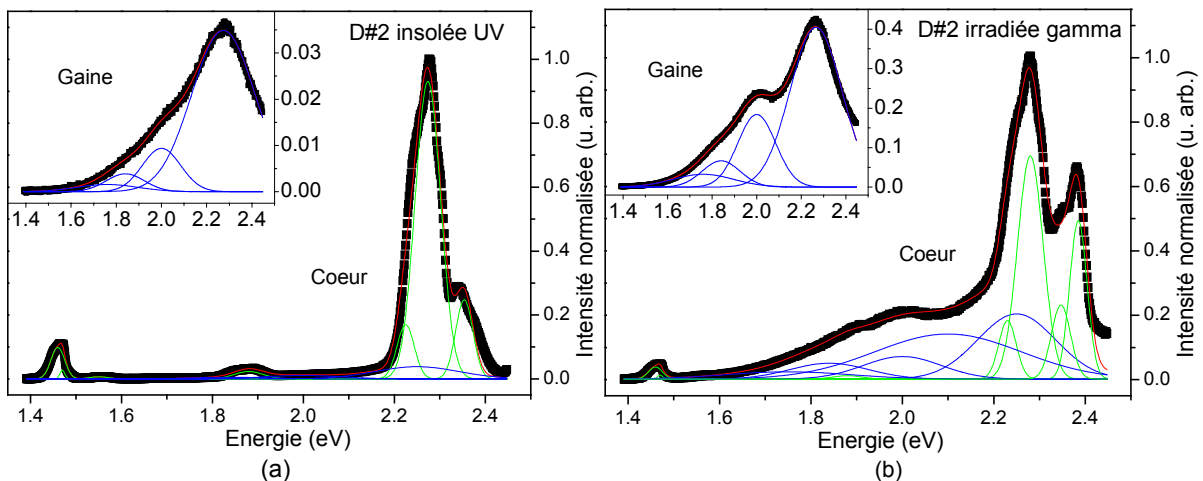


Figure IV-14 : Spectres de photoluminescence acquis dans le cœur (en insert spectres de la gaine) des échantillons insolé UV (a) et irradié gamma (b) de la fibre D#2. Les symboles représentent les données expérimentales, les lignes rouges correspondent à la somme des Gaussiennes d'ajustement, les lignes vertes sont les Gaussiennes relatives à l'erbium et les lignes bleues sont celles relatives à des défauts.

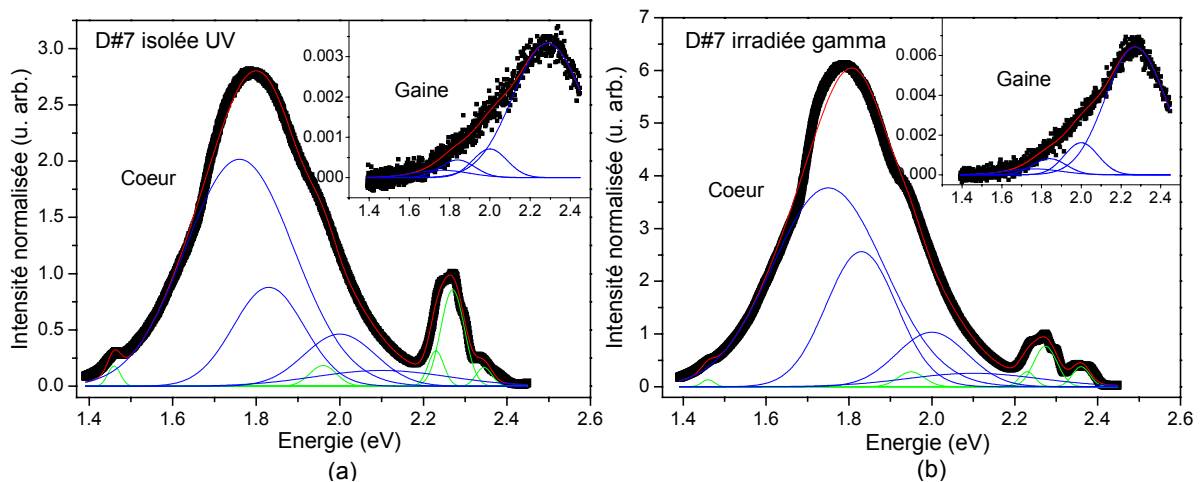


Figure IV-15 : Spectres de photoluminescence acquis dans le cœur (en insert spectres de la gaine) des échantillons insolé UV (a) et irradié gamma (b) de la fibre D#7. Les symboles représentent les données expérimentales, les lignes rouges correspondent à la somme des Gaussiennes d'ajustement, les lignes vertes sont les Gaussiennes relatives à l'erbium et les lignes bleues sont celles relatives à des défauts.

Pour les spectres des deux fibres présentées ici, nous observons clairement que les défauts mis en jeu entre les échantillons insolés UV et irradiés gamma sont les mêmes : tous les spectres aussi bien de gaine que de cœur montrent la présence des mêmes défauts quelque soit le type de radiation utilisé. Nous pouvons donc en conclure que les défauts créés lors d'une insolation UV et d'une irradiation gamma sont de même nature et il est donc possible de simuler les effets d'une irradiation gamma par une insolation UV. Par contre, les intensités relatives des bandes de luminescence des défauts (Figures IV-12 et IV-13) ne sont pas égales. Les expériences ont été réalisées avec une seule fluence et les comparaisons effectuées à une seule dose totale reçue. Il est nécessaire de poursuivre ces expériences en fonction des fluences et des doses totales reçues afin d'établir une correspondance UV - gamma.

IV.3. Résumé

Dans ce chapitre nous avons déterminé les coefficients d'absorption et ceux d'absorption induite par insolation UV des fibres dopées erbium et montré la pertinence de la méthode développée en laboratoire utilisant une source de lumière intrinsèque à la fibre [Tortech 2007-quater]. Les mesures de luminescence post-insolation que nous avons réalisées nous ont permis de montrer que les défauts mis en jeu lors d'une insolation UV sont liés à la matrice hôte des fibres. Les centres colorés identifiés lors de nos mesures sont des Ge-NBOHC, des Si-NBOHC, des POR, des POHC et des défauts relatifs au silicium. La concentration de ces défauts est augmentée lors de l'insolation UV. Nous avons donc comparé les spectres de luminescence des échantillons irradiés gamma et insolés UV. Les mêmes défauts sont créés par chacun des deux types de rayonnement. De la même façon que pour les fibres optiques multimodes germano-silicates [Girard 2003], il est possible de simuler les effets d'une irradiation gamma par une insolation UV pour des fibres dopées erbium.

Chapitre V. 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.

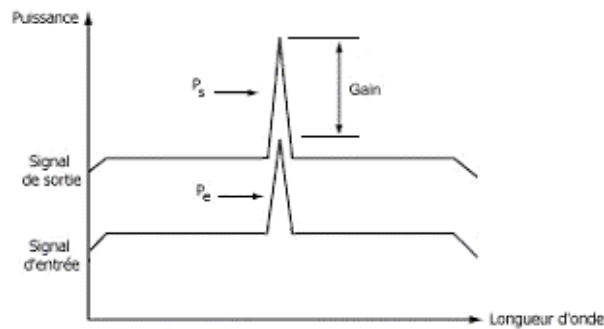


Figure V-1 : Mesures spectrales de la puissance pour le calcul du gain d'un EDFA

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.

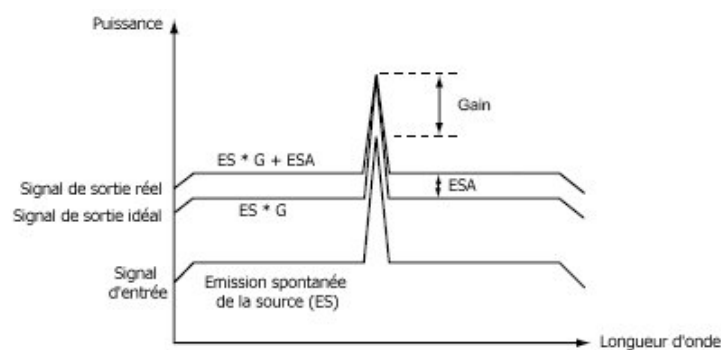


Figure V-2 : Spectres d'entrée et de sortie d'un EDFA montrant les niveaux d'émission spontanée et de signal

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.

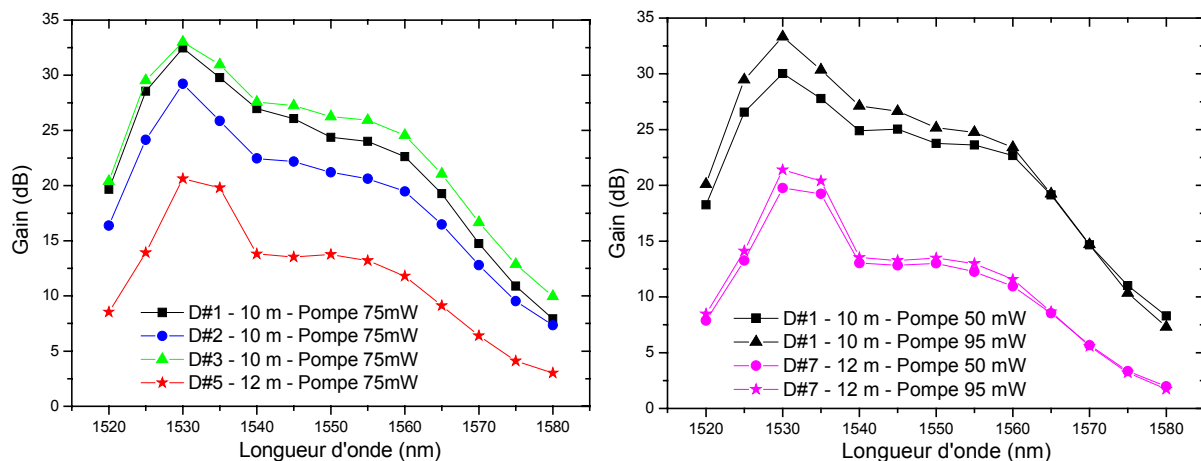


Figure V-3 : Gain en fonction de la longueur d'onde des fibres D#1, D#2, D#3, D#5 et D#7 avant irradiation pour différentes puissances de pompe

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.

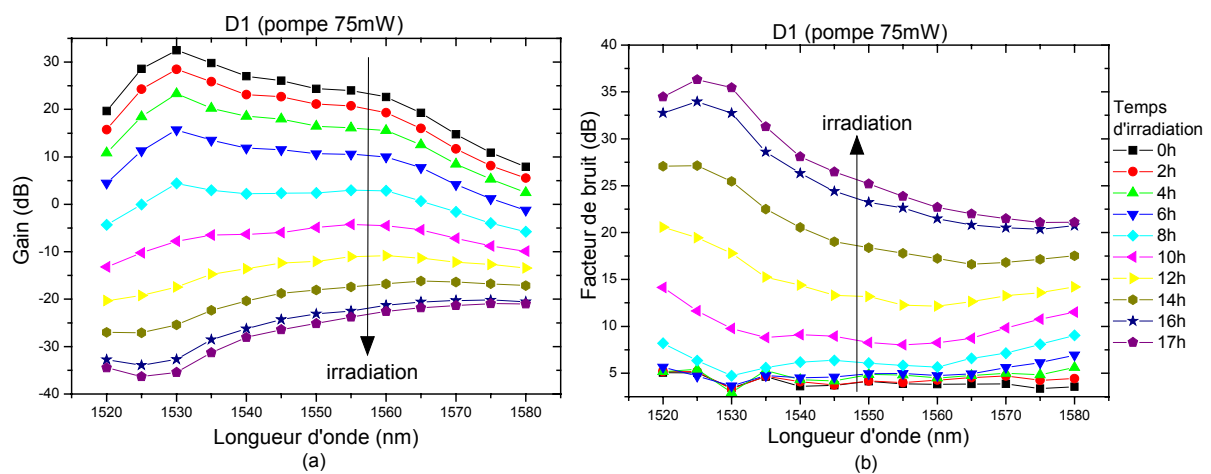


Figure V-4 : Evolution en fonction de la longueur d'onde du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D1 à différents temps d'irradiation

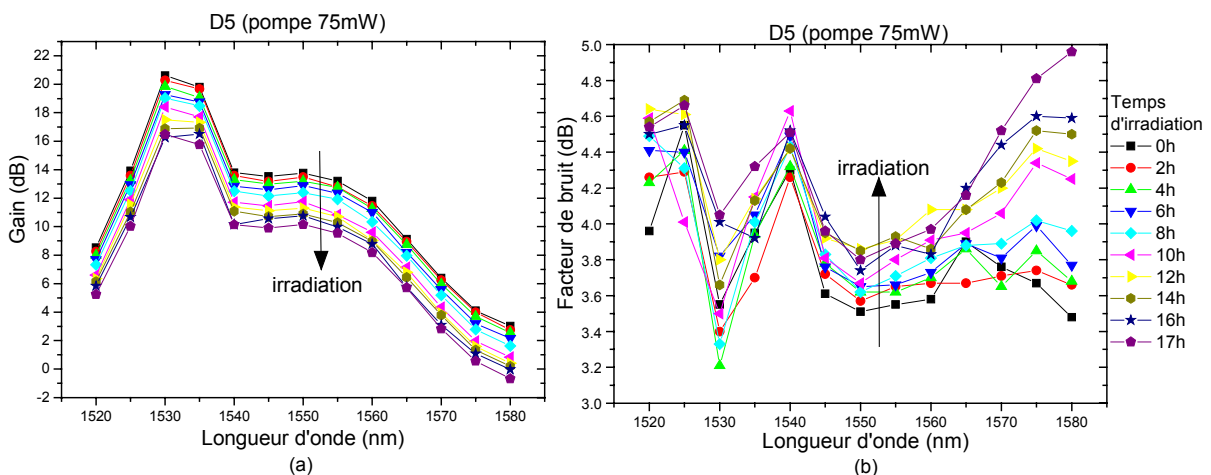


Figure V-5 : Evolution en fonction de la longueur d'onde du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D5 à différents temps d'irradiation

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.

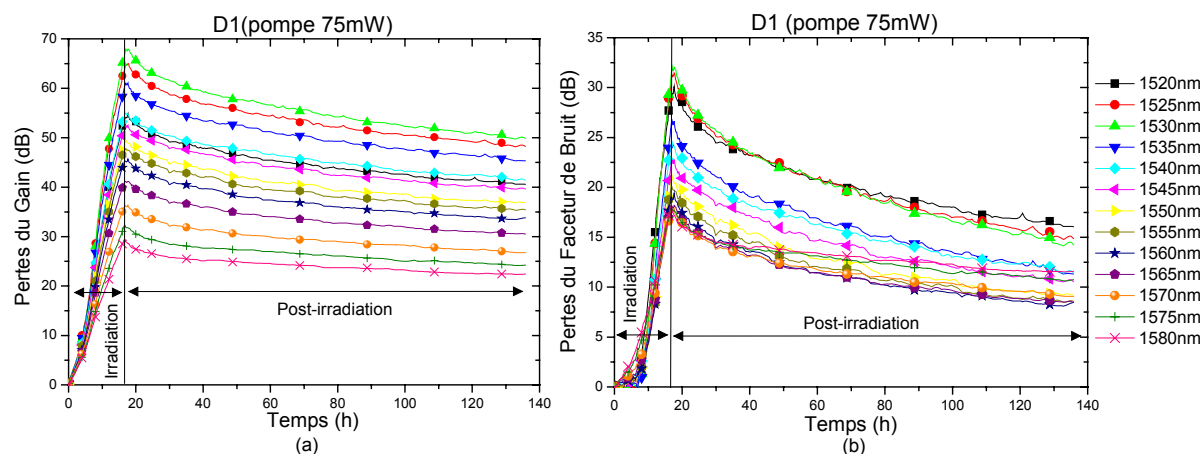


Figure V-6 : Evolution temporelle des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D1 pour chaque longueur d'onde mesurée

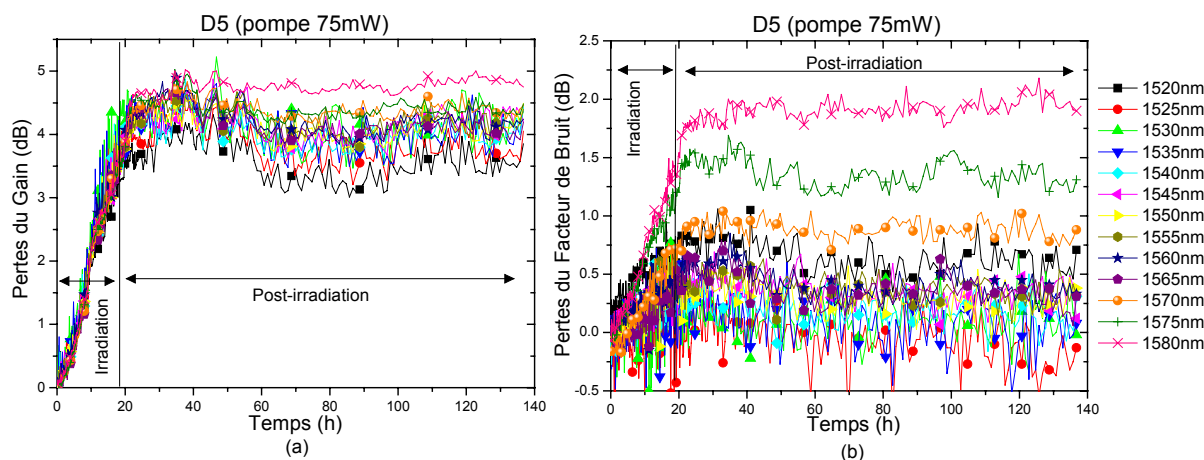


Figure V-7 : Evolution temporelle des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) de l'amplificateur D5 pour chaque longueur d'onde mesurée

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.

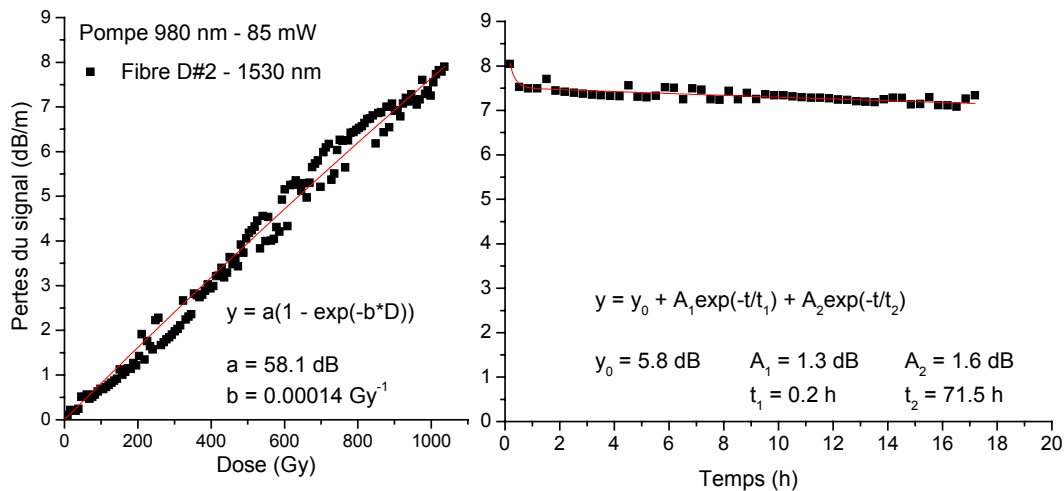


Figure V-8 : Evolution temporelle des pertes induites à 1530 nm de la fibre D#2 en fonction de la dose pendant l'irradiation et en fonction du temps après l'irradiation (Débit de dose : 45 Gy·h⁻¹). Les carrés noirs correspondent aux données expérimentales et les lignes rouges aux ajustements des données.

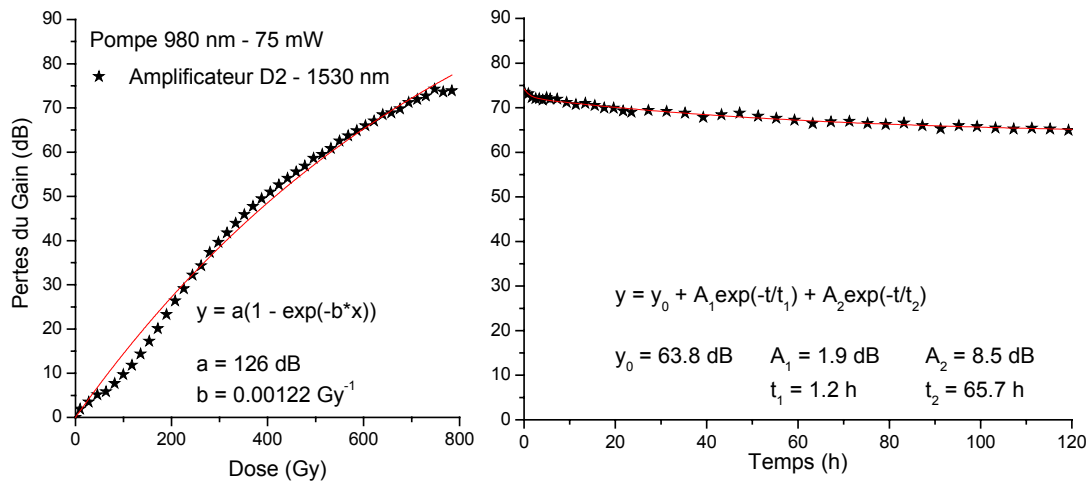


Figure V-9 : Evolution temporelle des pertes induites à 1530 nm de l'amplificateur D2 en fonction de la dose pendant l'irradiation et en fonction du temps après l'irradiation (Débit de dose : 45 Gy·h⁻¹). Les étoiles noires correspondent aux données expérimentales et les lignes rouges aux ajustements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

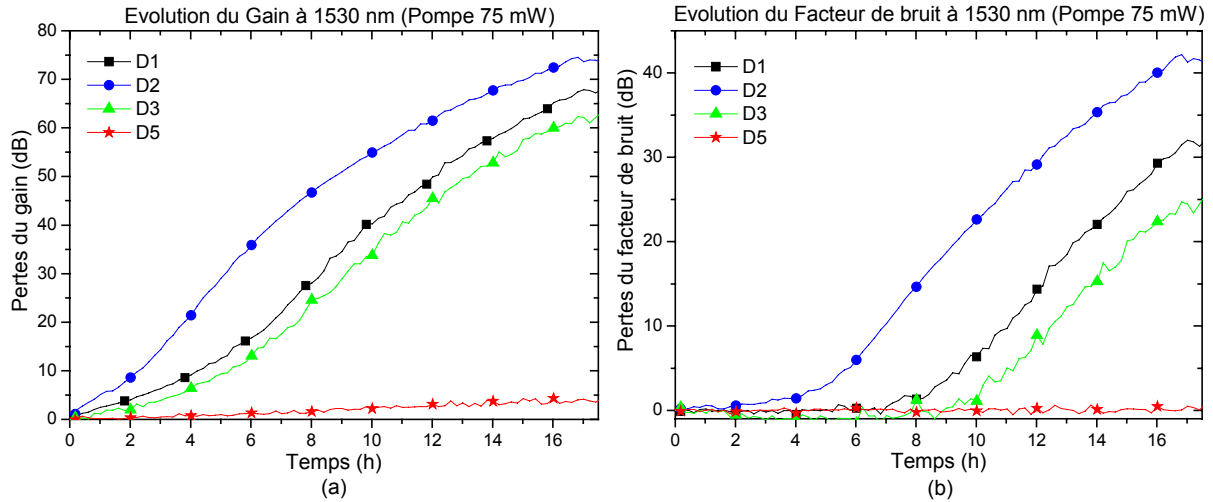


Figure V-10 : Evolution des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) des quatre amplificateurs D1, D2, D3 et D5 pendant l'irradiation (débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)

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.

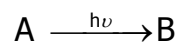
L'augmentation du facteur de bruit serait donc due au moins à deux facteurs : d'une part à la diminution du signal de l'erbium causée par l'atténuation induite de la fibre elle-même et d'autre part à la diminution de la puissance de pompage circulant dans la fibre, comme nous venons d'en discuter. Les 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.

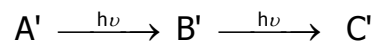
Une fois formé à partir de l'espèce A, deux éventualités se présentent pour l'espèce B

- 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 :

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

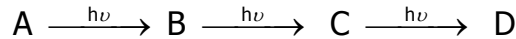
Dans ce cas les pertes induites A_{IR} s'écrivent :

$$A_{IR}(t) = \sigma_b N_b(t) + \sigma_{c'} N_{c'} \quad (\text{Eq. V-10})$$

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.

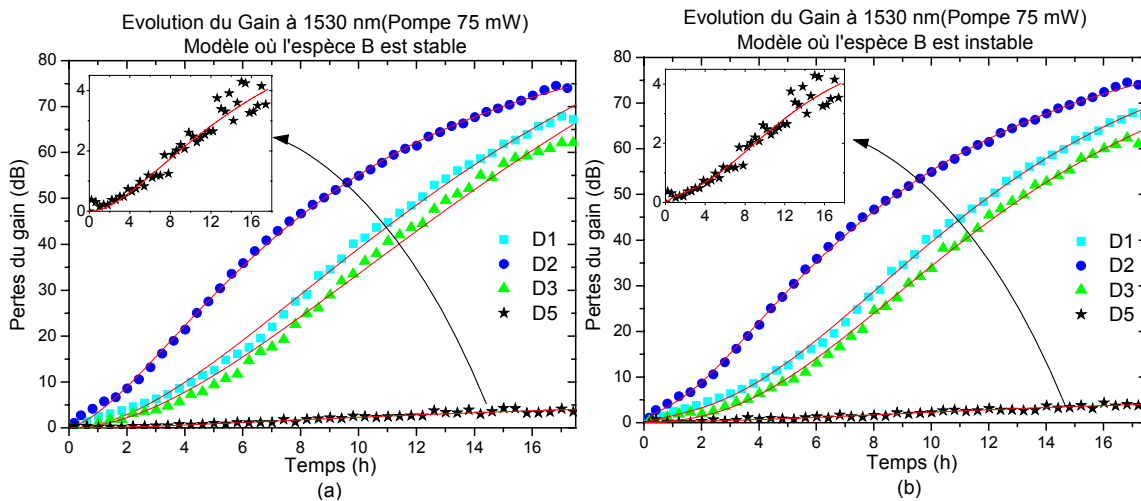


Figure V-11 : Evolution des pertes du gain à 1530 nm des quatre amplificateurs D1, D2, D3 et D5 pendant l'irradiation (débit de dose : $45 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$). Les symboles correspondent aux données expérimentales et les lignes continues aux ajustements réalisés avec le modèle où l'espèce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

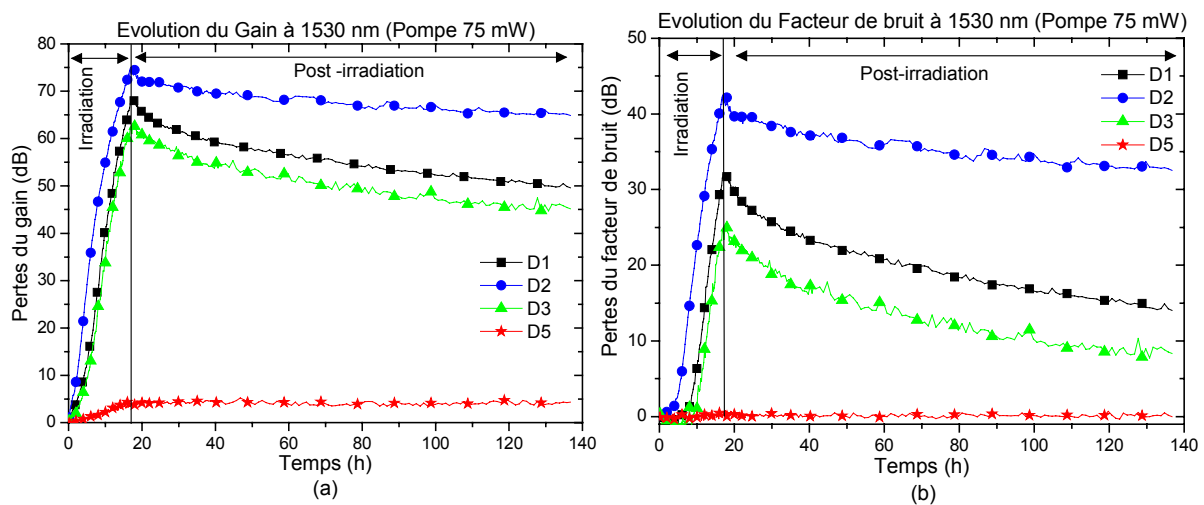


Figure V-12 : Evolution des pertes du gain (a) et du facteur de bruit (b) des quatre amplificateurs D#1, D#2, D#3 et D#5 pendant et après l'irradiation (débit de dose : $45 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)

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.

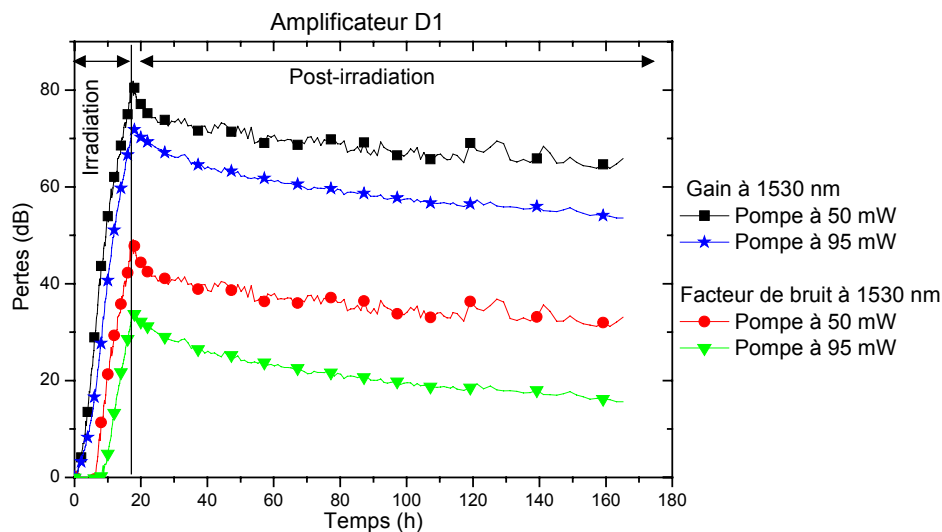


Figure V-13 : Evolution des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm de l'amplificateur D1 pour deux puissances de pompe différentes (50 mW et 95 mW) lors de l'irradiation gamma et pendant 150 h après l'arrêt de l'irradiation

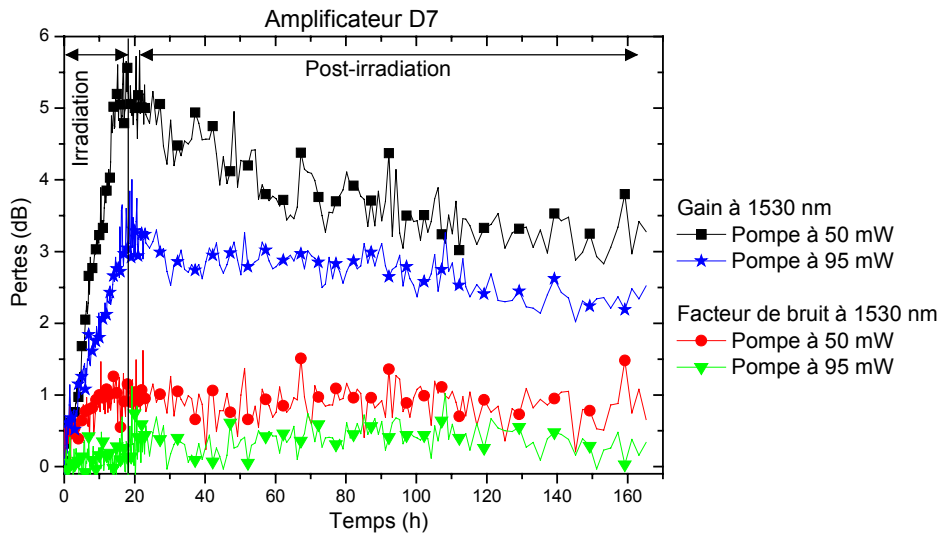


Figure V-14 : Evolution des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm de l'amplificateur D7 pour deux puissances de pompe différentes (50 mW et 95 mW) lors de l'irradiation gamma et pendant 150 h après l'arrêt de l'irradiation

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.

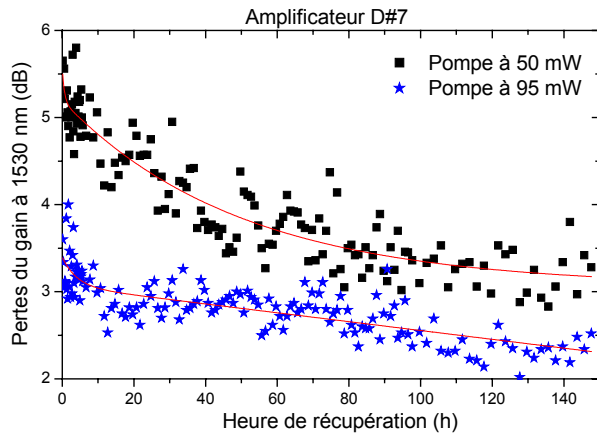


Figure V-15 : Evolution des pertes du gain à 1530 nm après l'arrêt de l'irradiation de l'amplificateur D7 pour les puissances de pompe 50 mW et 95 mW. Les symboles correspondent aux données et les lignes rouges aux ajustements

| | 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 pompage 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.

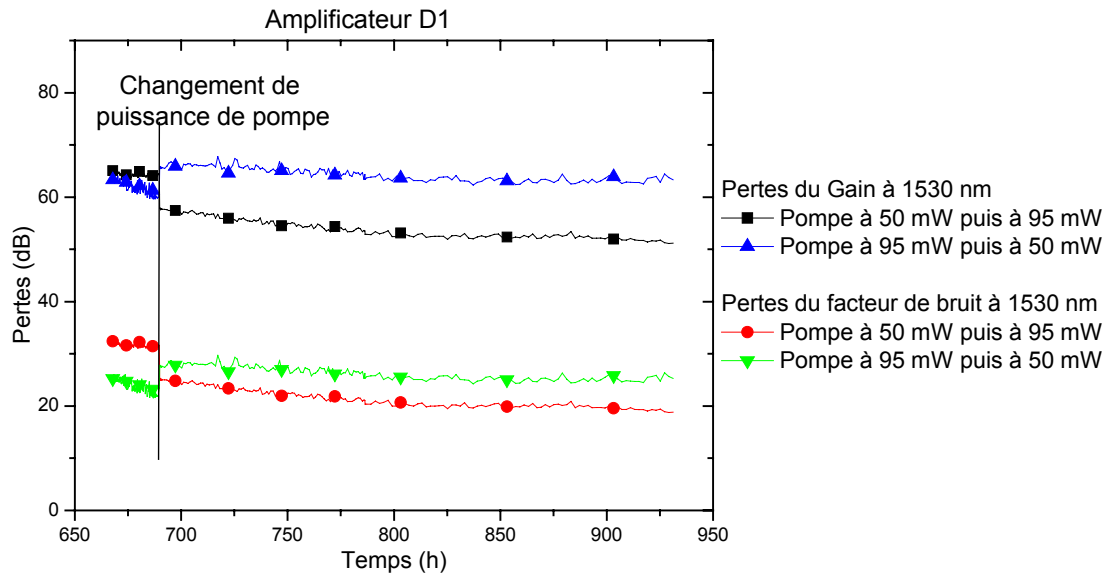


Figure V-16 : Evolution des pertes du gain et du facteur de bruit à 1530 nm de l'amplificateur D1 pour deux puissances de pompe différentes (50 mW et 95 mW) quelques jours après l'arrêt de l'irradiation gamma (le temps est décompté depuis le début de l'irradiation)

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 ($\sim 10\%wt$).

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.

CONCLUSION

Par ces travaux de thèse nous avons cherché à identifier les défauts mis en jeu lors de l'irradiation des fibres dopées erbium utilisées dans les amplificateurs optiques (EDFA) et responsables des dégradations des performances de ces dernières. Pour cela nous avons procédé à l'irradiation gamma, aux protons et sous rayons X pulsés de plusieurs fibres dopées erbium présentant des différences de composition.

Nous avons tout d'abord soumis nos fibres dopées erbium à des irradiations continues gamma avec un débit de dose de l'ordre de la quarantaine de $\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ et ce jusqu'à une dose totale rencontrée dans les applications spatiales, autrement dit d'environ quelques kGy. La sensibilité des fibres dopées erbium est bien plus élevée en comparaison avec celle de fibres classiques utilisées pour la transmission des télécommunications. Elle est de l'ordre de $10^{-3} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$ contre $10^{-5} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$ pour les fibres type SMF28. Les fibres dopées erbium n'ayant pratiquement pas d'aluminium dans leur composition présentent une atténuation inférieure d'un ordre de grandeur par rapport aux compositions d'aluminium habituellement utilisées dans ce type de fibres. La concentration en erbium, quant à elle, n'a pas d'influence sur les valeurs de pertes induites dans les fibres. Autrement dit les centres absorbants responsables des dégradations des performances des fibres sont liés à la matrice hôte. Dans le domaine spectral étudié (600 nm – 1800 nm), les pertes induites par radiation augmentent avec la diminution de la longueur d'onde. En suivant l'évolution des pertes induites en fonction de la dose déposée, nous observons une saturation de ces pertes. Ce comportement témoigne de l'existence préalable à l'irradiation de centres précurseurs des défauts. Ce phénomène pourrait être utilisé pour le durcissement des fibres par pré-irradiation.

Plusieurs de nos fibres ont également été soumises à des irradiations continues aux protons. Nous avons utilisé deux énergies de protons différentes pour mener nos tests, et nous n'avons pas observé d'influence significative de l'énergie utilisée sur la réponse de nos fibres. De plus, les évolutions des pertes induites en fonction de la dose déposée sous protons et sous irradiation gamma sont similaires. Il semble donc possible de simuler les effets d'une irradiation aux protons par une irradiation gamma. Cette constatation est également étayée par les mesures spectroscopiques. Une

irradiation gamma est plus aisée à mettre en œuvre qu'une irradiation aux protons ; substitution intéressante permettant de simplifier les tests futurs des fibres pour l'environnement spatial.

Pour la première fois, à notre connaissance, nous avons testé la sensibilité de fibres dopées erbium sous irradiations pulsées avec des rayons X. Les pertes induites transitoires des fibres montrent également un effet de saturation. Cet effet pourrait être expliqué, au moins en partie, par la transformation, en grande proportion, des centres responsables de la composante transitoire de l'atténuation induite. Cette transformation définitive pourrait également être exploitée pour le durcissement par une pré-irradiation des fibres destinées à opérer en environnement pulsé.

Les mesures spectroscopiques pré- et post-irradiation qui ont été réalisées nous ont permis de confirmer que les ions erbium ne sont pas directement affectés par les radiations. Les défauts responsables des pertes induites sont liés à la matrice hôte. Lors de nos mesures de photoluminescence, nous avons identifié plusieurs bandes de luminescence qui sont attribuées à différents défauts. Nous avons notamment établi la présence de *Non Bridging Oxygen Hole Centers* (NBOHC), de *Phosphorus Oxygen Hole Centers* (POHC), et de centres déficitaires en oxygène (ODC). Nos mesures nous ont permis de mettre en évidence la présence antérieure à l'irradiation de ces défauts. L'irradiation ne fait qu'augmenter leur concentration aussi bien dans le cœur des fibres que dans la gaine. Les défauts ainsi identifiés ne font pas intervenir explicitement l'aluminium ; élément déterminant pour les pertes induites de nos fibres sous irradiation. Cependant son incorporation dans la matrice hôte des fibres dopées erbium lors de leur fabrication favorise la création de centres précurseurs des défauts induits par irradiation. La modification de la spectroscopie des ions erbium dans le visible serait donc comme dans l'infrarouge due à l'interaction avec ces défauts et non à la modification de ses niveaux d'énergie. La diminution de la durée de vie du niveau métastable de l'erbium (${}^4I_{13/2}$) dans les échantillons irradiés indique la création d'un nouveau canal de désexcitation des ions erbium. On constate aussi que les plus grandes longueurs d'onde sont plus affectées par l'irradiation. Ceci pourrait s'expliquer par la présence de centres P1 provenant des transformations post-irradiation des centres POHC. Ces derniers présentent une bande d'absorption vers 1620 nm proche du domaine spectral de la transition ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ de l'erbium. Il serait par ailleurs intéressant de déterminer la répartition radiale de l'atténuation de nos fibres à l'aide du banc de mesure développé par S. Girard dans sa thèse [Girard 2003, Girard 2003 bis], afin de la comparer à la répartition radiale des dopants. D'autres mesures post-irradiation seraient intéressantes à effectuer pour vérifier si les radiations ont des effets ou non sur les caractéristiques de propagation des fibres, on pourrait notamment mesurer avant et après irradiation le diamètre de mode, les propriétés de dispersion.

Afin de comparer les effets d'une insolation par un laser UV et ceux d'une irradiation gamma sur les fibres dopées erbium, nous avons procédé à l'insolation de nos fibres. Le dispositif expérimental utilisé permet de suivre l'évolution de la luminescence centrée à 400 nm et générée au sein de nos fibres. Nous avons observé une atténuation de l'intensité de cette luminescence en fonction de la

longueur de fibre insolée ; résultat des dégradations que subit la matrice hôte sous insolation UV. Avec ce même banc d'expérience, nous sommes également capables de remonter aux coefficients d'absorption de l'erbium dans le domaine visible. Les mesures de luminescence post-irradiation réalisées sur nos échantillons insolés UV et irradiés gamma ont mis en exergue la création des mêmes défauts au sein de la matrice hôte. Il est donc possible de simuler des effets d'une irradiation gamma par une insolation UV ; ces dernières étant plus simples à réaliser.

Nos fibres dopées erbium ont aussi été testées en mode actif ; en configuration d'amplificateurs optiques. Lors de ces essais sous irradiation gamma, les fibres n'ayant presque pas d'aluminium dans leur composition ont montré les plus faibles pertes induites, confirmant les résultats observés lors des tests en mode passif. La dégradation des performances des amplificateurs optiques sous irradiation est une conséquence directe de l'augmentation de l'atténuation induite aussi bien à la longueur d'onde de pompage qu'à celle du signal erbium. L'augmentation de la puissance de pompage permet de photoblanchir certains défauts et ainsi de limiter les dégradations des performances de l'amplificateur. A la vue des résultats obtenus lors de ces travaux, il est donc plus intéressant d'utiliser une fibre dopée erbium sans ou avec le minimum d'aluminium possible afin de réaliser un amplificateur optique et comme les pertes induites sont plus faibles pour les plus grandes longueurs d'onde, il serait alors plus judicieux d'utiliser un pompage optique à 1480 nm plutôt qu'à 980 nm.

Des travaux antérieurs ont montré que les fibres microstructurées [Poli 2007, Russell 2007] offrent la même sensibilité sous irradiation que la silice dont elles sont constituées [Girard 2003]. Henschel *et al.* [Henschel 2005] ont montré que les fibres à cristal photonique (PCF) ont une très bonne résistance sous irradiation continue gamma, grâce aux progrès faits dans le développement de ces dernières. De plus, des fibres PCF avec un cœur solide dopé erbium ont été réalisées et présentent des caractéristiques d'amplification supérieures par rapport aux fibres classiques à saut d'indice [Cucinotta 2003]. Il peut être envisageable de doper des fibres PCF avec de l'erbium et le moins d'aluminium possible, réalisées à partir de silice dite « durcie », en vue de les utiliser dans les amplificateurs optiques en environnements radiatifs.

Les pertes optiques induites dans le domaine visible et aux longueurs d'onde d'émission dans les lasers fibrés de puissance, appelé « photodarkening », est un problème d'actualité. L'atténuation induite dans le milieu amplificateur est lié à la création de centres absorbants aussi bien transitoires que permanents. Ces derniers conduisent comme le rapporte par exemple Engholm *et al.* [Engholm 2007] à une réduction de 10% environ de la puissance de sortie au bout d'un millier d'heures. Les mécanismes responsables de la formation des défauts dans les verres dopés aux Terres-Rares ne sont pas encore complètement élucidés. Les résultats et les approches développées dans cette thèse ouvrent la voie à une meilleure compréhension de ce phénomène dont l'étude constituerait une suite logique intéressante à ce travail.

GLOSSAIRE

- A_{IR}** : Pertes induites par radiation
- ASE** : Amplified Spontaneous Emission
- EDFA** : Erbium Doped Fiber Amplifier
- EDFL** : Erbium Doped Fiber Laser
- ES** : Emission Spontanée
- ESA** : Emission Spontanée Amplifiée
- FB** : Facteur de Bruit
- FWHM** : Full Width at Half Maximum
- G** : Gain
- GeNOV** : Germanium Neutral Oxygen Vacancy
- GLPC** : Germanium Long Pair Center
- MCVD** : Modified Chemical Vapor Deposition
- NBOHC** : Non-Bridging Oxygen Hole Center
- ODC** : Oxygen Deficient Center
- OSA** : Optical Spectrum Analyzer
- OTDR** : Optical Time Domain Reflectometry
- PM** : Photomultiplicateur
- PMMA** : PolyMethylMethAcrylate
- POHC** : Phosphorus Oxygen Hole Center
- POR** : Radical Peroxy

RIS : Radiation Induced Sensitivity

SiNOV : Silicon Neutral Oxygen Vacancy

SLPC : Silicon Long Pair Center

STH : Self Trapping Hole

WDM : Wavelength Division Multiplexing

LISTE DES PUBLICATIONS ISSUES DES TRAVAUX DE THÈSE

Publications dans des revues internationales avec comité de lecture

"Gamma radiation induced loss in erbium doped optical fibres"

B. Torteck, M. Van Uffelen, A. Gusarov, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont.

Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 353, 477- 480, 2007.

"Pulsed X-ray and continuous gamma radiation effects on erbium doped optical fibres properties"

B. Torteck, A. Gusarov, M. Van Uffelen, J. Bisutti, S. Girard, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont

IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, pp. 2598-2603, 2007.

"Proton- and gamma-induced effects on erbium-doped optical fibers"

S. Girard, B. Torteck, E. Régnier, M. Van Uffelen, A. Gusarov, Y. Ouerdane, J. Baggio, P. Paillet, V. Ferlet-Cavrois, A. Boukenter, J-P. Meunier, F. Berghmans, J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, J.A. Felix, E.W Blackmore, H. Thienpont

IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, pp. 2426-2434 , 2007.

"UV laser irradiation-induced defects and absorption in a single mode erbium-doped optical fiber"

B. Torteck, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, S. Girard, M. Van Uffelen, E. Régnier, F. Berghmans, H. Thienpont

Optical Materials, in press, 2008.

"Radial distribution of radiation effects in proton irradiated erbium-doped optical fiber: micro-luminescence study"

B. Torteck, S. Girard, E. Régnier, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, M. Van Uffelen, A. Gusarov, F. Berghmans, H. Thienpont

Submitted to IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007.

Communications à des conférences internationales avec actes

"Gamma radiation induced loss in erbium doped optical fibres"

B. Torteck, M. Van Uffelen, A. Gusarov, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont

The 6th symposium SiO₂, Advanced Dielectrics and Related Devices (SiO₂ 2006), Palermo (Italy), June 25-28, 2006.

"Pulsed X-ray and continuous gamma radiation effects on erbium doped optical fibers properties"
B. Torteck, A. Gusarov, M. Van Uffelen, J. Bisutti, S. Girard, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont
Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS 2006), Athens (Greece), September 27-29, 2006.

"UV laser irradiation-induced defects and absorption in a single mode erbium-doped optical fiber"
B. Torteck, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, S. Girard, M. Van Uffelen, E. Régnier, F. Berghmans, H. Thienpont
Photoluminescence in Rare Earths: Photonic Materials and Devices (PRE'07), Trento (Italy), May 31– June 1st, 2007.

"105 MeV and 50 MeV proton-induced effects on erbium-doped optical fibers"
S. Girard, B. Torteck, E. Régnier, M. Van Uffelen, A. Gusarov, Y. Ouerdane, J. Baggio, P. Paillet, V. Ferlet-Cavrois, A. Boukenter, J-P. Meunier, F. Berghmans, J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, J.A. Felix, E.W Blackmore, H. Thienpont
IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC 2007), Honolulu (Hawaii), July 23-27, 2007.

"Radial distribution of radiation effects in proton irradiated erbium-doped optical fiber: micro-luminescence study"
B. Torteck, S. Girard, E. Régnier, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, M. Van Uffelen, A. Gusarov, F. Berghmans, H. Thienpont
Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS 2007), Deauville (France), September 10-14, 2007.

"10 keV X-ray Radiation effects on Yb- and Er/Yb-doped optical fibers: a micro-luminescence study"
S. Girard, Y. Ouerdane, C. Marcandella, T. Robin, A. Boukenter, B. Cadier, J-P. Meunier, B. Torteck, P. Crochet
Optical Fibre Sensors 2008 (OFS-19), Perth (Australia), April 14-18, 2008.

Communications à des conférences Nationales avec Actes

"Fibres optiques dopées erbium sous environnement ionisant"
B. Torteck, E. Régnier, M. Van Uffelen, A. Gusarov, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, F. Berghmans, H. Thienpont.
25èmes Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG 2006), Metz, 7-9 novembre 2006, pp. 238-240.

"Influence des irradiations UV sur les fibres optiques dopées erbium : Mesure directe des pertes induites"
B. Torteck, Y. Ouerdane, A. Boukenter, J-P. Meunier, E. Regnier, S. Girard, et M. Van Uffelen
26èmes Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG 2007), Grenoble, 2-5 juillet 2007, pp. 356-358.

Séminaires

" Présentation de la thèse : Étude de composants à fibres optiques sous rayonnement"
B. Torteck
Draka Comteq France, Marcoussis, 5 juillet 2005.

" Avancement de la thèse : Étude de composants à fibres optiques sous rayonnement"
B. Torteck
Vrije Universiteit Brussel, Bruxelles, 9 juin 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- Abas A.F., Hidayat A., Sandel D., Milivojevic B., Noe R. (2007)
"100 km fiber span in 292 km, 2.38 Tb/s (16 ×160 Gb/s) WDM DQPSK polarization division multiplex transmission experiment without."
Optical Fiber Technology, Vol. 13, pp. 46-50.
- Ahrens R.G., Abate J.A., Jaques J.J., Presby H.M., Fields A.B., DiGiovanni D.J., Windeler R.S., Kannan S., LuValle M.J. (1999)
"Radiation reliability of Rare Earth doped optical fibers for laser communication systems".
Conference on Military Communications, Atlantic City, New Jersey, Vol. 1, pp. 694-697.
- Amosov A.V., Kornev V.V., Malyskin S.F. (1982)
"Multitype radiation color centers at the aluminum atoms in vitreous silicas."
Soviet Journal of Glass Physics and Chemistry, Vol. 7, pp. 142-147.
- Atkins G.R., Wang Z.H., McKenzie D.R., Sceats M.G., Poole S.B., Siommons H.W. (1993)
"Control of defects on optical fibers - A study using cathodoluminescence spectroscopy."
Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, pp. 1793-1801.
- Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. (1999)
"Erbium-Doped Fiber Amplifiers : Fundamentals and Technology"
Academic Press, P.L. Kelly, I. Kaminow and G. Agrawal Eds, San Diego.
- Berghmans F. (2001)
"SCK•CEN - Harwell Dosimeters Limited Red Perspex Dosimetry Exercise"
Internal Report (INSTR/525/01-04), SCK-CEN, Mol, Belgium
- Berneschi S., Bettinelli M., Brenci M., Nunzi Conti G., Pelli S., Sebastiani S., Siligardi C., Speghini A., Righini G.C. (2005)
"Aluminum co-doping of soda-lime silicate glasses: Effect on optical and spectroscopic properties."
Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 351, pp. 1747-1753.
- Blackmore E. (2000)
"Operation of the TRIUMF (20–500 MeV) proton irradiation facility".
IEEE Radiation Effects Data Workshop Record, Reno, Nevada., pp. 1-5.
- Borgermans P. (2001)
"Spectral and kinetic analysis of radiation induced optical attenuation in silica: towards intrinsic fibre optic dosimetry?"
PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussel

Boucher R.H., Woodward W.F., Lomheim T.S., Shima R.M., Asman D.J., Killian K.M., LeGrand J., Goellner G.J. (1996)
"Proton-induced degradation in interferometric fiber optic gyroscopes."
Optical Engineering, Vol. 35, pp. 955-976.

Brichard B., Fernandez-Fernandez A., Ooms H., Berghmans F. (2003)
"Study of the radiation-induced optical sensitivity in erbium and aluminium doped fibres".
Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) 2003, Noordwijk Zee, Netherlands.
pp. 35-38.

Bussjager R.J., Hayduk M.J., Johns S.T., Taylor E.W. (2001)
"Gamma-ray induced responses in an erbium doped fiber laser".
Aerospace-Conference IEEE Proceedings, Big Sky, Montana, USA., Vol. 3, pp. 3/1473-9.

Caussanel M. (2004)
"Tenue au rayonnement de composants optoélectroniques destinés à l'environnement spatial,
L'amplificateur optique à fibre dopée erbium"
Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier

Caussanel M., Gilard O., Sotom M., Signoret P., Gasiot J. (2005)
"Extrapolation of radiation-induced EDFA gain degradation at space dose rate."
Electronics Letters, Vol. 41, pp. 168-170.

Chan J.W., Huser T., Hayden J.S., Risbud S.H., Krol D.M. (2002)
"Fluorescence Spectroscopy of Color Centers Generated in Phosphate Glasses after Exposure to
Femtosecond Laser Pulses."
Journal of the American Ceramic Society, Vol. 85, pp. 1037-1040.

Chan J.W., Huser T., Risbud S.H., Krol D.M. (2003)
"Modification of the fused silica glass network associated with waveguide fabrication using
femtosecond laser pulses."
Applied Physics A, Vol. 76, pp. 367-372.

Chernov P.V., Dianov E.M., Karpechev V.N., Kornienko L.S., Morozova I.O., Rybaltovskii A.O., Sokolov
V.O., Sulimov V.B. (1989)
"Spectroscopic manifestations of self-trapped holes in silica. Theory and experiment."
Physica Status Solidi - B, Vol. 155, pp. 663-675.

Cucinotta A., Poli F., Selleri S., Vincetti L., Zoboli M. (2003)
"Amplification Properties of Er³⁺-Doped Photonic Crystal Fibers."
Journal of Lightwave technology, Vol. 21, pp. 782-788.

Curie D. (1968)
"Champ cristallin et luminescence"
Gauthiers-Villars, Paris.

Davis M.K., Digonnet M.J.F., Pantell R.H. (1995)
"Characterization of Clusters in Rare Earth-Doped Fibers by Transmission Measurements."
Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, pp. 120-126.

Deparis O. (1997)
"Etude physique et expérimentale de la tenue des fibres optiques aux radiations ionisantes par
spectrométrie visible-infrarouge"
Thèse de Doctorat, Faculté Polytechnique de Mons, Mons

Desurvire E. (1994)
"Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications"
Wiley-interscience, New York, 2nd ed.

- Desurvire E. (2004)
"Wiley Survival Guide in Global Telecommunications: Broadband Access, Optical Communications and Systems, and Cryptography"
Wiley, New York.
- Dianov E.M., Golant K.M., Khrapko R.R., Tomashuk A.L. (1995)
"Nitrogen doped silica core fibres: A new type of radiation-resistant fibre."
Electronics Letters, Vol. 31, pp. 1490-1491.
- Digonnet M.J.F., Davis M.K., Pantell R.H. (1994)
"Rate Equations for Clusters in Rare earth-Doped Fibers."
Optical Fiber Technology, Vol. 1, pp. 48-58.
- Digonnet M.J.F. (2001)
"Rare-Earth-Doped Fiber Laser and Amplifiers"
M. Dekker, New York, 2nd ed.
- Engholm M., Norin L., Åberg D. (2007)
"Strong UV absorption and visible luminescence in ytterbium-doped aluminosilicate glass under UV excitation."
Optics Letters, Vol. 32, pp. 3352-3354
- Fernandez-Fernandez A., Ooms H., Brichard B., Coeck M., Coenen S., Berghmans F., Decréton M. (2002)
"SCK·CEN Gamma Irradiation Facilities for Radiation Tolerance Assessment".
IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) 2002, Phoenix, USA. pp. 171-176.
- Friebele E.J., Schultz P.C., Gingerich M.E. (1980)
"Compositional effects on the radiation response of Ge-doped silica-core optical fiber waveguides."
Applied Optics, Vol. 19, pp. 2910-2916.
- Friebele E. J. and D.L. Griscom (1986)
"Color centers in glass optical fiber waveguides"
in Defects in Glasses - MRS vol. 61; F.J. Galeener, D.L. Griscom and M.J. Weber Eds
Material Research Society, Pittsburgh, pp. 319-331.
- Fujimaki M., Watanabe T., Katoh T., Kasahara T., Miyazaki N., Ohki Y., Nishikawa H. (1998)
"Structures and generation mechanisms of paramagnetic centers and absorption bands responsible for Ge-doped SiO₂ optical-fiber gratings."
Physical Review B, Vol. 57, pp. 3920-3926.
- Fukuda C., Chigusa Y., Kashiwada T., Onishi M., Kanamori H., Okamoto S. (1994)
"Gamma-ray irradiation durability of erbium doped fibres."
Electronics Letters, Vol. 30, pp. 1342-1344.
- Girard S. (2003)
"Analyse de la réponse des fibres optiques soumises à divers environnements radiatifs"
Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne
- Girard S., Trenteseaux I., Ouerdane Y., Meunier J.-P., Boukenter A. (2003 Bis)
"Radial distribution of attenuation in gamma-irradiated single-mode optical fibers."
Applied Physics Letters, Vol. 83, pp. 219-221.
- Girard S., Meunier J.-P., Ouerdane Y., Boukenter A., Vincent B., Boudria A. (2004)
"Spatial distribution of red luminescence in pristine, gamma rays and ultraviolet-irradiated multimode optical fibers."
Applied Physics Letters, Vol. 84, pp. 4215-4217.

- Girard S., Vincent B., Ouerdane Y., Boukenter A., Meunier J.-P., Boudrioua A. (2005)
"Luminescence spectroscopy of point defects in silica-based optical fibers."
Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 351, pp. 1830-1834.
- Girard S., Boukenter A., Meunier J.-P. (2006)
"Transient radiation responses of silica-based optical fibers: Influence of modified chemical-vapor deposition process parameters."
Journal of Applied Physics, Vol. 99, pp. 023104.
- Girard S., Ouerdane Y., Vincent B., Baggio J., Médjahdi K., Bisutti J., Brichard B., Boukenter A., Boudrioua A., Meunier J.-P. (2007)
"Spectroscopic study of γ -ray and pulsed X-ray radiation-induced point defects in pure-silica-core optical fibers."
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, pp. 1136-1142.
- Girard S., Tortech B., Régnier E., Van Uffelen M., Gusarov A., Ouerdane Y., Baggio J., Paillet P., Ferlet-Cavrois V., Boukenter A., Meunier J.-P., Berghmans F., Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Felix J.A., Blackmore E.W., Thienpont H. (2007 Bis)
"Proton- and gamma-induced effects on erbium-doped optical fibers."
IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol. 54, pp. 2426-2434.
- Goutaland F. (1998)
"Processus multiphotoniques, défauts ponctuels et mécanismes de leur formation dans les fibres optiques : Etude par spectroscopie laser."
Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne
- Griscom D.L., Friebele E.J., Long K.J., Fleming J.W. (1983)
"Fundamental defect centers in glass: Electron spin resonance and optical absorption studies of irradiated phosphorus-doped silica glass and optical fibers."
Journal of Applied Physics, Vol. 54, pp. 3743-3762.
- Griscom D.L. (1985)
"Defect structure of glass : Some outstanding questions in regard to vitreous silica."
Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 73, pp. 51-77.
- Griscom D.L. (1985 Bis)
"Nature of defect and defect generation in optical glasses."
SPIE, Vol. 451, pp. 38-59.
- Griscom D.L. (1991)
"Optical Properties and Structure of Defects in Silica Glass."
Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol. 99, pp. 923-942.
- Griscom D.L., Gringerich, Friebele E.J. (1993)
"Radiation-Induced Defects in Glasses: Origin of Power-Law dependence of Concentration on Dose."
Physical Review Letters, Vol. 71, pp. 1019-1022.
- Griscom D.L., Gringerich M., Friebele E.J. (1994)
"Model for the dose, dose-rate and temperature dependence of radiation-induced loss in optical fibers."
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 41, pp. 523-527.
- Griscom D.L. (1995)
"Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers by ultra-high-dose gamma-ray pre-irradiation."
Journal of Applied Physics, Vol. 77, pp. 5008-5013.

Griscom D.L. (1997)

"Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers: reduction of induced absorption bands associated with self-trapped holes."

Applied Physics Letters, Vol. 71, pp. 175-177.

Griscom D.L., Mizuguchi M. (1998)

"Determination of the visible range optical absorption spectrum of peroxy radicals in gamma-irradiated fused silica."

Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 239, pp. 66-77.

Griscom D.L. (2004)

" γ -Ray-induced visible/infrared optical absorption bands in pure and F-doped silica-core fibers: are they due to self-trapped holes?"

Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 349, pp. 139-147.

Guenot P. (2003)

"Propriétés d'atténuation des fibres optiques - Procédés d'élaboration" dans "Physique et technologie des fibres optiques"

Hermès Science Publications, J.-P. Meunier Ed., Paris.

Guillaumond D. (2000)

"Étude et réalisation d'une source à fibre dopée Erbium pour un gyromètre à fibre optique hautes performances"

Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. (1986)

"Drawing condition dependence of radiation-induced loss in optical fibres."

Electronics Letters, Vol. 22, pp. 106-108.

Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. (1987)

"Formation of drawing-induced defects in optical fibers."

Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 95 & 96, pp. 655-662.

Henschel H., Köhn O., Schmidt H.U., Kirchhof J., Unger S. (1998)

"Radiation-induced loss of Rare Earth doped silica fibres."

IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 45, pp. 1552-1557.

Henschel H., Köhn O. (2000)

"Regeneration of irradiated optical fibres by photobleaching?"

IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 47, pp. 699-704.

Henschel H., Kuhnenn J., Weinand U. (2005)

"High radiation hardness of a hollow core photonic bandgap fiber".

Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) 2005, Cap d'Agde, France. pp. LN4-1 - LN4-4.

Hosono H., Weeks R.A. (1990)

"Bleaching of peroxy radical in SiO₂ glass with 5 eV light."

Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 116, pp. 289-292.

Hosono H., Abe Y., Kinser D.L., Weeks R.A., Muta K., Kawasoe H. (1992)

"Nature and origin of the 5-eV band in SiO₂:GeO₂ glasses."

Physical Review B, Vol. 46, pp. 11445-11451.

Hosono H., Mizuguchi M., Kawazoe H., Nishii J. (1996)

"Correlation between Ge E' Centers and Optical Absorption Bands in SiO₂:GeO₂ Glasses."

Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 35, pp. L234-L236.

- Johan A., Azaïs B., Malaval C., Raboisson G., Roche M. (1989)
"ASTERIX , un nouveau moyen pour la simulation des effets de débit de dose sur l'électronique"
Annales de Physique, Paris, Vol 14, pp. 379-393.
- Kannan S., Lu Valle M., Ahrens R., Lemaire P. (1999)
"Analysis of recovery in radiation induced loss in rare earth doped fibers through master curve / demarcation energy diagrams".
Optical and Fiber Communications Conference, San Diego, Californie. pp. 93-95.
- Laming R.I., Payne D.N. (1990)
"Noise characteristics of erbium doped fiber amplifier pumped at 980 nm."
IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 2, pp. 418-421.
- Lewis R.B.J., Sikora E.S.R., Wright J.V., West R.H., Dowling S. (1992)
"Investigation of effects of gamma radiation on erbium doped fibre amplifiers."
Electronics Letters, Vol. 28, pp. 1589-1591.
- Leyderman A., Zheng H. (1999)
"Influence of Al ion on photochemical conversion in germania-silica sol-gel glass."
Journal of Luminescence, Vol. 84, pp. 447-451.
- Lyons P., Looney L., Henschel H., Köhn O., Schmidt H.U., Klein K., Fabian H., Mills M., Nelson G. (1989)
"Influence of Preform and Draw Conditions on UV Transmission and Transient radiation sensitivity of an Optical fiber."
Proceedings of SPIE, Vol. 1174, pp. 2-19.
- Marcuse D. (1981)
"Principles of optical fiber measurements"
Academic Press, New York,
- Mears R.J., Reekie L., Poole S.B., Payne D.N. (1986)
"Low-threshold tunable CW and Q-switched fibre laser operating at 1.55 μm ."
Electronics Letters, Vol. 22, pp. 159-160.
- Médjahdi K. (2005)
"Relation entre les propriétés optiques et les modifications micro-structurales induites par différents traitements physico-chimiques dans les fibres optiques germanosilicates"
Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne
- Morita Y., Kawakami W. (1989)
"Dose rate effect on radiation induced attenuation of pure silica core optical fibers."
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 36, pp. 584-590.
- Munekuni S., Yamanaka H., Shimogaichi Y., Nagasawa K., Hama Y. (1990)
"Various types of nonbridging oxygen hole center in high purity silica glass."
Journal of Applied Physics, Vol. 68, pp. 1212-1217.
- Munekuni S., Dohguchi N., Nishikawa H., Ohki Y., Nagasawa K., Hama Y. (1991)
"Si-O-Si strained bonds and paramagnetic defect centers induced by mechanical fracturing in amorphous SiO_2 ."
Journal of Applied Physics, Vol. 70, pp. 5054-5062.
- Nagasawa K., Tanabe M., Yahagi K. (1984)
"Gamma-Ray-Induced Absorption Bands in Pure-Silica-Core Fibers."
Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 23, pp. 1608-1613.

- Nagasawa K., Todoriki T., Fujii T., Ohki Y., Hama Y. (1986)
"The 1.52 μm Absorption band in Optical Fibers Induced by Hydrogen Treatment."
Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 25, pp. L853-L855.
- Neustruev V.B. (1991)
"Point defects in pure and germanium doped silica glass and radiation resistance of optical fibres."
Soviet Lightwave Communications, Vol. 1, pp. 177-195.
- Nishikawa H., Nakamura R., Tohmon R., Ohki Y., Sakurai Y., Nagasawa K., Hama Y. (1990)
"Generation mechanism of photoinduced paramagnetic centers from preexisting precursors in high-purity silicas."
Physical Review B, Vol. 41, pp. 7828-7834.
- Nishikawa H., Watanabe E., Daisuke I., Sakurai Y., Nagasawa K., Ohki Y. (1996)
"Visible photoluminescence from Si clusters in γ -irradiated amorphous SiO_2 ."
Journal of Applied Physics, Vol. 80, pp. 3513-3517.
- Pacheco D.P., Di Bartolo B. (1978)
"Generalized excitation in pure ionic crystals" dans "Luminescence of inorganic solids"
Plenum Press, B. Di Bartolo Ed., New York.
- Pagnoux D., Peyrilloux A., Roy P., Fevrier S., Labonte L., Hillaire S. (2003)
"Microstructured air-silica fibres : recent developments in modelling, manufacturing and experiment."
Annales des télécommunications, Vol. 58., pp. 1238-1274.
- Poli F., Cucinotta A., Selleri S. (2007)
"Photonic Crystal Fibers : Properties and Applications"
Springer Series in Materials Science
- Poole S.B., Payne D.N., Fermann M.E. (1985)
"Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions."
Electronics Letters, Vol. 21, pp. 737-738.
- Régnier E., Flammer I., Girard S., Gooijer F., Achten F., Kuyt G. (2007)
"Low-dose Radiation-Induced Attenuation at InfraRed wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibres."
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, pp. 1115-1119.
- Rose T.S., Gunn D., Valley G.C. (2001)
"Gamma and proton radiation effects in Erbium-doped fiber amplifiers : Active and passive measurements."
Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, pp. 1918-1923.
- Russell P. (2007)
"Photonic Crystal Fibers: A Historical Account."
IEEE LEOS Newsletter, Vol. 21, pp. 11-15.
- Saccoccio M. (1995)
"Contribution à l'étude des potentialités des composants actifs à fibre dopée pour applications aéronautiques et spatiales"
Thèse de doctorat, Sup'Aéro, Toulouse
- Sakurai Y., Nagasawa K. (2000)
"Correlation between the green photoluminescence band and the peroxy radical in γ -irradiated silica glass."
Journal of Applied Physics, Vol. 88, pp. 168-171.

- Sasajima Y., Tanimura K. (2003)
"Optical transitions of self-trapped holes in amorphous SiO₂."
Physical Review B, Vol. 68, pp. 014204-1 - 014204-7.
- Shelby J.E. (1980)
"Reaction of hydrogen with hydroxyl free vitreous silica."
Journal of Applied Physics, Vol. 51, pp. 2589-2593.
- Sidirolou F., Huntington S.T., Roberts A., Baxter G.W. (2005)
"Micro-characterisation of erbium-doped fibers using a Raman confocal microscope."
Optics Express, Vol. 13, pp. 5506-5512.
- Silin A.R., Skuja L.N., Shendrik V. (1978)
"Intrinsic radiation defects in vitreous silica. Nonbridging oxygen."
Soviet Journal of Glass Physics and Chemistry, Vol. 4, pp. 352-356.
- Simpson J.R., Broer M.M., DiGiovanni D.J., Quoi K.W., Kosinski S.G. (1993)
"Ionising and optical radiation-induced degradation of erbium-doped-fiber amplifiers".
Proceedings of OFC / IOOC'93, San Jose, USA, pp 52-53
- Skuja L. (1992)
"Isoelectronic series of twofold coordinated Si, Ge, and Sn atoms in glassy SiO₂: A luminescence study."
Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 149, pp. 77-95.
- Skuja L., Naber A. (1996)
"Site-selective luminescence study of defects in gamma-irradiated glassy germanium dioxide."
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 116, pp. 549-553.
- Skuja L. (1998)
"Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide."
Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 239, pp. 16-48.
- Stoneham A.M. (1975)
"Theory of defects in solids"
Oxford University Press, Volumes 1 et 2
- Suzuki T., Skuja L., Kajihara K., Hirano M., Kamiya T., Hosono H. (2003)
"Electronic Structure of Oxygen Dangling Bond in Glassy SiO₂: The Role of Hyperconjugation."
Physical Review Letters, Vol. 90, pp. 186404-1.
- Tavernier (1981)
"Tenue aux radiations des fibres optiques".
Photon'80. pp. 88-109.
- Taylor E.W., McKinney S.J., Sanchez A.D., Paxton A.H., Craig D.M., Winter J.E., Ewart R. (1998)
"Gamma-ray induced effects in Erbim-doped fiber optic amplifiers".
SPIE Conference on Photonics for Space Environnements VI, San Diego, California. pp. 16-23.
- Tohmon R., Mizuno H., Ohki Y., Sasagane K., Nagasawa K., Hama Y. (1989)
"Correlation of 5.0 and 7.6-eV absorption bands in SiO₂ with oxygen vacancy."
Physical Review B, Vol. 39, pp. 1337-1345.
- Tortech B., Van Uffelen M., Gusarov A., Ouerdane Y., Boukenter A., Meunier J.-P., Berghmans F., Thienpont H. (2007)
"Gamma radiation induced loss in erbium doped optical fibers."
Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 353, pp. 477-480.

Tortech B., Gusarov A., Van Uffelen M., Bisutti J., Girard S., Ouerdane Y., Boukenter A., Meunier J.-P., Berghmans F., Thienpont H. (2007-bis)
"Pulsed X-ray and continuous gamma radiation effects on erbium doped optical fibers properties."
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, pp. 2598-2603.

Tortech B., Girard S., Régnier E., Ouerdane Y., Boukenter A., Meunier J.-P., Van Uffelen M., Gusarov A., Berghmans F., Thienpont H. (2007-ter)
"Radial distribution of proton-induced effects in erbium-doped optical fibers: micro-luminescence study".
Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) 2007, Deauville, France.

Tortech B., Ouerdane Y., Boukenter A., Meunier J.-P., Girard S., Van Uffelen M., Régnier E., Berghmans F., Thienpont H. (2007-quater)
"Transverse UV Laser Irradiation-induced Defects and Absorption in a Single-Mode Erbium-Doped Optical Fiber."
Optical Materials, in press, 2008.

Van Uffelen M. (2000)
"Modelling the radiation response of optical fibres".
Topical Day Photonics for Nuclear Environments, Mol, Belgium. pp. 9.

Van Uffelen M. (2001)
"Modélisation de systèmes d'acquisition et de transmission à fibres optiques destinés à fonctionner en environnement nucléaire"
Thèse de Doctorat, Université Paris Sud XI, Paris

Van Uffelen M., Girard S., Goutaland F., Gusarov A., Brichard B., Berghmans F. (2003)
"Gamma radiation effects in Er-doped silica fibres".
Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) 2003, Noordwijk, The Netherlands. pp. 83-88.

Williams G.M., Putnam M.A., Askins C.G., Gingerich M.E., Friebele E.J. (1992)
"Radiation effects in Erbium-doped optical fibres."
Electronics Letters, Vol. 28, pp. 1816-1818.

Williams G.M., Putnam M.A., Askins C.G., Gingerich M.E., Friebele E.J. (1992 Bis)
"Radiation-induced coloring of erbium-doped optical fibers."
SPIE, Optical Materials Reliability and Testing, Vol. 1791, pp. 274-283.

Williams G.M., Putnam M.A., Friebele E.J. (1996)
"Space radiation effects on erbium doped fibers."
SPIE, Vol. 2811, pp. 30-37.

Williams G.M., Friebele E.J. (1998)
"Space radiation effects on Erbium-doped fiber devices :Source, amplifiers, and passive measurements."
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 45, pp. 1531-1536.

Yahya A. (2005)
"Etude de la formation et transformation des défauts ponctuels dans la silice : Influence des traitements thermiques et des irradiations"
Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Effets des radiations sur des fibres optiques dopées erbium : influence de la composition

Résumé

Nous avons étudié la sensibilité des fibres dopées erbium (EDF) sous irradiation et les défauts induits par celle-ci. Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les EDF sous irradiations ainsi que des défauts générés dans la silice par les radiations. Le deuxième chapitre précise les types de radiations utilisés et les moyens expérimentaux mis en œuvre pour caractériser les réponses des fibres sous irradiation ainsi que les défauts à l'origine des pertes. Dans le troisième chapitre, nous présentons la réponse de plusieurs fibres dopées erbium irradiées aux rayons γ , protons et rayons X pulsés. Les fibres dopées erbium et aluminium présentent des pertes induites par radiation plus élevées que les fibres classiques de transmission des télécommunications (SMF28[®]) ou celles dopées erbium avec peu d'aluminium. La présence de l'aluminium dans la composition du cœur des fibres dopées erbium est en grande partie responsable des pertes induites. Quelque soit le type d'irradiation, les défauts créés par l'irradiation sont liés à la matrice hôte. Nos études montrent aussi que l'erbium n'est affecté qu'à travers son interaction avec les défauts créés. Le quatrième chapitre traite des EDF sous insolation UV et montre que les UV conduisent aux mêmes effets que les rayons γ . Le dernier chapitre présente, quant à lui, l'étude des amplificateurs optiques sous irradiation γ .

Mot clé : Fibres optiques dopées erbium, effet des radiations, atténuation induite par radiation, luminescence, absorption, centres colorés, défauts.

Radiation effects on erbium doped optical fibers - on the influence of the fiber composition

Abstract

We have studied the erbium-doped fibers (EDF) sensitivity under irradiation and the induced defects. The first chapter presents the state of the art for the EDF under irradiation as well as some radiation generated silica defects. The second chapter details the radiations used in this thesis and the experimental set-ups implemented for the characterization of the fiber responses under irradiation and the radiation induced defects. In the third chapter, we present the response of several erbium-doped fibers irradiated with γ -rays, protons and pulsed X-rays. The erbium doped fibers have higher radiation induced sensitivity than the Telecom fibers (SMF28[®]) or than erbium-doped fibers containing little aluminum. The aluminum presence in the EDF core composition is mainly responsible for the fiber performance degradation. Whatever the irradiation types, the radiation generated defects are related to the host matrix. Our studies also display that the erbium ions are only affected by the interaction with the created defects. The fourth chapter deals with the EDF under UV exposure and shows that the UV rays lead to the same effects than the gamma rays. The last chapter of this thesis presents the study of optical fiber amplifiers under γ irradiation.

Keywords: Erbium doped fibers, radiation effects, radiation induced attenuation, luminescence, absorption, color centers, defects.