

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>	<i>54</i>
II.2.1.B. <i>Excitation à 980 nm et 1480 nm.....</i>	<i>55</i>
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>	<i>57</i>
II.2.3.B. <i>Montage utilisant une source superluminescente</i>	<i>57</i>
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>	<i>60</i>
II.3.1.B. <i>Mesure de luminescence dans l'infrarouge.....</i>	<i>61</i>
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.

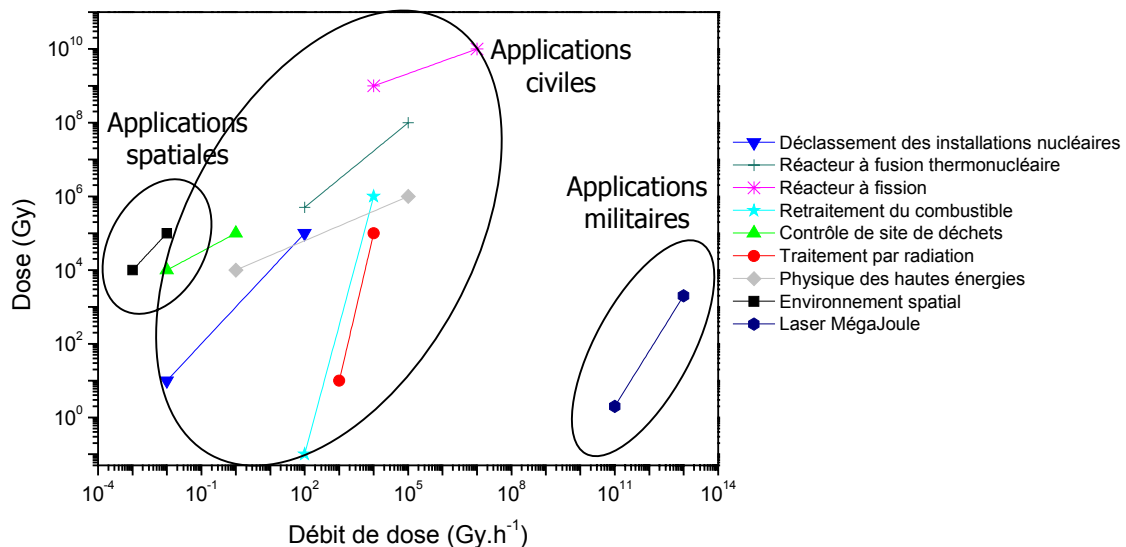


Figure II-1 : Différents environnements radiatifs en fonction de leur dose et de leur débit de dose (figure inspirée de [Van Uffelen 2000])

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.

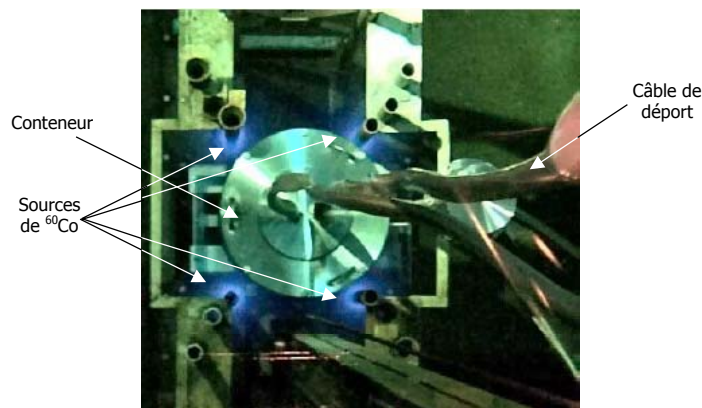


Figure II-2 : Installation de la source RITA [Fernandez Fernandez 2002]

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.

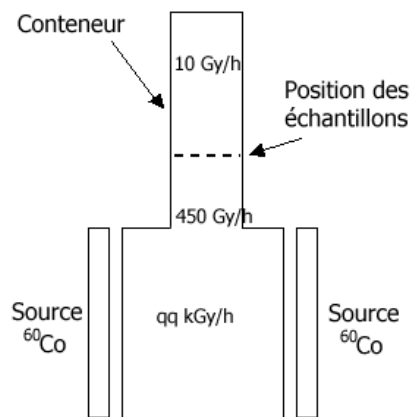


Figure II-3 : Représentation schématique du conteneur de RITA et de sa position vis-à-vis des sources de ⁶⁰Co

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).

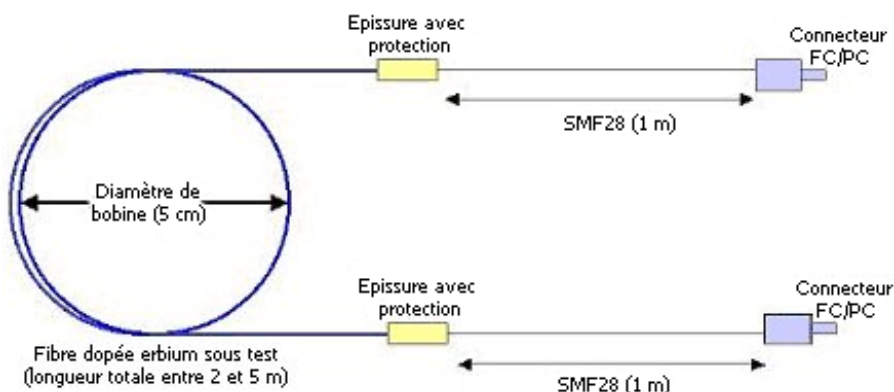


Figure II-4 : Mise en place d'un échantillon de fibre dopée erbium sous test

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.

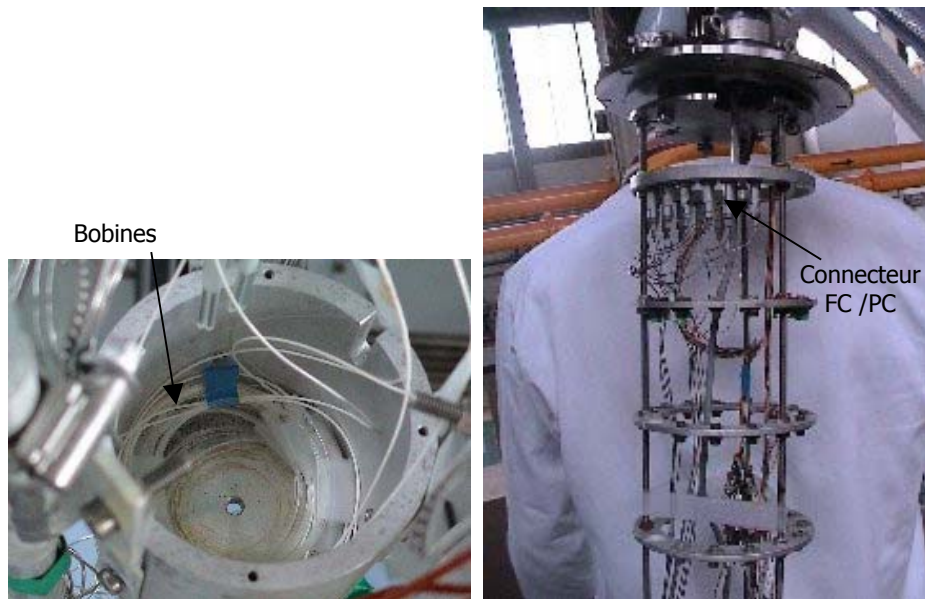


Figure II-5 : Photos de l'installation des bobines sous test dans le support allant dans la partie supérieure du conteneur, à gauche les bobines positionnées à une hauteur choisie pour recevoir une dose totale déterminée préalablement, à droite le support allant dans le conteneur avec les connexions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

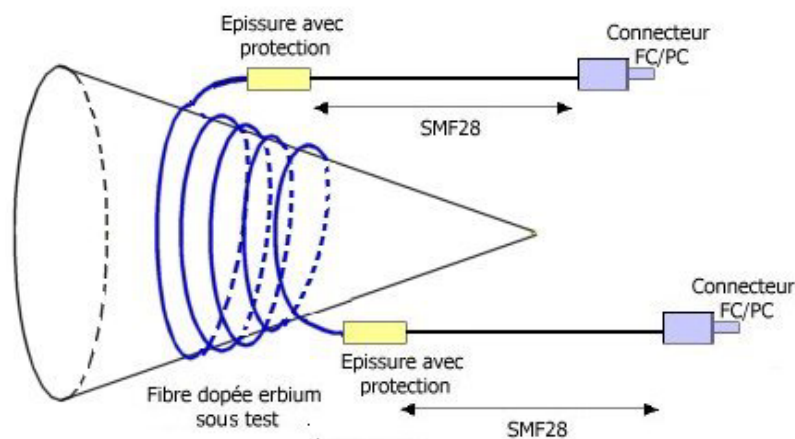


Figure II-6 : Représentation de la disposition d'un échantillon d'une fibre dopée erbium sous test pour une irradiation proton

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].

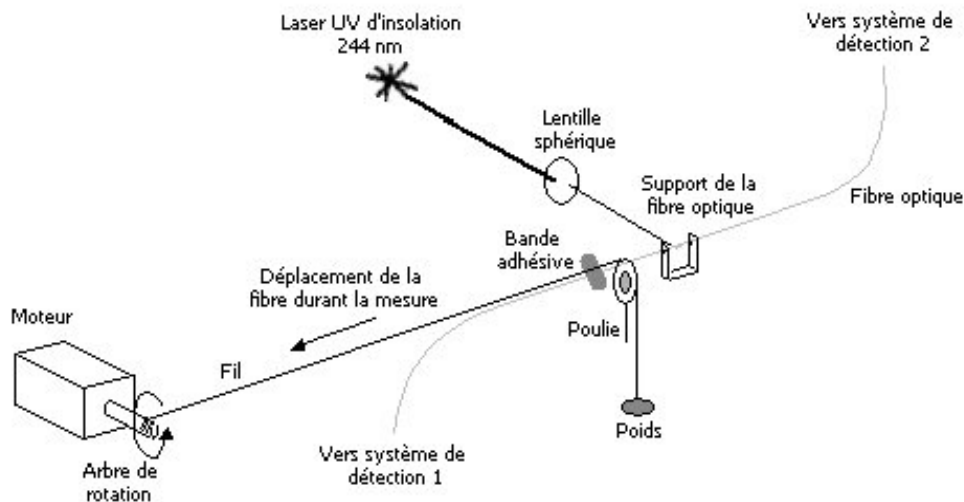


Figure II-7 : Schéma synoptique de l'irradiation d'une fibre avec un laser UV continu

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.

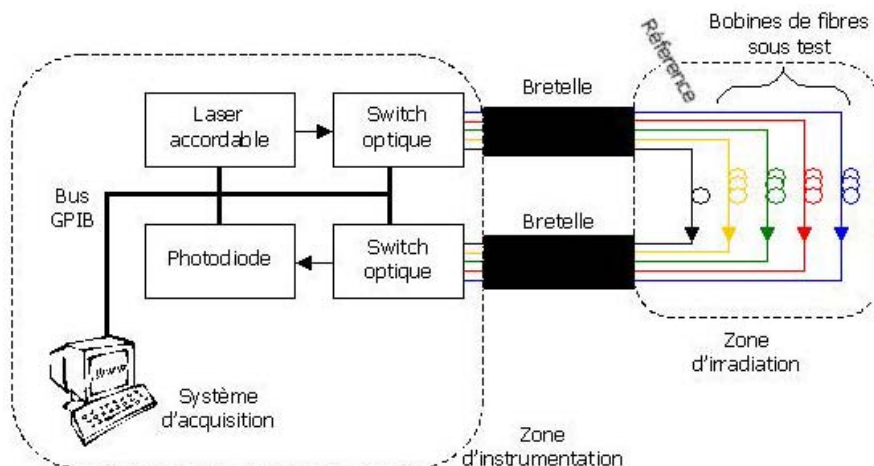


Figure II-8 : Schéma synoptique du banc de mesure de la transmission des fibres optiques dans le proche IR sous irradiation gamma

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.

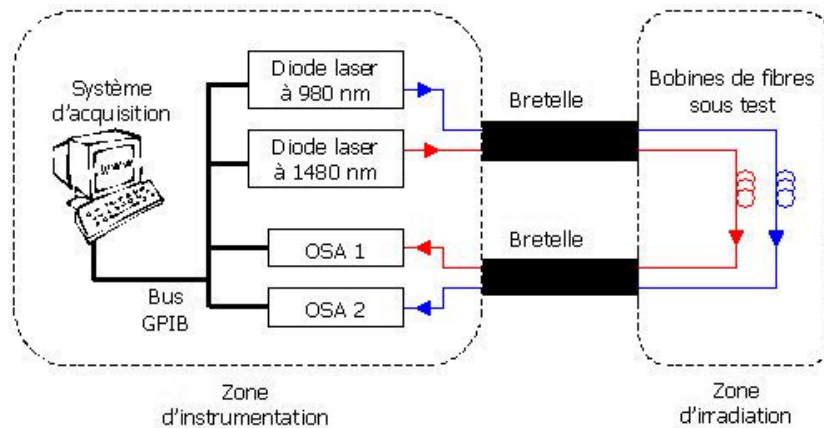


Figure II-9 : Schéma synoptique du banc de mesure de la luminescence des fibres optiques dans le proche IR avec une excitation à 980 nm ou 1480 nm sous irradiation gamma. (OSA : Optical Spectrum Analyzer)

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.

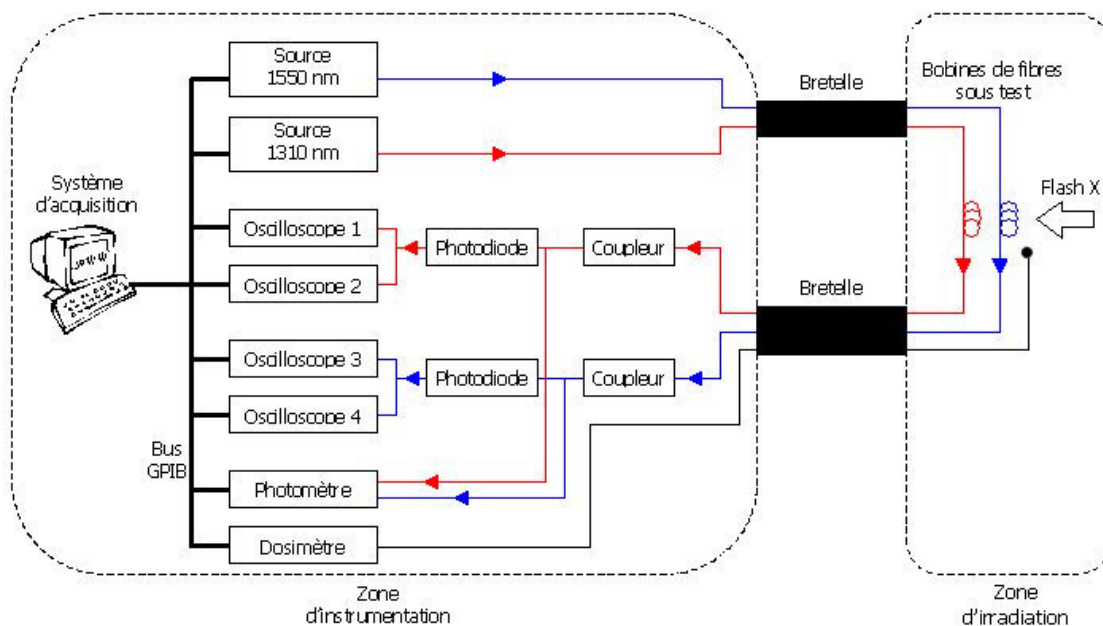


Figure II-10 : Schéma synoptique du banc de mesure pour les irradiations X pulsées.

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.

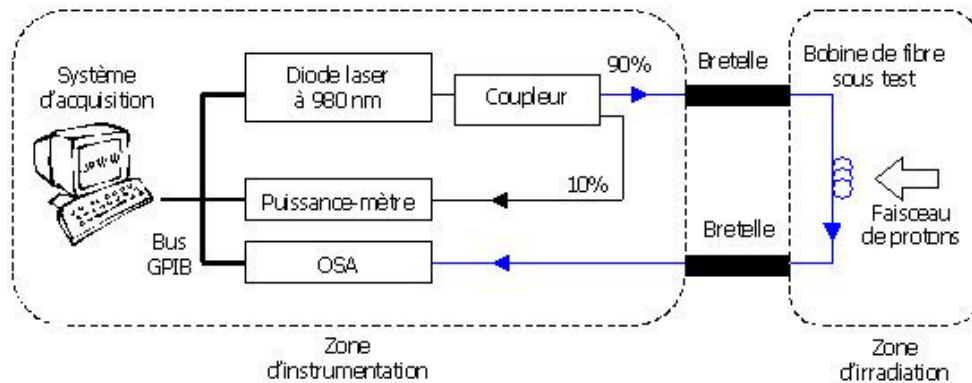


Figure II-11 : Schéma synoptique du banc de mesure de la luminescence des fibres avec une excitation à 980 nm sous irradiation continue aux protons

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).

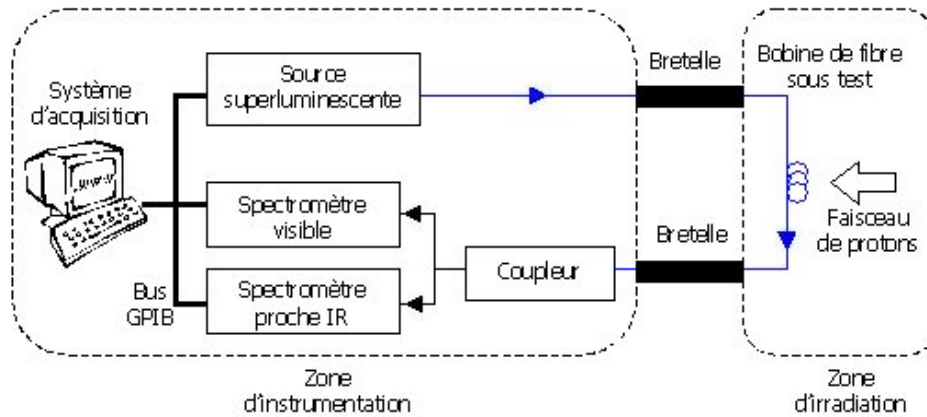


Figure II-12 : Schéma synoptique du banc de mesure de la transmission des fibres entre 600 nm et 1700 nm sous irradiation continue aux protons

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.

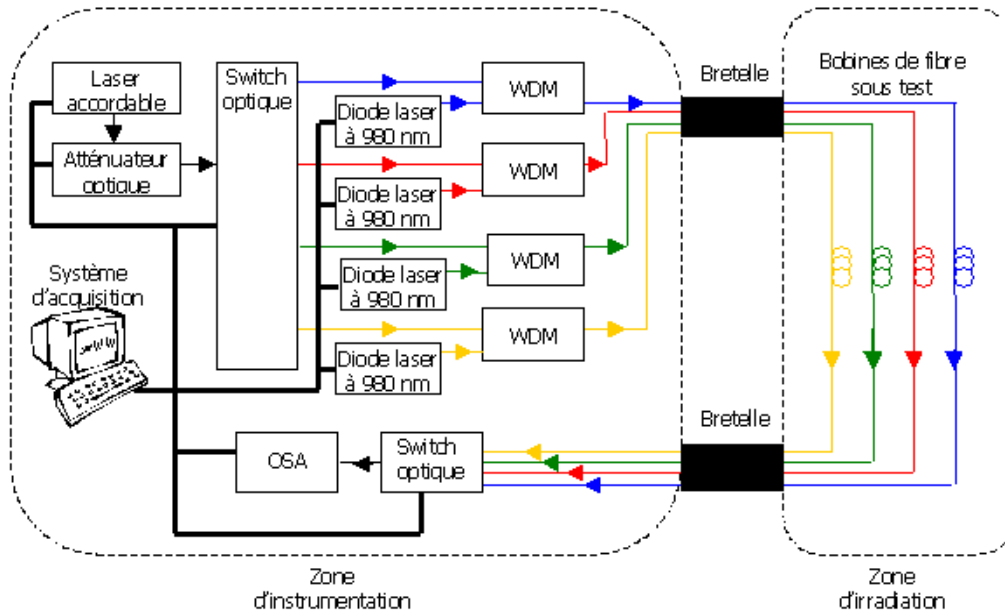


Figure II-13 : Schéma synoptique du banc de mesure du gain et du facteur de bruit d'amplificateurs optiques sous irradiation gamma continue

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.

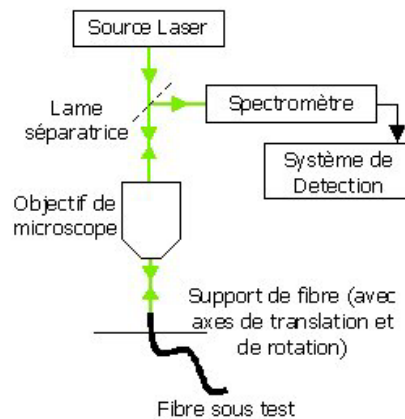


Figure II-14 : Schéma synoptique du microscope confocal

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.

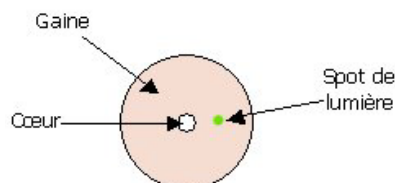


Figure II-15 : Schéma de la section transverse d'une fibre optique lors d'une mesure avec l'installation de microspectroscopie

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).

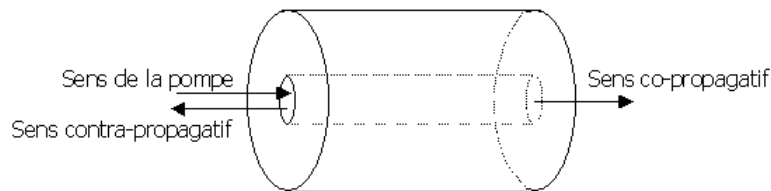


Figure II-16 : Sens de propagation de la luminescence dans le cœur d'une fibre optique dopée erbium

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.

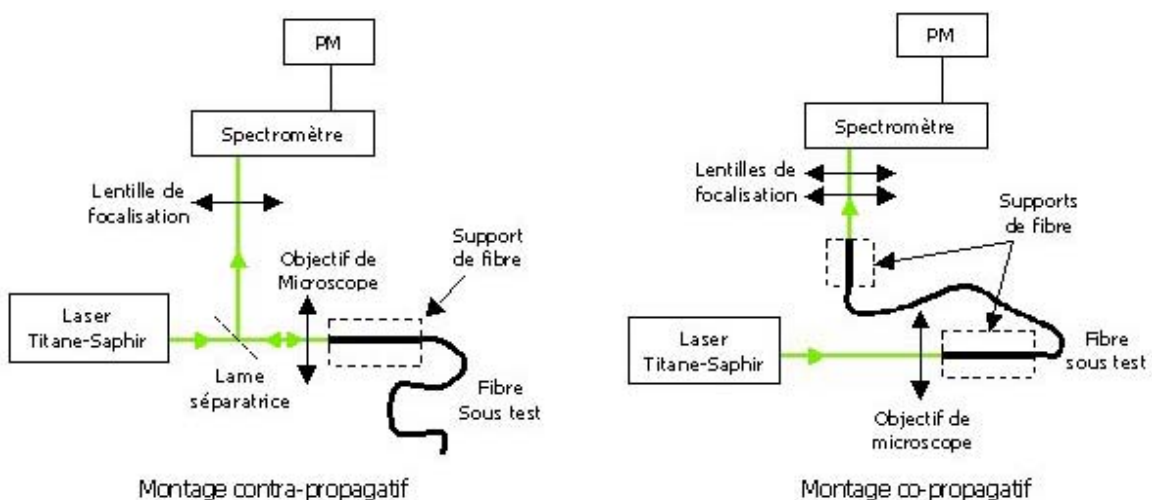


Figure II-17 : Schéma synoptique du banc de mesure de la luminescence IR avec à gauche le montage contra-propagatif et à droite le montage co-propagatif

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).

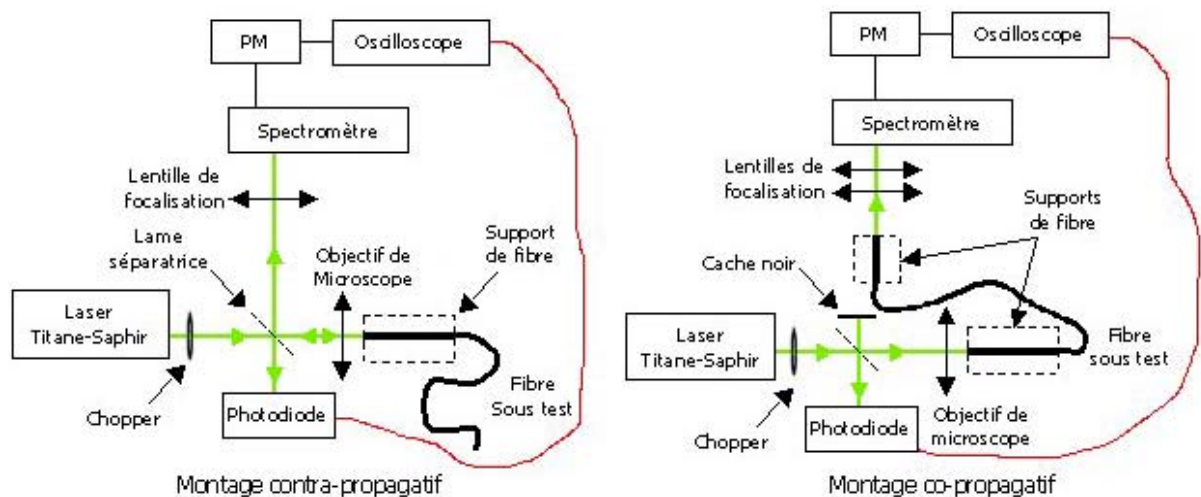


Figure II-18 : Schéma synoptique du banc de mesure de durée de vie dans l'IR avec à gauche le montage contra-propagatif et à droite le montage co-propagatif

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.

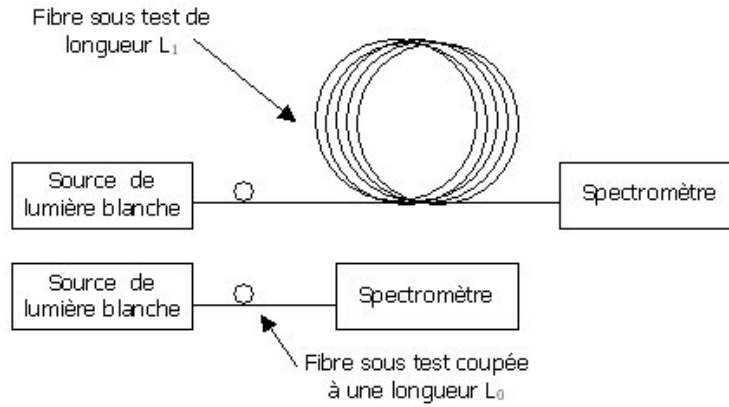


Figure II-19 : Schéma de principe de la méthode dite du « cut back »

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.