

## Comparaison des effets des irradiations $\gamma$ , X et UV dans les fibres optiques

S. Girard<sup>1</sup>, Y. Ouerdane<sup>2</sup>, J. Baggio<sup>1</sup>, A. Boukenter<sup>2</sup>, J.-P. Meunier<sup>2</sup>  
et J.-L. Leray<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA-DAM Île-de-France, BP. 12, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

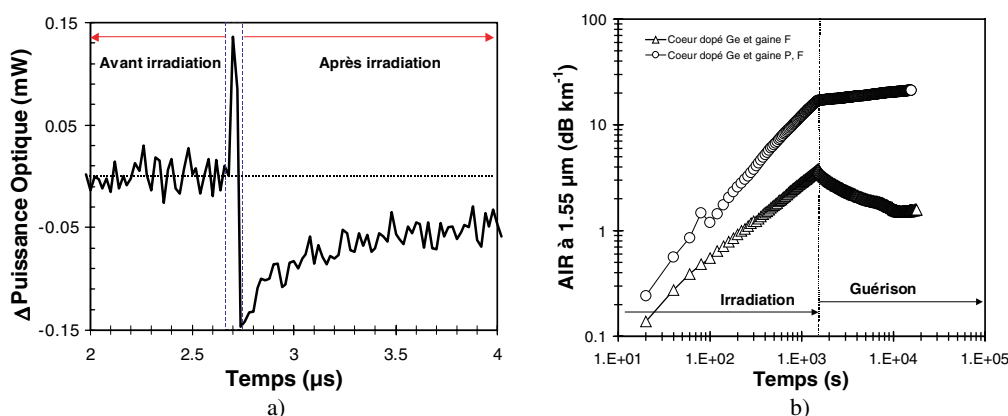
<sup>2</sup> Université de Saint-Étienne, Laboratoire de Traitement du Signal et Instrumentation,  
UMR CNRS 5516, 10 rue Barrouin, 42000 Saint-Étienne, France

**Résumé.** Les fibres optiques présentent de nombreux avantages incitant à les intégrer dans des applications devant résister aux environnements radiatifs associés aux domaines civil, spatial ou militaire. Cependant, leur exposition à un rayonnement entraîne la création de défauts ponctuels dans la silice amorphe pure ou dopée qui constitue les différentes parties de la fibre optique. Ces défauts causent, en particulier, une augmentation transitoire de l'atténuation linéique des fibres optiques responsable de la dégradation voire de la perte du signal propagé dans celles-ci. Dans cet article, nous comparons les effets de deux types d'irradiation: une impulsion X et une dose  $\gamma$  cumulée. Les effets de ces irradiations sont ensuite comparés avec ceux induits par une insolation ultraviolette (244 nm) sur les propriétés d'absorption des fibres optiques. Nous montrons qu'il existe des similitudes entre ces différentes excitations et qu'il est possible, sous certaines conditions, d'utiliser celles-ci afin d'évaluer la capacité de certaines fibres optiques à fonctionner dans un environnement nucléaire donné.

### 1. INTRODUCTION

L'étude de la vulnérabilité des fibres optiques en environnement nucléaire a fait l'objet de très nombreuses publications à partir des années 1970. Les militaires ont été les premiers à s'intéresser à leurs comportements sous irradiation transitoire (dose  $< 1$  kGy(SiO<sub>2</sub>), débit de dose supérieur à 1 MGy/s), notamment pour assurer le transfert de données après une impulsion ionisante [1]. Ils ont très vite été suivis par les équipes de recherche chargées de la conception de systèmes optiques durcis pour le spatial [2], pour lesquels des doses plus importantes sont déposées durant plusieurs années à des débits de dose beaucoup plus faibles. Avec l'avènement des grands instruments pour la physique des hautes énergies (LHC, ITER, LMJ), leurs tenues à de très fortes doses et à des débits de dose relativement élevés sont actuellement étudiées [3-5]. La diversité de ces environnements explique que les spécifications radiatives associées aux fibres optiques peuvent être très différentes. Ainsi, une fibre optique adéquate pour une application sous un environnement spécifique peut ne pas l'être pour un autre type d'irradiation. En particulier, la réponse transitoire ( $t < 100$  ms) des fibres optiques après une impulsion ionisante est beaucoup moins documentée que celle à la dose cumulée [6-8]. Dans cet article, nous comparons la tenue de fibres commerciales ou issues de laboratoires R&D à deux environnements possédant des débits de dose très différents ( $10^{-1}$  Gy/s et  $> 10^6$  Gy/s) mais des doses et des énergies comparables ( $< 1$  kGy ;  $\sim 1$  MeV). Nous nous intéressons également à la comparaison de leurs effets à ceux générés par une insolation ultraviolette à 244 nm telle que celle couramment utilisée pour la fabrication des réseaux de Bragg dans les fibres optiques [9].

La principale conséquence d'une irradiation est la création de défauts ponctuels dans la matrice vitreuse (silice amorphe pure ou dopée) de la fibre optique. Ces défauts vont, en piégeant les charges libérées dans la matrice par ionisation, devenir des centres absorbants de la lumière propagée ou des centres émetteurs de lumière parasite [10] (cf. figure 1. a). De nombreuses études ont montré que des facteurs tant intrinsèques qu'extrinsèques aux fibres optiques vont conditionner le type et le nombre de



**Figure 1.** (a) Influence d'une irradiation X pulsée sur la transmission d'un signal à 720 nm dans une fibre optique multimode. Durant l'irradiation, on note la compétition entre l'émission Cerenkov et l'atténuation induite (b) Evolution de l'atténuation induite (AIR) durant et consécutivement à une irradiation  $\gamma$  continue (150 Gy, 0.1 Gy/s) dans deux fibres monomodes à cœur de silice dopée au Ge et avec ou sans codopage P en gaine optique.

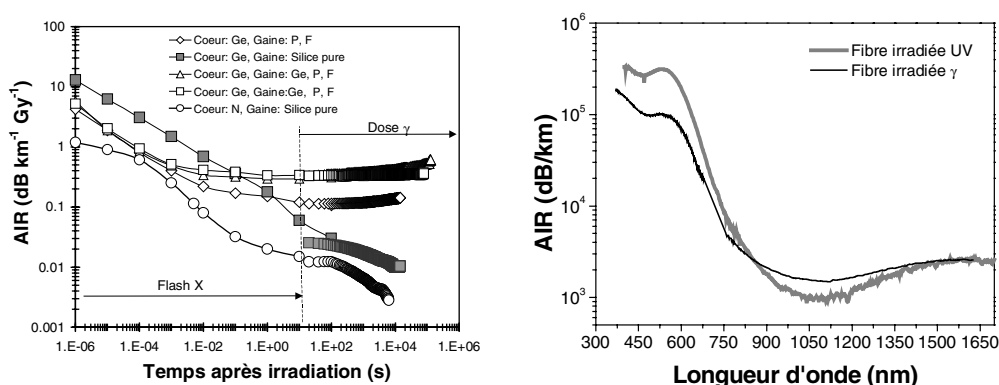
défauts générés dans leurs différentes parties (cœur, gaine optique). Parmi les facteurs intrinsèques, le paramètre prépondérant est la composition de la fibre optique [11]. Ceci est illustré sur la figure 1. b par la comparaison entre les réponses à un flash X de deux fibres quasi-identiques (ne différant que par un léger codopage au phosphore en gaine optique). D'autres facteurs tels que leurs paramètres de fabrication [12] vont également influencer sur la valeur de l'atténuation induite par irradiation. Des paramètres extrinsèques tels que le niveau de puissance lumineuse véhiculée dans les fibres optiques [13] ou la température [14] vont aussi conditionner leurs réponses sous irradiation.

## 2. DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX / FIBRES OPTIQUES TESTÉES

Nous avons évalué, sous irradiation, le comportement de fibres optiques monomodes et multimodes, issues principalement du marché des télécommunications. Ces fibres optiques possèdent pour la plupart un cœur dopé au dioxyde de germanium ( $\text{GeO}_2$ , entre 3 et 15%) et des gaines optiques codopées par combinaison des dopants suivants : Fluor (F  $\sim$  0.2%), Phosphore (P  $\sim$  0.2%), Germanium (Ge  $\sim$  0.2%). Nous avons également testé deux fibres optiques plus exotiques. La première possède un cœur en silice pure et une gaine dopée au fluor ( $\sim$  1.2%). Elle est considérée comme « durcie » pour des environnements radiatifs de type spatial ou civil. La seconde, élaborée par le Fiber Optic Research Center [15], possède un cœur de silice dopée à l'azote (N  $\sim$  0.6%) et une gaine de silice pure. La vulnérabilité de ces fibres sous irradiations X et  $\gamma$  a été évaluée à 1.55 et 1.31  $\mu$ m. Les descriptions des bancs et des conditions de mesures sont données dans [16]. Les influences exactes des dopants en cœur et des codopants en gaine optique sur la réponse des fibres optiques sous irradiation continue et pulsée sont décrites dans [17,18]. Les mesures sous insolation UV continue (laser Argon émettant à 244 nm, fluences comprises entre 1-130 J/cm<sup>2</sup>) ont été effectuées à l'aide d'un banc de photo-inscription de réseaux de Bragg modifié [19].

## 3. COMPARAISON DES EFFETS DES RADIATIONS X et $\gamma$

Lors de l'irradiation d'une fibre optique, les défauts générés dans sa matrice vitreuse possèdent des durées de vie variables. C'est leur disparition qui conditionne la vitesse à laquelle les fibres recouvrent une partie de leurs capacités de transmission post-irradiation. La figure 2.a compare les cinétiques de guérison des pertes induites à 1.55  $\mu$ m après un flash X ( $\sim$ dizaines de ns) et après une irradiation  $\gamma$  ( $\sim$ 25 min) pour divers types de fibres optiques.



**Figure 2.** (a) Comparaison des cinétiques de guérison des pertes induites à 1.55  $\mu\text{m}$  après une impulsion X et une irradiation  $\gamma$  dans différentes fibres optiques (b) Comparaison des dépendances spectrales de l'atténuation induite par radiation (AIR) par une irradiation  $\gamma$  (1.2 kGy, 0.3 Gy/s) et une insolation UV (244 nm, 127 J/cm<sup>2</sup>) dans une fibre multimode codopée Ge et P.

Ces résultats, obtenus sur des fibres très différentes, montrent que les pertes induites à 1.55  $\mu\text{m}$  sont, pour une même dose déposée, indépendantes du débit de dose (facteur  $> 10^7$  entre les deux environnements). Ce résultat montre que les mêmes mécanismes physico-chimiques sont mis en jeu pour chaque environnement. Il implique que les mécanismes proposés pour comprendre la réponse transitoire ( $t < 100$  ms) d'une fibre expliquent également son comportement à la dose cumulée. Ainsi, nos résultats montrent que les propriétés atypiques des fibres optiques contenant du phosphore (ralentissement de la guérison aux temps longs après une impulsion X, absence de guérison après une irradiation  $\gamma$ ) sont imputables aux mêmes défauts [20].

Un autre point important, déduit de ces mesures, est qu'il est possible d'estimer le comportement des fibres présentées sur la figure 1.b à la dose cumulée à partir des essais sous irradiation transitoire. Il est en revanche impossible de prédire leurs comportements sous irradiation pulsée en fonction de ceux mesurés à la dose cumulée. Le problème est plus complexe pour les fibres optiques à cœur de silice pure, pour lesquelles il semble que le débit de dose ait une influence sur leur tenue [16]. Actuellement, une synergie a été mise en place entre les programmes ITER et LMJ afin d'essayer de mieux appréhender les dynamiques des différents phénomènes régissant le comportement de ces fibres optiques dans les environnements radiatifs représentatifs de ces deux projets [21].

#### 4. COMPARAISON DES EFFETS DES RADIATIONS $\gamma$ et UV

##### 4.1 Validité de la comparaison $\gamma$ / UV

Les essais sous irradiation X ou  $\gamma$  nécessitent des moyens lourds en termes d'équipement et de coûts. Nous avons donc étudié s'il était possible de les remplacer, en partie, par des mesures sous insolation UV plus faciles à mettre en place. En effet, pour toutes les applications nécessitant une bonne résistance des fibres optiques à la dose cumulée (spatial, civil ou long terme après une impulsion X), il est bien établi que celles contenant du phosphore sont inadaptées dans l'infrarouge (figure 1.b), hormis pour des applications de dosimétrie [22]. Nous avons donc évalué la pertinence de mesures UV pour mettre en évidence la présence de phosphore dans des fibres commerciales, évitant ainsi de les évaluer lors des campagnes d'essais sous irradiation X et  $\gamma$ .

Pour cela, nous avons comparé, grâce à diverses techniques spectroscopiques, les effets d'une irradiation  $\gamma$  (1.2 kGy, 0.33 Gy/s) et ceux d'une insolation UV (127 J/cm<sup>2</sup>) dans une fibre multimode à cœur codopé Ge-P et gaine de silice pure. La figure 2.b illustre les dépendances spectrales des pertes

optiques induites par irradiations  $\gamma$  et UV. Ces résultats montrent que les pertes dans l'infrarouge sont dues à une bande d'absorption centrée autour de 1600 nm, attribuée au défaut  $P_1$  relatif au phosphore [23]. Dans le visible et le proche infrarouge, les pertes sont dues à la convolution entre une queue d'absorption s'étendant depuis l'UV et une bande d'absorption centrée autour de 540 nm, elle aussi attribuée à un défaut phosphore: centre POHC [23]. Nos résultats montrent que les deux types d'irradiation génèrent les mêmes défauts, dans des proportions comparables. En particulier, la bande d'absorption centrée autour de 1600 nm est bien mise en évidence dans chaque échantillon. Comme ces centres expliquent les particularités des fibres contenant du P sous irradiation; les essais UV permettent facilement d'identifier ces fibres optiques via la signature de ces défauts absorbants. De la même façon, des mesures par résonance paramagnétique électronique [16] ou spectroscopie de luminescence [24] ont confirmé que les mêmes centres paramagnétiques et/ou luminescents sont induits par les deux types d'irradiation.

#### 4.2 La comparaison $\gamma$ -UV comme assurance durcissement ?

Les similitudes entre les irradiations (X et  $\gamma$ ) et les insulations UV peuvent être utilisées afin d'identifier parmi des fibres optiques commerciales celles contenant du phosphore dans leur cœur ou gaine optique. Ainsi, de tels tests ont été réalisés afin d'évaluer la pertinence de fibres optiques multimodes issues du marché des télécommunications pour les applications de commande-contrôle au niveau de la chambre de tir du Laser Mégajoule [5]. Pour cette application, les fibres optiques doivent en particulier résister aux tirs successifs, sans présenter de pertes induites permanentes trop importantes après chaque tir, qui obligeraient à les remplacer. Nos essais ont montré que des essais d'insolation UV sur 1 m de fibre optique permettent sans peine d'identifier celles contenant 1% ou plus de phosphore en cœur ou gaine optique. Pour les fibres optiques contenant de plus faibles quantités de phosphore ( $\sim 100$  ppm), il est possible de mettre en évidence les défauts du phosphore à partir de mesure sur des longueurs plus importantes ou de compléter l'analyse par des mesures par spectroscopie Raman [5]. Cet outil UV peut également être utilisé comme une assurance durcissement dans le cas d'un approvisionnement différé de plusieurs lots d'une même fibre optique. Il permet de s'assurer qu'entre deux approvisionnements le fabricant de fibre optique n'a pas modifié son procédé d'élaboration en incorporant du phosphore.

### 5. CONCLUSION

La compréhension des mécanismes induits par irradiation dans les verres est une étape indispensable en vue d'assurer l'intégration des fibres optiques dans les différents domaines du nucléaire. Nous avons montré que les mêmes mécanismes physiques sont à l'origine des défauts induits par une impulsion X et à la dose cumulée pour la majorité des fibres optiques actuelles. De plus, il est possible, grâce à des essais sous insolation ultraviolette à 244 nm d'évaluer la pertinence de fibres optiques multimodes pour des applications devant résister à la dose cumulée ou au long terme après une impulsion X.

#### Remerciements

Ces travaux ont été financés en partie par la Délégation Générale pour l'Armement (DGA). Les irradiations ont été effectuées au Centre d'Etude de Gramat (DGA/DCE/ETC4), les compositions des fibres optiques déterminées au Centre Technique d'Arcueil (DGA/DCE/CTA). Les auteurs remercient M. Jacques KEURINCK (SAGEM SA) pour son aide dans le cadre de ces études.

#### Bibliographie

- [1] Friebele E. J., Sigel G. H., and Gingerich M. E., *Laser Focus* September (1978) 50-56.
- [2] Friebele E. J., Gingerich M. E., and Griscom D. L., *SPIE* **1791** (1992) 177-188.

- [3] Van Uffelen M., "Modélisation de systèmes d'acquisition et de transmission à fibres optiques destinés à fonctionner en environnement nucléaire", Thèse de Doctorat, Université Paris XI (2001).
- [4] Shikama T., Kakuta T., Shamoto N., Narui M., and Sagawa T., *Fus. Eng. Des.* **51-52** (2000) 179-183.
- [5] Girard S., Baggio J., Leray J-L., Meunier J-P., Boukenter A. and Ouerdane Y., Radiation and Its Effects on Components and Systems RADECS'04, Madrid, Spain, 22-24 September (2004).
- [6] Friebele E. J., Lyons P. B., Blackburn J., Henschel H., Taylor E. W., Beauregard G. T., West R. H., Zagarino P., and Smith D., *J. Lightwave Technol.* **8** (1990) 977-989.
- [7] Friebele E. J., Taylor E. W., Beauregard G. T., Wall J. A., and Barnes C., *J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 165-171.
- [8] Taylor E. W., Friebele E. J., Henschel H., West R. H., Krinski J. A., and Barnes C., *J. Lightwave Technol.*, **8** (1990) 967-976.
- [9] Boukenter A., Goutaland F., Kuswanto H., Marin E., Meunier J-P. and Ouerdane Y., *J. Phys. IV France* **108** (2003) 23-27.
- [10] Devine R. A. B., *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** (1992) 4411-4421.
- [11] Friebele E. J., Naval Research Laboratory, Washington, Report D.C NRL/MR/6505-92-6939 (1992).
- [12] Girard S., Keurinck J., Meunier J-P, Ouerdane Y., Boukenter A., Derop J-L., Azaïs B., Charre P., and Vié M., Radiation and Its Effects on Components and Systems RADECS'03, Noordwijk, Holland, 15-19 September (2003) AP6.
- [13] Henschel H., Köhn O. and Schmidt H. U., *IEEE Trans. Nucl. Science*, **43** (1996) 1050-1056
- [14] Borgermans P., "Spectral and Kinetic Analysis of Radiation Induced Optical Attenuation in Silica: Towards Intrinsic Fibre Optic Dosimetry" Thèse de Doctorat, Vrije Universiteit (2001).
- [15] Dianov E. M., Golant K. M., Khrapko R. R., and Tomashuk A. L., *Electron. Lett.* **31** (1995) 1490-1491.
- [16] Girard S., "Analyse de la réponse des fibres optiques soumises a divers environnements radiatifs", Thèse de Doctorat, Université de Saint-Etienne (2003).
- [17] Girard S., Keurinck J., Boukenter A., Meunier J-P, Ouerdane Y., Azaïs B., Charre P. and Vié M., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* **215** (2004) 187-195.
- [18] Girard S., Keurinck J., Ouerdane Y., Meunier J-P and Boukenter A., *J. Lightwave Technol.*, **22** (2004) 1915-1922.
- [19] Médjahdi K., Goutaland F., Boukenter A., Ouerdane Y., 5<sup>th</sup> Symposium "SiO<sub>2</sub>, Advanced Dielectrics & Related Devices", Chamonix, France, 21-23 June (2004) E2.
- [20] Girard S., Boukenter A., Ouerdane Y., Meunier J-P. and Keurinck J., *J. Non-Cryst. Solids* **322** (2003) 78-83.
- [21] Girard S., Brichard B., Baggio J., Bourgade J-L., Décreton M. and Berghmans F., 23<sup>rd</sup> Symposium on Fusion Technology SOFT'04, Venice, Italy, 20-24 September (2004).
- [22] Van Uffelen M., Borgermans P., Brichard B., and Berghmans F., Radiation and Its Effects on Components and Systems RADECS'02, Padova, Italy (2002).
- [23] Griscom D. L., Friebele E. J., and Long K. J., *J. Appl. Phys.* **54** (1983) 3743-3762.
- [24] Girard S., Vincent B., Meunier J-P, Ouerdane Y., Boukenter A., and Boudrioua A., *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 4215-4217.