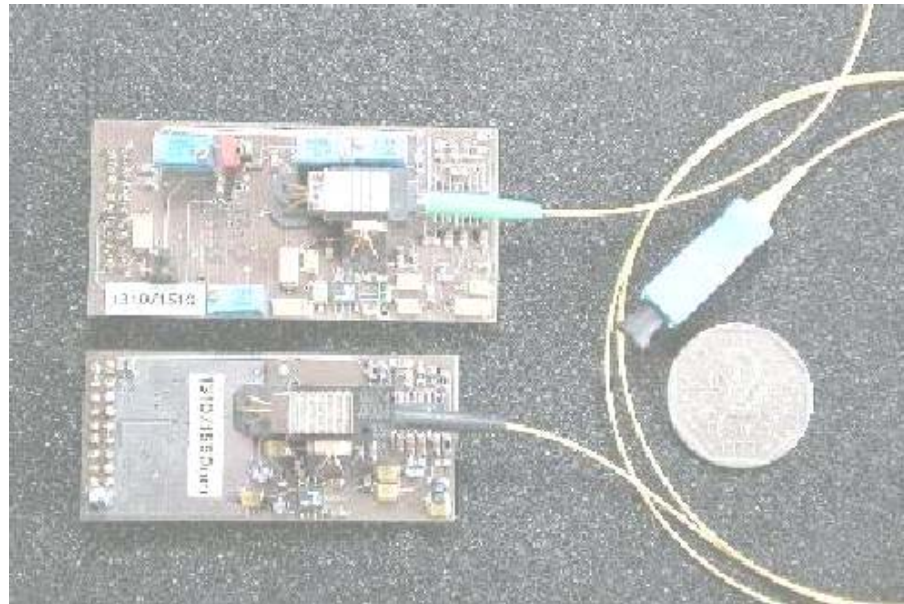


Vulnérabilité des liaisons optiques aux radiations



Jacques Baggio
CEA/DIF
jacques.baggio@cea.fr

Les liaisons optiques en environnement radiatif

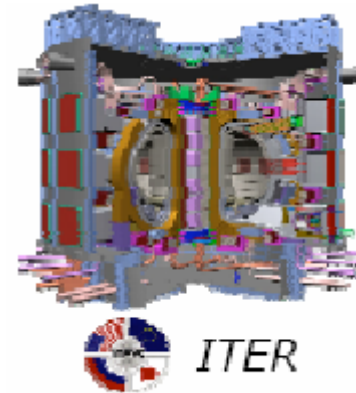


Spectroscopie
Liaisons de commande contrôle
Thermographie
Mesures déportées

Nucléaire



Fusion



Accélérateurs



Surveillance des déchets radioactifs
Mesures cœur de réacteur

Gyroscopes à fibre optiques
Liaisons hauts débits
Capteurs à fibres

Spatial



Radiothérapie



Dosimétrie in-vivo

Liaisons haut débits

B. Brichard « radiation effects in silica optical fibers », Radecs 2005 Short Course notebook, sept. 19-23, 2005, Cap d'Agde, France

Pourquoi une liaison optique ?



- Avantages des fibres optiques en environnements sévères :

- Immunité électromagnétique
- Grande bande passante
- Faible atténuation du signal
- Faibles poids et volume
- Possibilité de multiplexage
- Pas d'activation



MAIS ... elles ne sont pas immunes aux rayonnements (X , γ , n , ...)

Environnements radiatifs



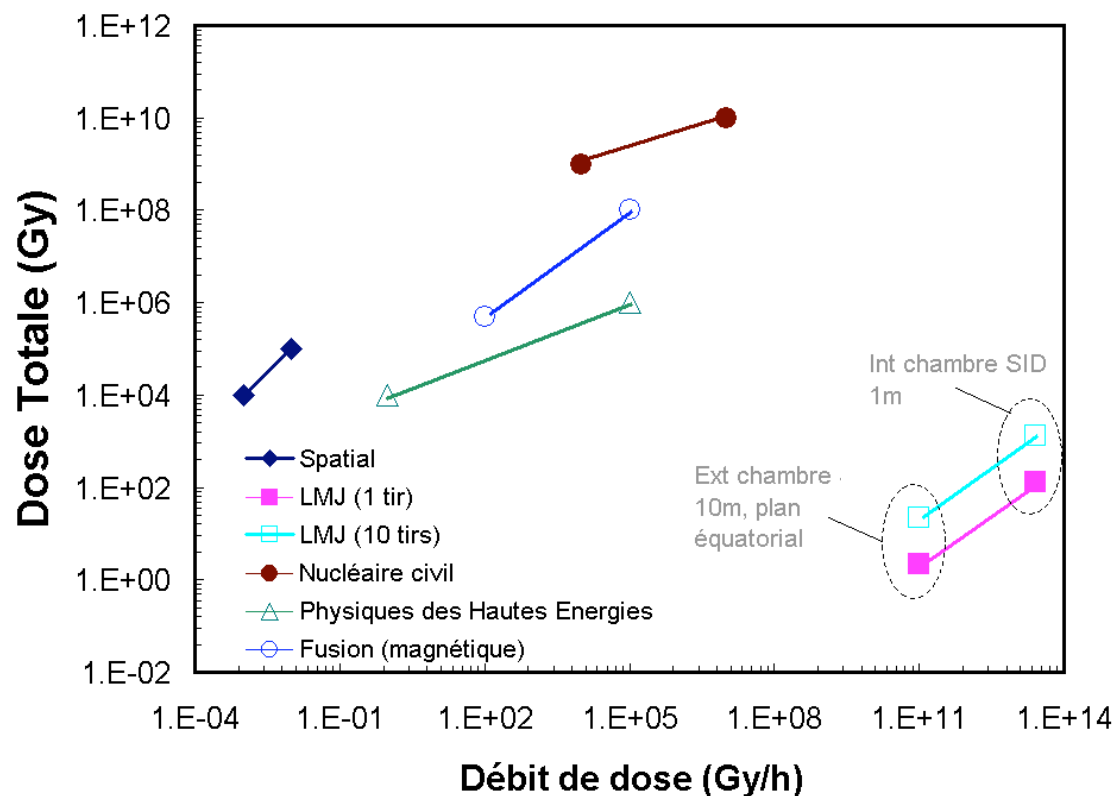
- Large spectre de doses et débits de doses
 - Spatial (Nasa, ESA)
 - Physique des hautes énergies (CERN, ...)
 - Nucléaire civil (CEN-SCK, CEA-cogéma...)
 - ITER (CEN-SCK, FORC, CEA)
 - LMJ (CEA)



Les effets sont intimement liés au couple dose - débit



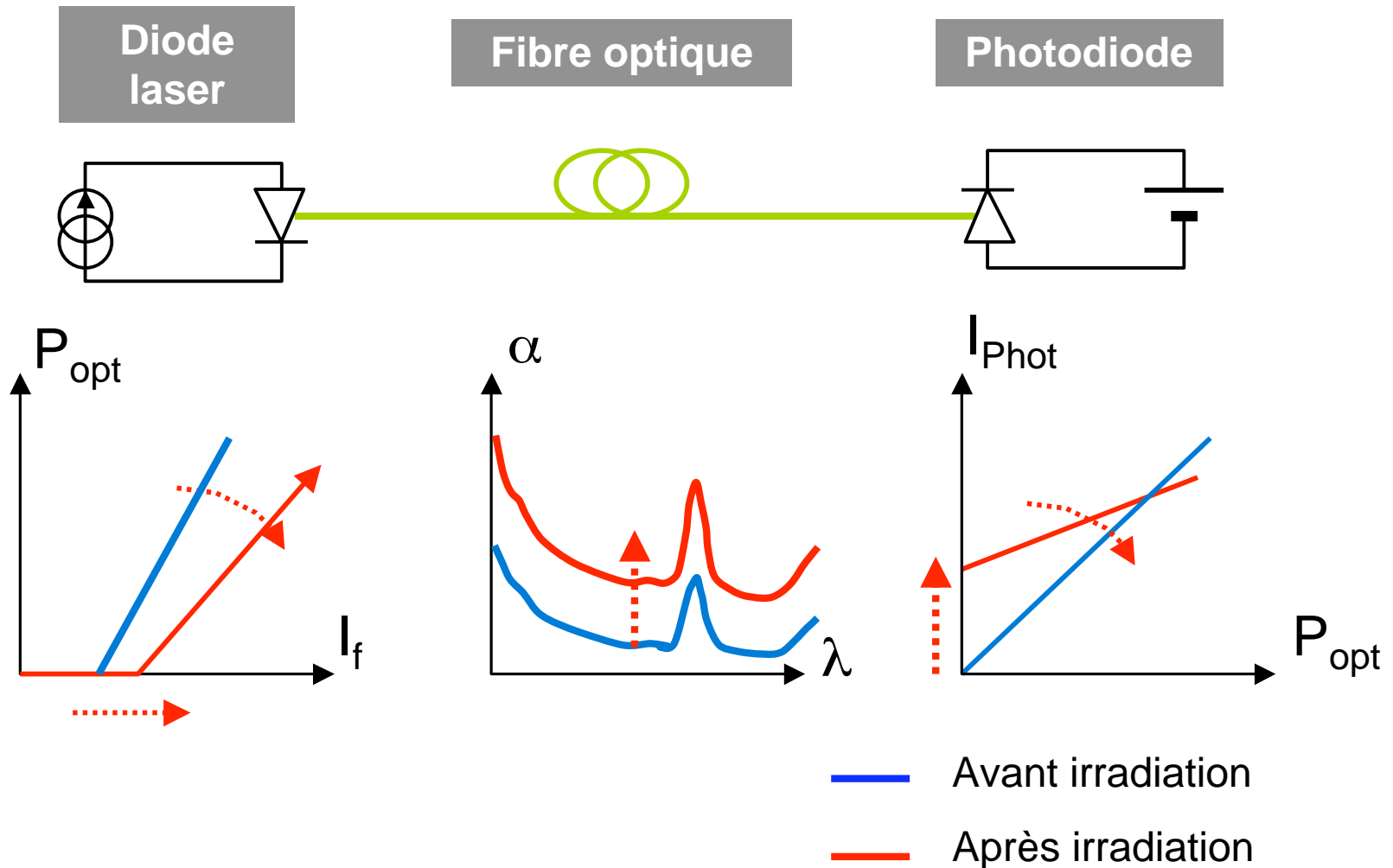
Les études sont difficilement transposables d'un environnement à un autre



Les trois pièces maîtresses de la liaison optique



- Principaux modes de dégradation induits par les radiations

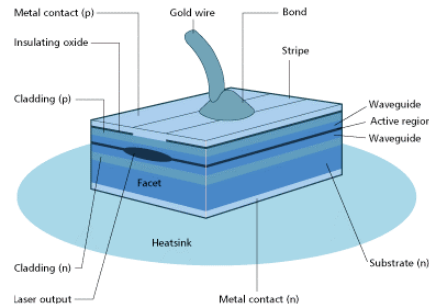


Les sources laser

Emission : les sources lasers à semi-conducteur



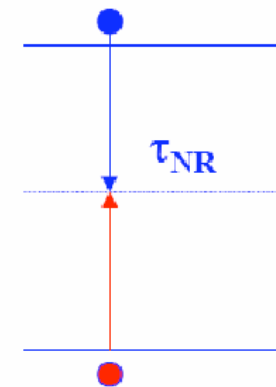
Sources laser à semi-conducteur :



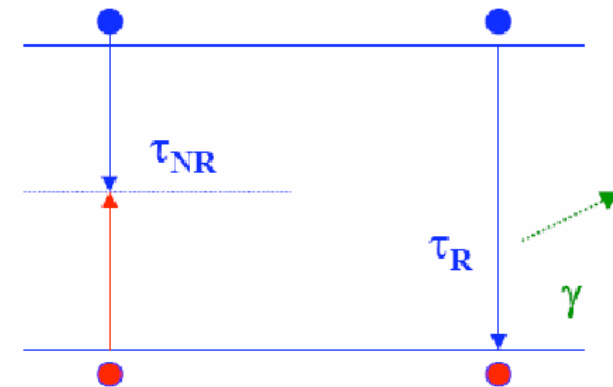
- Modification de la durée de vie des porteurs dans la cavité laser
 - Augmentation du seuil laser
 - Baisse de l'efficacité
 - Echauffement
- Augmentation du courant de fuite
 - Augmentation du seuil laser
 - Baisse de l'efficacité

Effet d'un dommage induit par irradiation : défauts réduisant la durée de vie des porteurs

Recombinaison non radiative



Recombinaison radiative

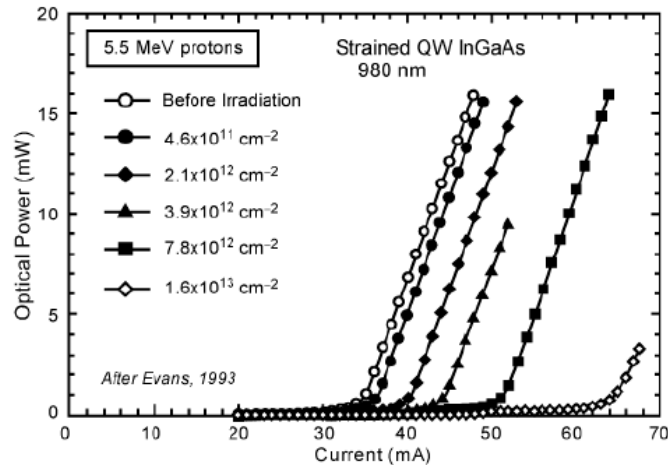


Réduction des recombinaisons radiatives → baisse de l'efficacité quantique (conversion électron-photon)

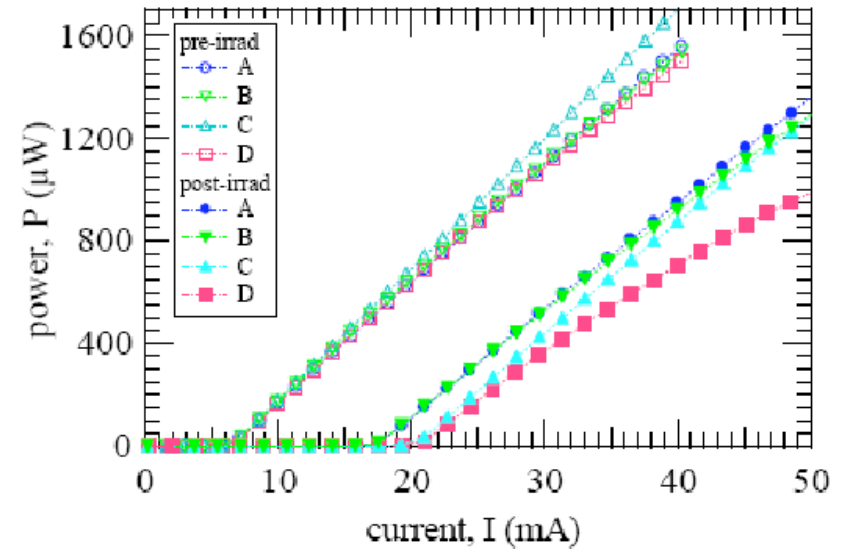
Dégradations : gamma, neutrons, protons



5.5 MeV proton damage on optical output power



100 kGy gamma irradiated and 10^{15} cm⁻² neutron irradiated



- Niveau composant
 - Baisse de la puissance injectée
 - Echauffement
- Niveau système
 - Augmentation du taux d'erreur de la liaison

A. Johnston « radiation effects in light-emitting and laser diodes », IEEE, Trans. Nuc. Sci. 50, pp 689-703, 2003

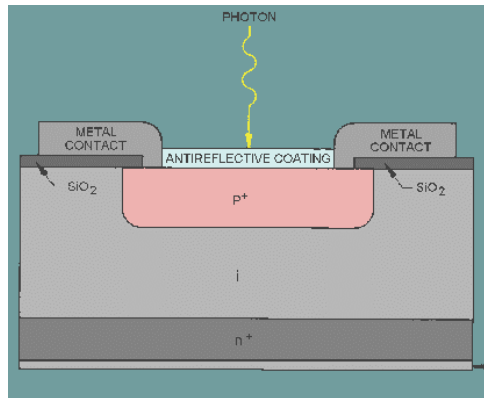
Courtesy K. Gill, CERN

Réception : Les photodétecteurs

Réception : les photodiodes



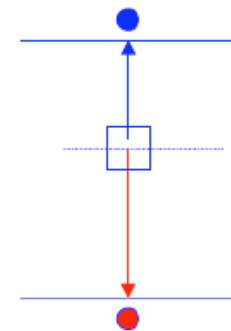
• Photodétecteurs :



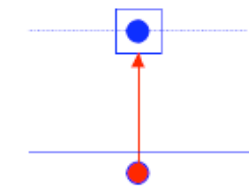
- Réduction de la durée de vie des porteurs et de la longueur de diffusion
 - Baisse de l'efficacité
- Générations de défauts
 - Augmentation du courant d'obscurité

Recombinaison
+ piégeage

Génération



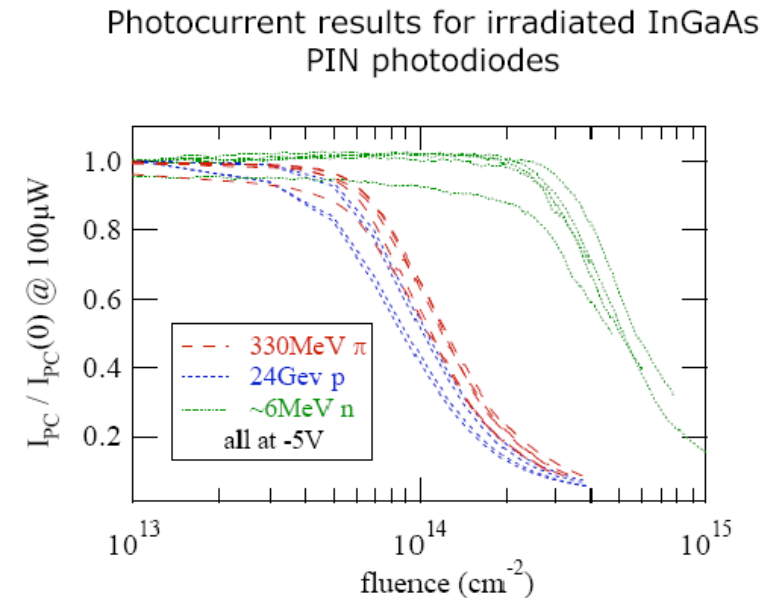
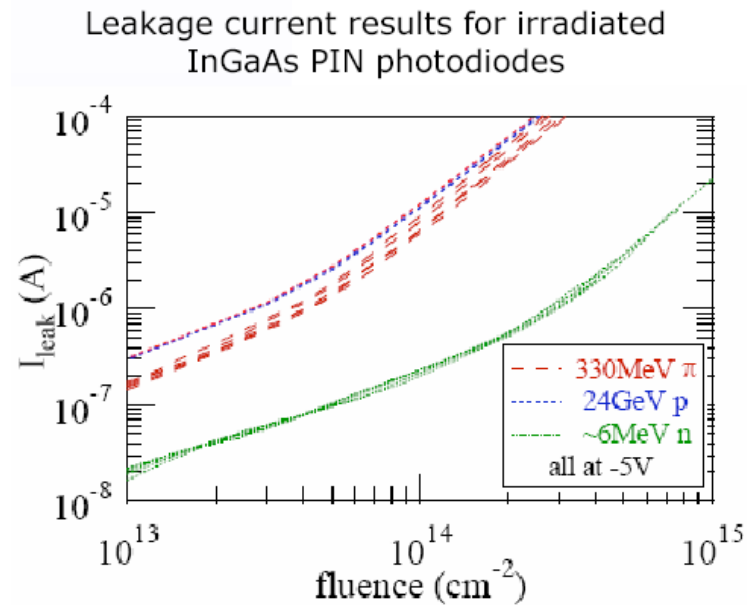
Courant de fuite



Perte de signal

L'augmentation du courant d'obscurité conduit essentiellement à l'augmentation du niveau de bruit

Réception : les photodiodes



- Niveau composant
 - Augmentation du bruit de fond
 - Augmentation de la consommation
- Niveau système
 - Augmentation du taux d'erreur (liaison numérique)
 - Perte de dynamique (liaison analogique)

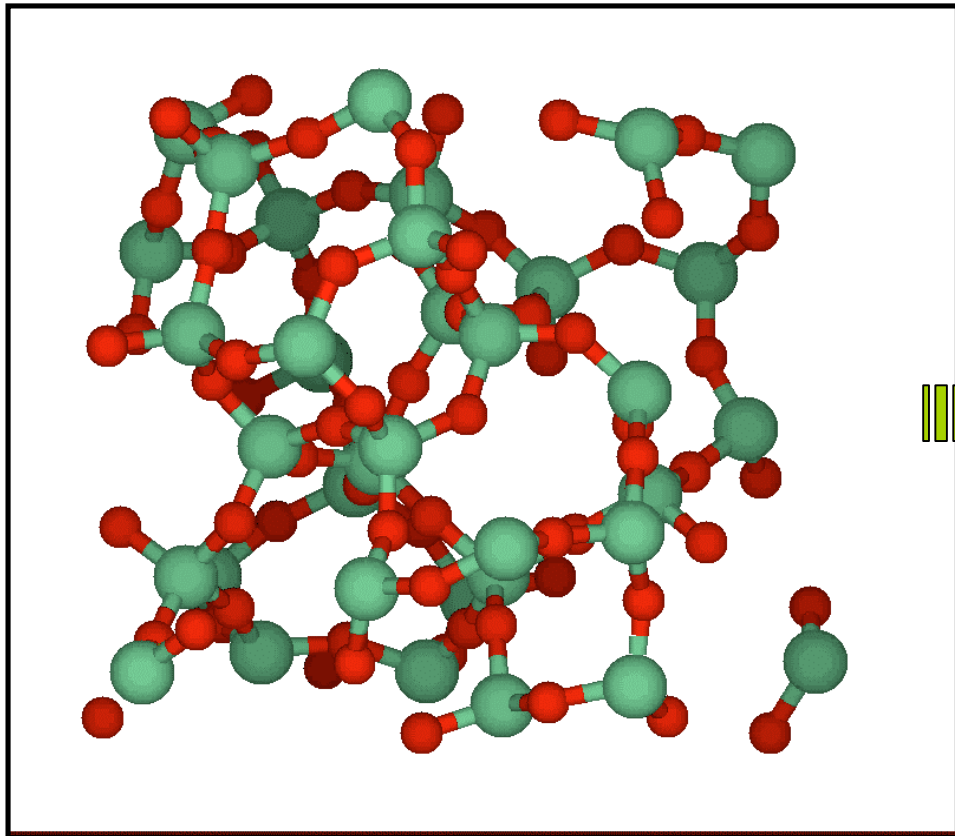
Courtesy K. Gill, CERN

Liaison : Les fibres optiques

Les effets des radiations sur les fibres optiques (1/3)



- **Irradiation** → Modifications structurales de la matrice vitreuse à l'échelle subnano ou nanométrique



- **Création de défauts ponctuels**

- Par ionisation
- Par déplacement atomique

- **Nature des défauts**

- Dépend du type d'irradiation
- Dépend de la matrice vitreuse

- **Durée de vie des défauts**

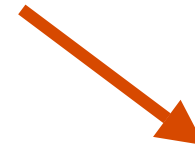
- Très variable

Courtesy N. Richard, CEA/DIF

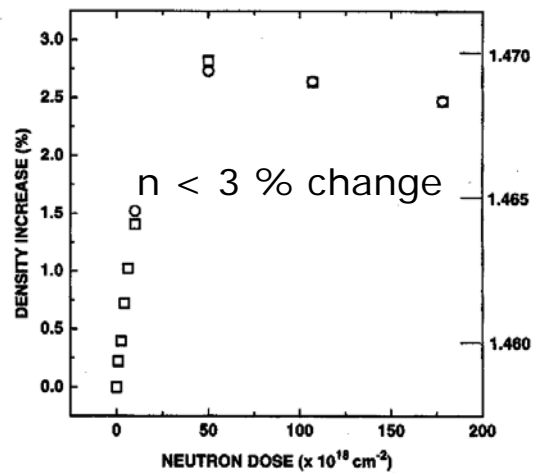
Les effets des radiations sur les fibres optiques (2/3)



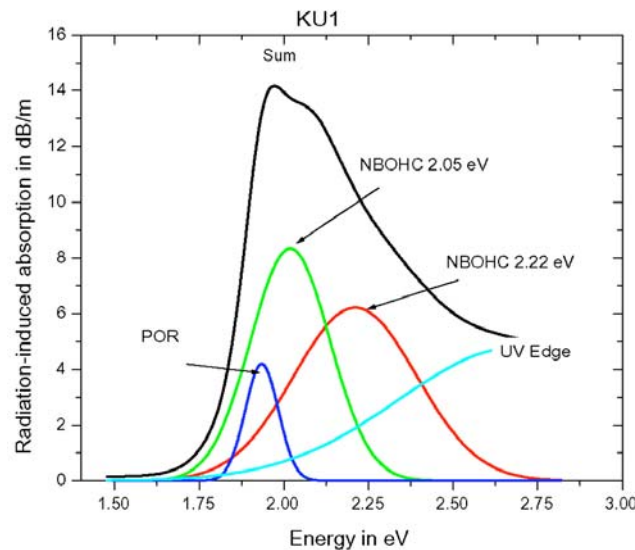
- Irradiation → et ses conséquences macroscopiques
Phénomène de dose cumulée, ex : ITER



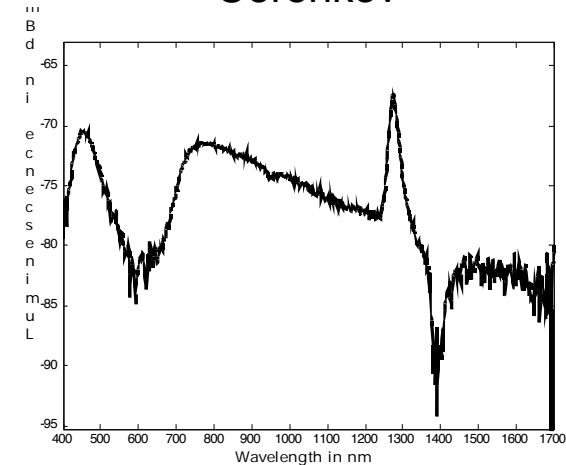
Evolution de l'indice de réfraction due à une compaction



Atténuation induite par irradiation



Radio-luminescence due à des centres colorés, impuretés, Cerenkov

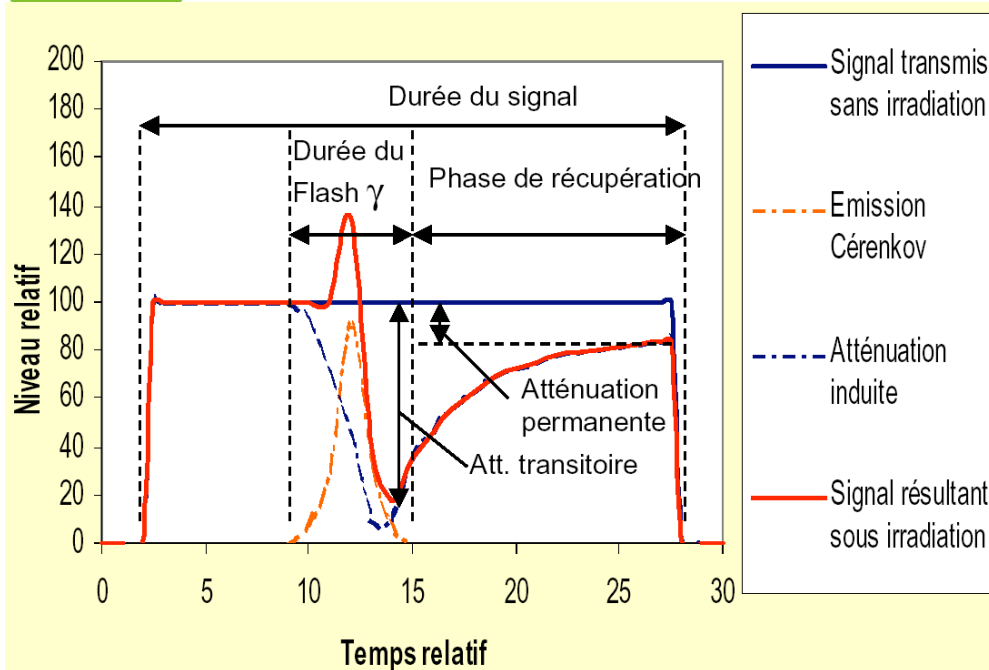


Courtesy B. Brichard, SCK-CEN

Les effets des radiations sur les fibres optiques (3/3)



- **Irradiation** → et ses conséquences macroscopiques
Phénomènes transitoires : irradiation pulsée (flash X)



- **Atténuation induite par irradiation**

- Recombinaison paires électron / trou
- Centres absorbants

- **Émission induite par irradiation**

- Cerenkov
- Radio-luminescence

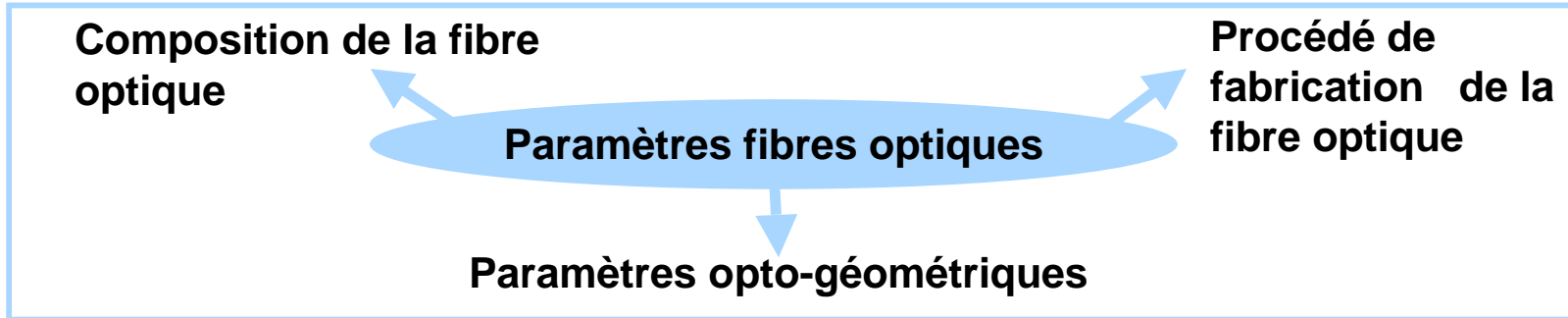
Dégradation transitoire du signal propagé dans la fibre optique

Les temps spécifiques après irradiation associés au flash X (1 ns- 1s) sont différents de ceux associés à la dose cumulée (1s – 10 ans) donc la tenue d'une même fibre optique à ces environnements peuvent être très différentes

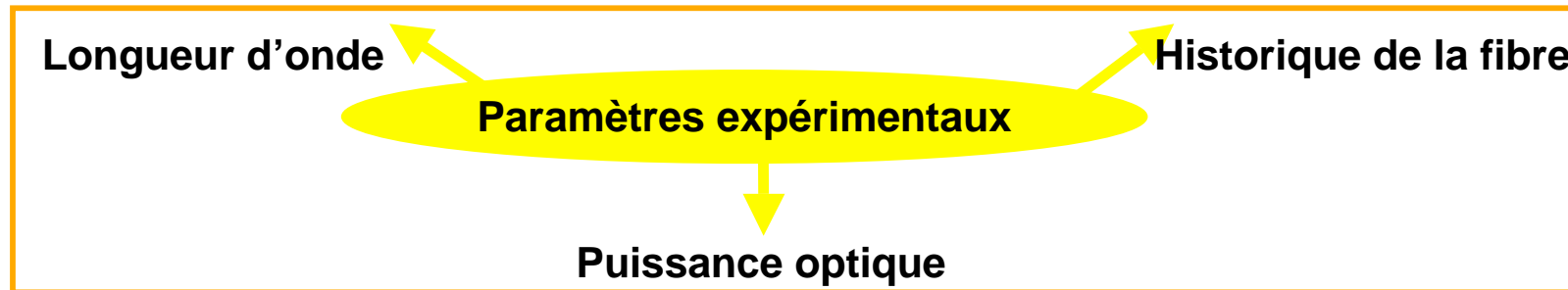
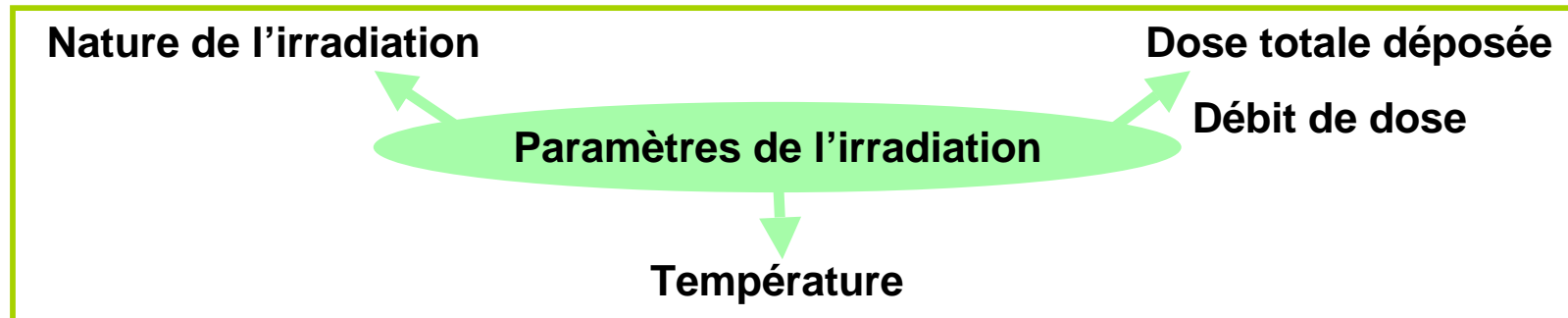
Paramètres régissant la réponse des fibres sous irradiation



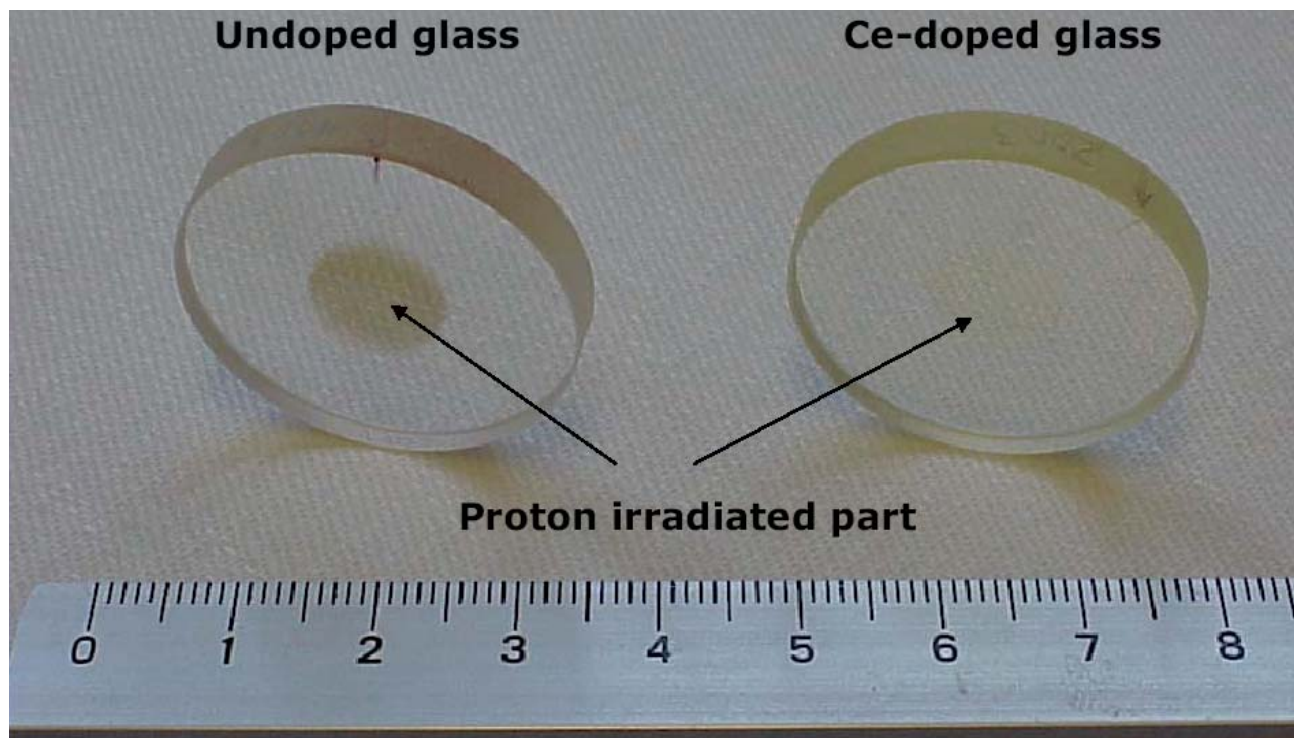
- **Paramètres intrinsèques**



- **Paramètres extrinsèques**



Influence des dopants



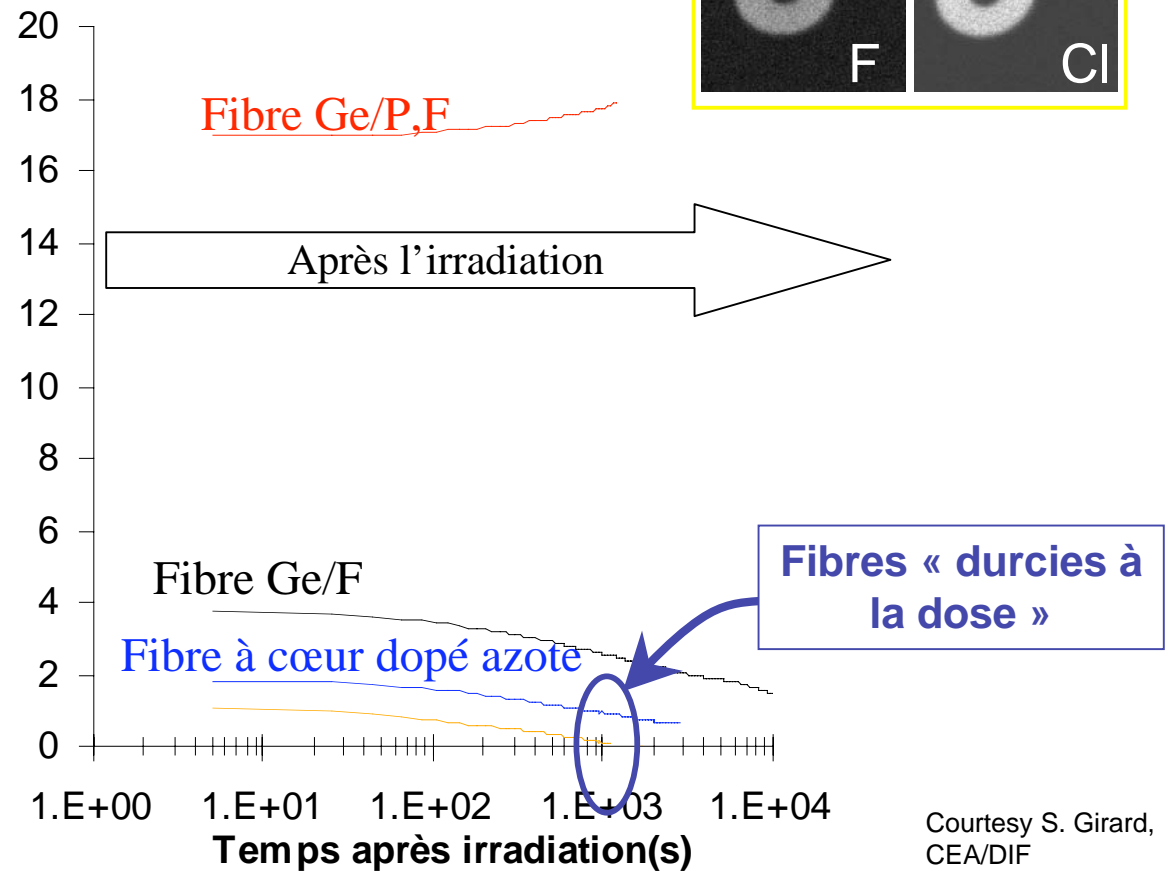
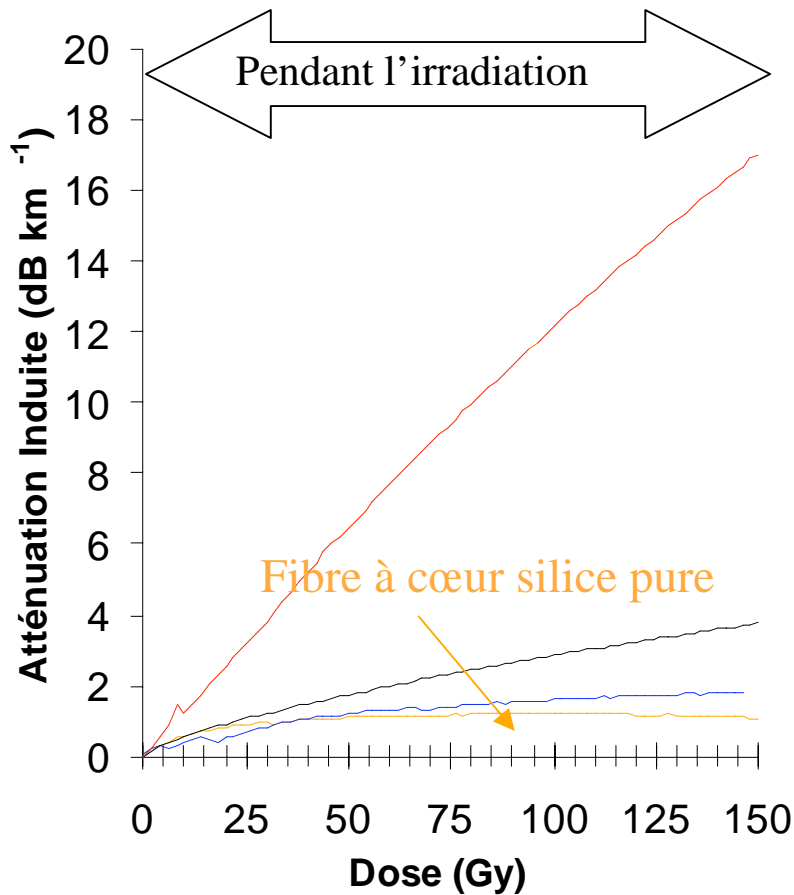
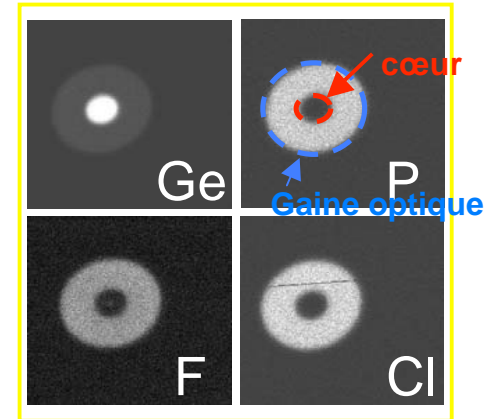
- Exemple de l'influence des dopants de la silice massive

Courtesy A. Gusarov, SCK-CEN

Réponses des fibres à la dose γ (1/3)



- Atténuation induite à 1550 nm ($\gamma, \sim 0.1 \text{ Gy/s}$):
 - Influence des dopants en cœur
 - Influence des dopants en gaine



Courtesy S. Girard, CEA/DIF

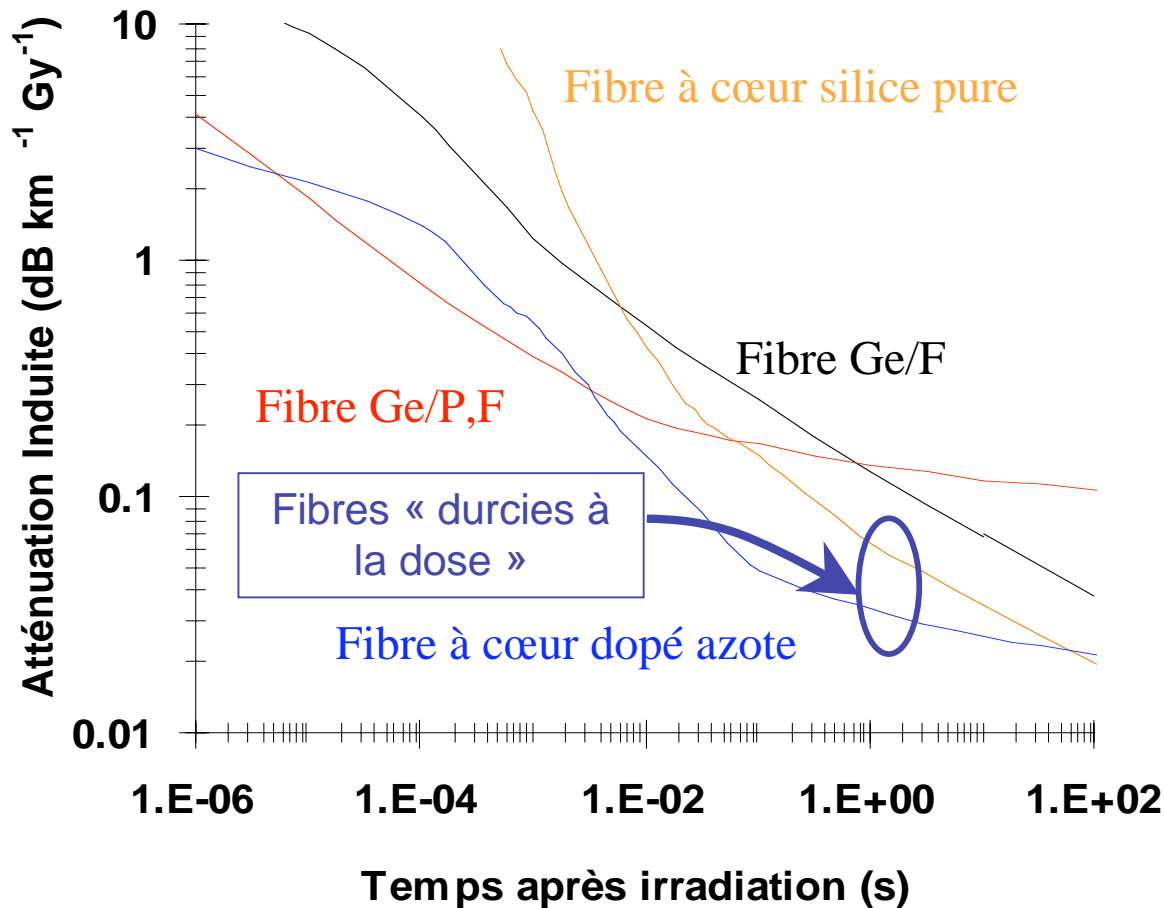
Réponses des fibres optiques au flash X (2/3)



- Atténuation induite à **1550nm** après un flash X:

Influence des dopants en cœur

Influence des dopants en gaine



- Atténuation

- Avant: 0.2 dB/km
- 10⁻⁶ s après: 1000 dB/km @100 Gy

- Deux principaux paramètres

- Atténuation maximale
- Cinétique de guérison

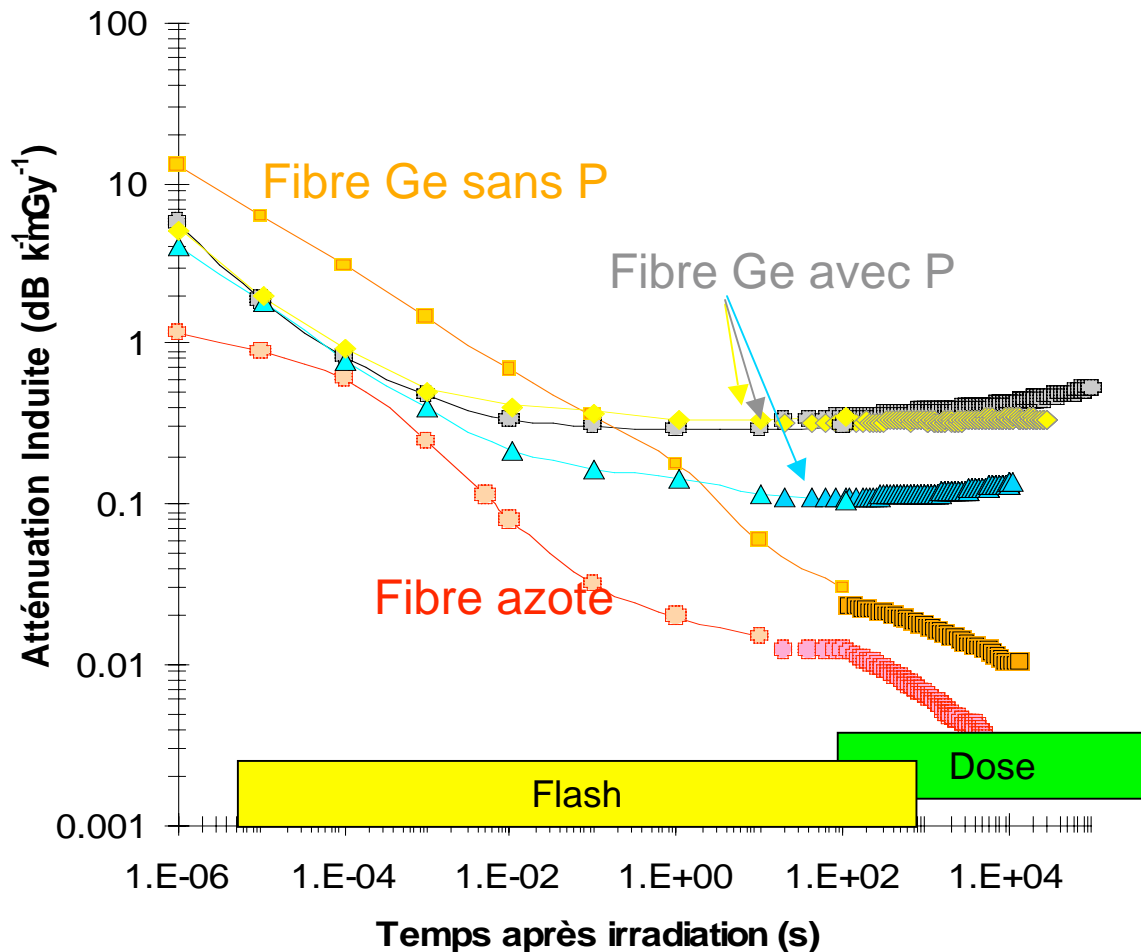
La pertinence d'une fibre optique dépend fortement des spécifications de l'environnement et de l'application considérés !!

Courtesy S. Girard, CEA/DIF

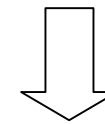
Comparaison des effets des radiations X et γ (3/3)



- Comparaison des cinétiques de guérison des pertes induites
 - ✓ Comportement particulier des fibres à cœur de silice pure



- ✓ Pas d'influence du débit de dose (doses < 150 Gy)
- ✓ Mêmes mécanismes physiques à l'origine des pertes induites



- ✓ Comportement dose cumulée déductible d'essais sous flash X
- ✓ Comportement flash X non déductible des essais à la dose γ

Courtesy S. Girard, CEA/DIF

Conclusion



- **Dégradations induites par irradiation**

- Source optique

- Baisse de puissance (voir extinction)
- Diminution des marges de bruit, perte de dynamique

- Fibre optique

- Noircissement, perte de puissance optique
- Génération de lumière parasite
- Perte de fonctionnalité de la liaison

- Réception

- Augmentation du bruit de fond
- Baisse de la sensibilité de détection → erreurs logiques, baisse de dynamique

- **Parades :**

- Choix technologiques

- Diodes laser + tolérantes (DFB)
- Fibres optiques en Silice pure (pour les effets de dose cumulée)

- Architecture

- Systèmes de compensation des dégradations (asservis à la puissance optique)