

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

FR 8900153

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

CEA-CONF - -9609

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

SI

LIAISON A FIBRES OPTIQUES POUR LA TELEMANNIPULATION
EN MILIEU NUCLEAIRE

BREUZE G.- CARNET B.- FRIANT A.

CEA Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, 91 - Gif-sur-Yvette (FR).
Dept. d'Electronique et d'Instrumentation Nucleaire

BLANC F.- LORDET J.- BOISDE G.

CEA Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses, 92 (FR). Dept.
de Genie Nucleaire

Communication présentée à : OPTO 88

Paris (FR)
17-19 May 1988

LIAISON A FIBRES OPTIQUES POUR LA TELEMANIPULATION EN MILIEU NUCLEAIRE

A FIBER OPTIC LINK FOR THE REMOTE HANDLING IN NUCLEAR ENVIRONMENT

par

Gérard BREUË^{**}, Floréal BLANC^{**}, Bernard CARNEI^{*},
Jacques LORDET^{*}, Alain FRIANT^{*}, Gilbert BOISDÉ

* IRDI/D.LETI/DEIN. Service d'Instrumentation pour les Applications Industrielles - CEN-Saclay 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

** IRDI/DERDCA/PGR/SEP. Groupe d'Instrumentation et d'Automatisation CEN-Fontenay-aux-Roses BP 6 - 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex

RESUME

At CEA a R/D program is running to improve performances of servomanipulators used in nuclear fuel reprocessing plants.

Present work gives the main environmental parameters (gamma rays exposition, temperature) and shows the basis of the digital link designed to remote-handle such a manipulator.

Up to 10^5 Gy behavior of optical fibers and electronic components was studied. Two different optical cables were built, one for the long line (100 m), the second to set in an especially designed winding unwinding wheel. Six way permanent or remote-handle connectors were developed to connect optical interfaces and a leaktight penetration.

Measured budget of the link taking into account efficient photoetching of the pure silica core fiber and influence of gamma rays on the slave interface is presented.

INTRODUCTION

Une liaison à fibres optiques a été conçue pour le contrôle-commande d'un servomanipulateur mobile (SM) installé dans la cellule chaude d'une usine-pilote de retraitement des combustibles irradiés [1].

Les conditions d'environnement des éléments placés en permanence en cellule chaude sont particulièrement sévères :

- irradiations gamma prolongées du câble optique et de l'interface électronique esclave.
- débit de dose de 10 à 300 Gy.h^{-1} , selon la position de SM dans la cellule.
- température ambiante de 10 à $60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- étanchéité aux jets de décontamination, spécialement au niveau des connexions optiques.
- fonctionnement sans défaillance de la liaison jusqu'à 10^5 Gy .

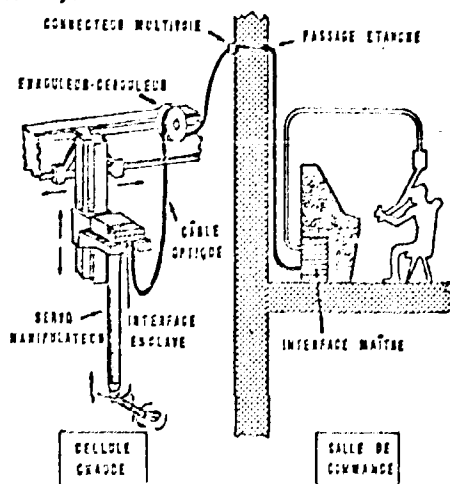


Fig. 1

LIAISON BORGIE A FIBRES OPTIQUES

La figure 1 montre l'ensemble du dispositif de téléopération en milieu hostile. Une console de télémanipulation (pupitre-maitre) située en salle de commande permet, via la liaison optique d'une longueur de 100 m environ, d'initier les différents mouvements du SM. Les réactions de celui-ci sont transmises en retour à l'opérateur qui corrige manuellement les mouvements nécessaires.

La liaison entre le maître et l'esclave a fait l'objet d'études et de réalisations originales nécessitées par l'environnement nucléaire et décrites ci-après.

I - PRINCIPE DE LA TRANSMISSION

La figure 2 montre le principe de la transmission de données numériques.

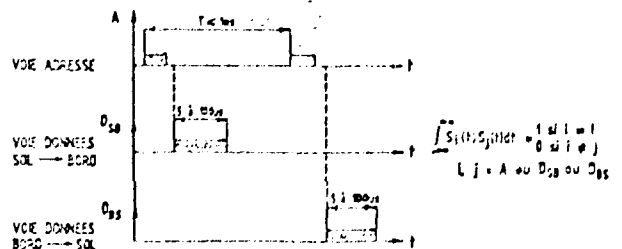
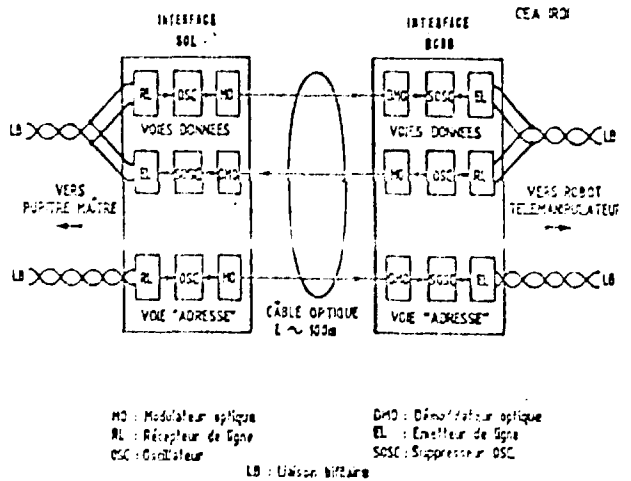


Fig. 2

PRINCIPE DE LA TRANSMISSION NUMERIQUE

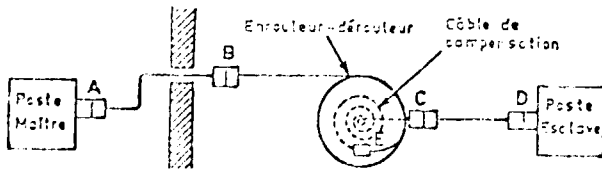
Le support de transmission est constitué de trois fibres optiques qui permettent de transmettre de la commande vers M et les deux autres les données dans chaque sens. Ces trois fibres sont accolées à trois autres (gardiées en attente pour d'autres fonctions) dans un câble optique à six voies.

Le chronogramme de la figure 2 montre que la transmission des informations, données et adresses, s'effectue par paquets de durée variable (5 à 100 μ s) toutes les millisecondes. Les interfaces optoélectroniques maître (ou sol) et esclave (ou bord) comprennent les modulateurs et démodulateurs optiques (composants émetteurs et détecteurs et circuits analogiques) et les circuits spéciaux (oscillateur et suppresseur d'oscillateur). La commande des diodes laser et de la diode électroluminescente est une modulation d'amplitude à deux niveaux de puissance pour les bits d'informations ; une modulation supplémentaire à fréquence fixe élevée sert à remplir les zones de silence comprises entre les paquets périodiques d'informations. Dans les récepteurs, la restitution fidèle de ces paquets est réalisée à l'aide de circuits logiques TTL.

II - CHOIX DES COMPOSANTS

La conception du système de transmission a nécessité des choix préalables concernant le support (fibres, connecteurs, câbles) ainsi que les composants optoélectroniques et électroniques des interfaces.

Un schéma simplifié du support de transmission est représenté en figure 3. Seuls le poste maître et le connecteur de l'interface maître sont en salle de commande. Tous les autres connecteurs, l'enrouleur-dérouleur de câble ainsi que le poste esclave (interface bord, capteurs et mécanismes du robot) sont en zone active.



A, B, C, D: Connecteurs télémanipulables
E: Raccordement interne

Fig. 3

Le choix des fibres et câbles s'est appuyé sur l'expérience déjà ancienne de nos laboratoires dans le domaine de l'étude des fibres sous rayonnement [2, 3] et de l'utilisation de ces dernières en milieux nucléaire [4, 5].

Malgré leur bonne tenue au rayonnement gamma, les fibres POS ont été écartées pour des raisons de connectique.

Les fibres actuellement retenues sont de type toute silice AS200/280 de la Société QUARTZ et SILICE. Le diamètre de cœur de 200 μ m a été choisi de préférence à 100 μ m pour des raisons de bilan énergétique.

Les câbles comprennent six fibres. Le câble principale est de section circulaire (diamètre environ 10 mm) avec porteurs en kevlar. Son élongation à 200 daN est inférieure à 0,1 % ; sa limite de rupture est de 1500 daN ; son rayon de courbure minimale est de 300 mm. Le câble de compensation est un câble plat (largeur environ 3 mm) obtenu par collage de fibres nues

juxtaposées ; son rayon de courbure minimale est de 50 mm. Ces câbles ont été fabriqués par la Société QUARTZ et SILICE.

Les différents optoélectroniques de raccordement (connecteurs et enrouleur-dérouleur) ont fait l'objet de développements spécifiques. Les connecteurs télémanipulables à six voies ont été réalisés à partir d'un système à barillet déjà conçu pour d'autres applications [6].

Le choix des composants optoélectroniques émetteurs et détecteurs, et particulièrement ceux de l'interface bord est déterminé à partir d'un certain nombre de critères. Le tableau I donne les plus importants pour la présente application. A chaque couple émetteur-détecteur est attribué une figure de mérite (nombre d'étoiles de 1 à 4).

| COUPLES EMETTEUR- DETECTEUR | FIBRILETE INTRINSEQUE | BILAN DE PUISSANCE (1) | TENUE EN TEMPERATURE (2) | RESISTANCE AU RAYONNEMENT GAMMA (3) |
|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|---|
| DEL-PD | **** | * | **** | **** |
| DEL-APD | ** | *** | ** | ? APD |
| DL-PD | *** | ** | ** | ? DL |
| DL-APD | * | **** | ** | ? DL et APD |

DEL : Diode électroluminescente GaAlAs

DL : Diode laser GaAlAs

PD : Photodiode PIN Si

APD : Photodiode à avalanche Si

(1) Rapport entre la puissance maximale couplée et le seuil de détection (taux d'erreurs de bits $\leq 10^{-9}$)

(2) 10-60°C (avec circuits appropriés associés à DL et APD)

(3) $\dot{D} \sim 3 \times 10^{23} \text{ Gy.h}^{-1}$, $D = 10^5 \text{ Gy}$

TABLEAU I

CRITERES DE CHOIX DES COMPOSANTS OPTOELECTRONIQUES

Bien que le couple DEL-PD apparaisse le meilleur en termes de fiabilité et de tenue à l'irradiation gamma [2, 7], son bilan de puissance est le plus faible : environ 24 dBm. Une dégradation importante de ce bilan est prévisible à cause de la présence de plusieurs connecteurs en ligne et de l'influence sur la fibre optique de l'irradiation gamma. Aussi le couple DL-PD a été retenu pour équiper les deux voies maître vers esclave et le couple DEL-APD pour la voie esclave vers maître.

Ce choix est illustré par la figure 4. Compte tenu des puissances couplées et des seuils de détection correspondants à un taux d'erreur de 10^{-9} , des bilans de puissance de 36-37 dBm sont possibles avec les couples DL-PD et DEL-APD.

III - ESSAIS SOUS RAYONNEMENT

Les essais du câble principal et de l'interface bord ont été effectués avec l'installation d'irradiation SIGMA du D.KEII-DEIN : figure 5. Dans une chambre d'irradiation de 40 l, 4 sources axiales de ^{60}Co (activité actuelle d'environ 400 Ci) délivrent un débit de dose homogène d'environ 100 Gy.h^{-1} aux spirales de diamètre 360 mm du câble. L'irradiation s'est effectuée durant 1,5 mois en deux périodes successives séparées par une interruption de 3 jours après 60 kGy.

Les essais sur fibres nues et câble de compensation ont été faits au DGP-SEP dans un irradiateur gamma (^{60}Co) dont le débit de dose est d'environ 10^3 Gy.h^{-1} .

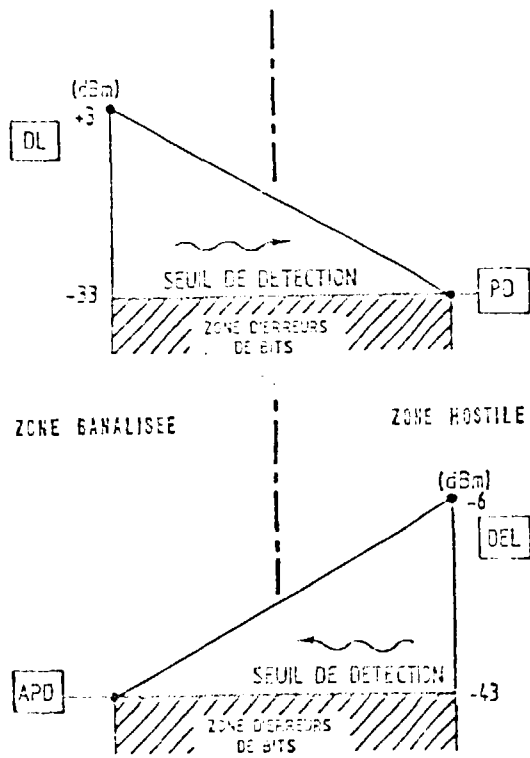


Fig. 4

BILANS THEORIQUES DE PUISSANCE POUR LES 2 COUPLES EMETTEUR-DETECTEUR CHOISIS

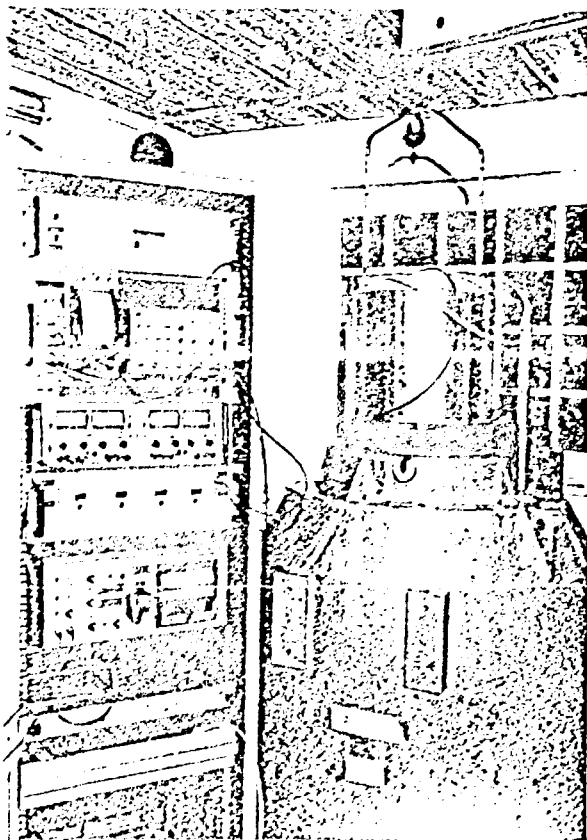


Fig. 5

INSTALLATION D'IRRADIATION ET BANC DE MESURES DE LA FIBRE OPTIQUE

Les doses intégrées de 10^5 Gy ont été les mêmes dans les deux cas.

La figure 6 montre les résultats d'irradiation des fibres AS200/280 de 20 m de câble principal enroulé sans effort de traction. Les conditions d'éclairement des fibres sont différentes durant l'expérience. Deux fibres ne sont éclairées que lors des mesures d'atténuation (durant 10 s seulement). Les quatre autres fibres transmettent en permanence de la lumière fournie par deux DEL (840 nm) et deux DL (830 nm) dont les niveaux de lumière injectés sont réglés à 15 μ W, 250 μ W, 600 μ W et 1 mW. Les courbes de la figure 6 mettent en évidence les points suivants :

- les fibres AS200/280 montrent un effet de durcissement même lorsqu'elles ne sont pas éclairées en permanence. Pour les 6 fibres, la cinétique des atténuations induites atteint une valeur maximale vers quelques kGy (pour le débit de dose considéré) et décroît sensiblement ensuite. L'effet de durcissement est confirmé par le comportement des fibres durant la 2ème phase d'irradiation (de 60 à 100 kGy) au cours de laquelle les atténuations induites sont pratiquement stabilisées après quelques kGy.
- les fibres AS200/280 sont le siège d'un phénomène de photodécoloration important : l'atténuation induite à une dose donnée dépend notablement des conditions d'éclairement. La guérison par la lumière transmise des centres colorés, responsables de l'atténuation induite a déjà fait l'objet de nombreux travaux [7 - 13]. Une efficacité élevée de photodécoloration a été démontrée dans les fibres à cœur de silice pure. Dans nos conditions expérimentales, la photodécoloration s'avère plus efficace quand l'injection de lumière est faite par une DEL (courbe 250 μ W en fig.6) plutôt que par une DL (courbe 1 mW en fig.6). Cette constatation pourrait être liée au fait que l'émission de la DL, spectralement plus étroite et spatialement plus directive que celle de la DEL, atteindrait moins de centres colorés. Les niveaux d'activation des pigments sont probablement dispersés (leur absorption spectrale est une bande) et leur gradient dans l'interface cœur-gaine (associé au dupont fluor) peut aussi intervenir.

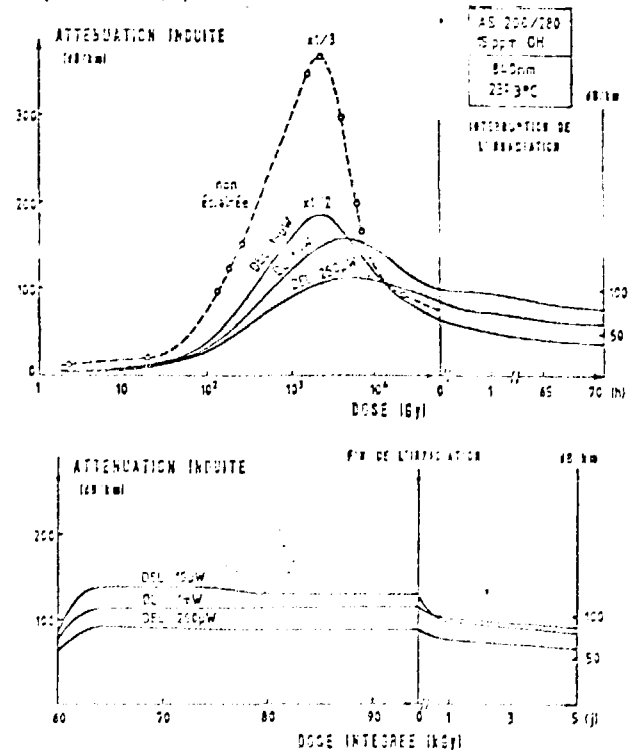


Fig. 6 INFLUENCE DE LA PHOTODECOLORATION DE LA FIBRE AS200/280 DU CABLE SUR L'ATTENUATION INDUITE (Dose $\sim 10^5$ Gy avec $\sim 1000 \mu$ W)

La longueur irradiée des fibres de compensation est pratiquement nulle sous rayonnement après répartition sur 10 m de câble principal. La longueur des fibres principales est donc limitée par la durée de 5 m de diamètre net de 10 m. Cependant, pour le câble de compensation de 10 m, la longueur irradiée n'a été que de 7,5 m environ. Le domaine spectral couvert s'étend de 400 à 2000 nm.

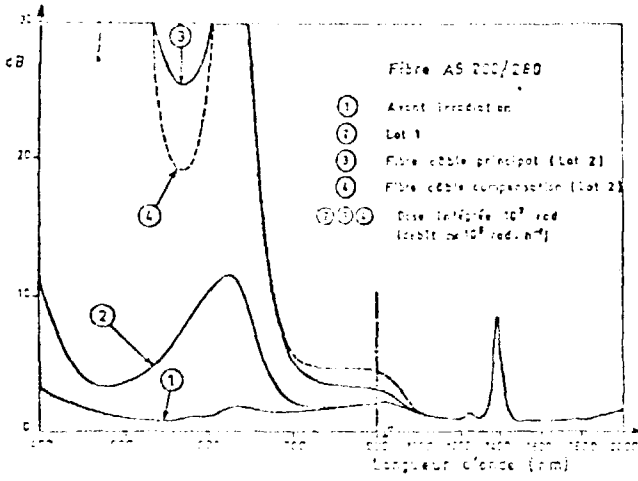


Fig. 7

Les modifications spectrales induites par l'irradiation sont surtout sensibles en-dessous de 1000 nm. La hauteur du pic à 1400 nm suggère que les fibres traitées ont une teneur en radicaux hydroxyle de l'ordre de 15 ppm. L'irradiation révèle un pic de fibrage à 630 nm (courbes 2, 3 et 4) qui est pratiquement absent avant irradiation.

La fibre du lot 1 présente, après irradiation, une réponse spectrale nettement meilleure que celles du lot 2. Ces différences ne sont pas de nature à compromettre la faisabilité de la liaison, mais soulèvent la nécessité future de spécifications garanties.

Enfin la structure de câble affecte peu l'atténuation induite des fibres, sauf entre 700 et 1000 nm où la structure câble plat semble moins favorable (courbes 3 et 4).

Le durcissement de l'interface bord résulte de sa conception électronique : les composants DEL et PD fournis par la Société THOMSON-CSF-Composants se comportent correctement sous rayonnement gamma [2] et les composants analogiques de technologie bipolaire ont une bonne tenue reconnue jusqu'à au moins 5×10^7 Gy. Les circuits logiques et le circuit oscillateur n'ont pas montré de défaillances jusqu'à 10^7 Gy.

On a néanmoins constaté que cette dose élevée augmente le seuil de détection des deux voies réceptrices de 8 dB et diminue le niveau d'émission de la voie DEL de 1 dB. De plus, l'élévation de la température de 20 à 60 °C dégrade de 3 dB ce niveau d'émission.

IV - DESCRIPTION DES ELEMENTS DE LA LIAISON

La figure 8 donne les schémas synoptiques des interfaces bord et sol. L'éclatement des fibres du câble principal permet le raccordement aux composants émetteurs et détecteurs par des connecteurs mono-voie du type F - SMA normalisé. Dans l'interface sol, les trois fibres gardées en attente sont connectées à des DEL émettant une lumière continue destinée à la photocalorisation. Il est prévu de réduire au maximum les dimensions de l'interface bord durcie ; cette

la durée de, le traitement à l'interface sol, cette interface n'utilise pas de composants optoélectroniques susceptibles d'être affectés par des rayonnements ionisants.

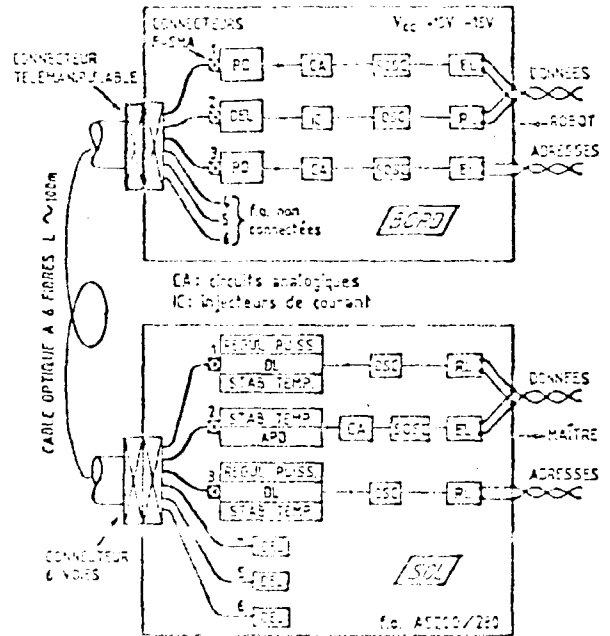


Fig. 8 INTERFACES OPTOELECTRONIQUES

BORD ET SOL

Les éléments opto-mécaniques comprennent les connecteurs, l'enrouleur-dérouleur de câble et la traversée de paroi. Pour cette dernière, une solution de type bouchon-plastique, classique pour les câbles électriques a été adoptée.

Les connecteurs six voies ont été développés en liaison avec la Société SIEEM (figure 9). Ils sont télé-manipulables avec encliquetage par baïonnette. Les pertes d'insertion (mesurées hors d'état d'équilibre des modes) sont de 2,5 dB par connexion pour la voie DEL-APD et de 1 dB par connexion pour les voies DU-PO.



Fig. 9

Pour l'enrouleur-dérouleur, un dispositif à rappel par ressort spiral a été adopté de préférence à un asservissement motorisé. Cette conception fait intervenir un câble plat de compensation enroulé en spirale dans une cassette appropriée (figure 10). L'atténuation due au seul enroulement de ce câble reste inférieure à 1 dB. L'effort de traction exercé sur le

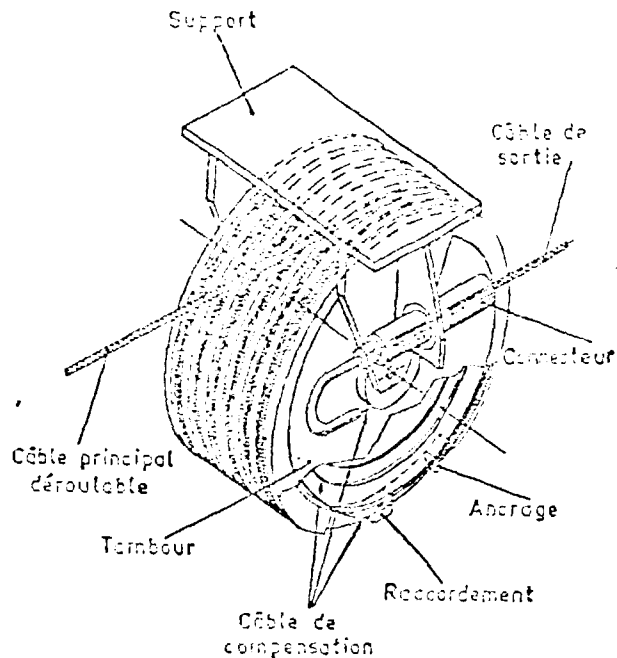


Fig. 10

câble principal est de 8 daN en position déroulé et de 2 daN en position enroulé, ceci pour une longueur déroulable utile de 13 m. L'ensemble doit satisfaire aux spécifications complémentaires suivantes :

- nombre de manœuvres : 6000
- vitesse maximale d'enroulement : 20 m.s⁻¹
- poids maximum : 25 kg

La figure 11 donne une vue de l'élément réalisé.

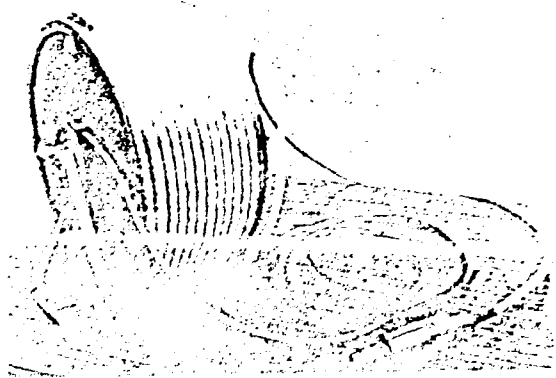


Fig. 11

V - BILANS DE LIAISON

Deux bilans de liaison sont à considérer dans la présente transmission par fibres optiques :

- un bilan de liaison des deux voies identiques maître vers esclave.
- un bilan de liaison de la voie de retour des données esclave vers maître.

Ces bilans de puissance apparaissent sur la figure 12. Les pertes en ligne indiquées dans la figure 12 sont des pertes en ligne pour une fibre

standard reproductible dans une réalisation industrielle, soit - 7 dBm pour la UEL et 0 dBm pour les OL. Il en est de même pour les seuils de détection des PD et APD, respectivement de - 30 et - 40 dBm. La longueur utile des fibres pleines en zone utile est de 40 m.

PLISSAGES OPTIQUES

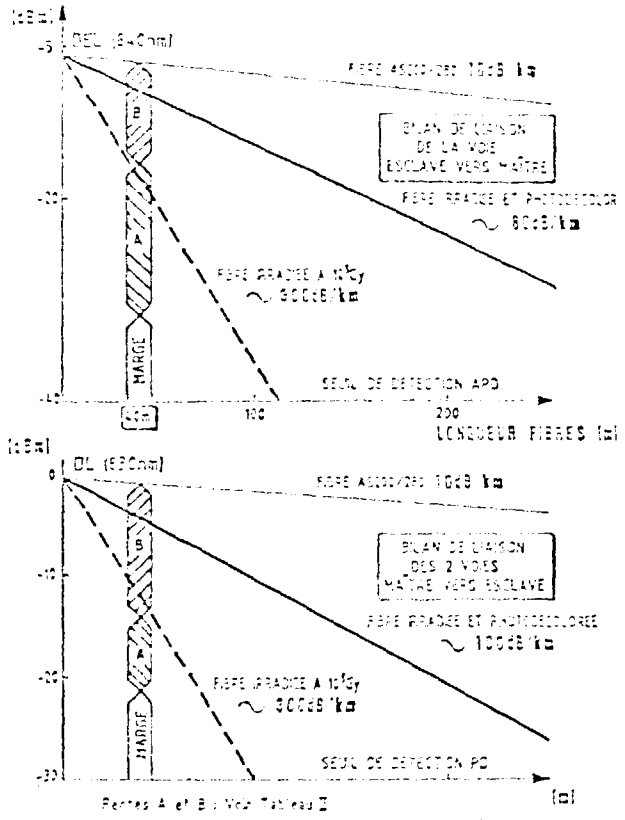


Fig. 12 BILANS DE LIAISON DES 3 VOIES DE TRANSMISSION A FIBRES OPTIQUES (LONGUEUR GRADÉE A 10⁵ Gy : 40m)

Il convient de distinguer :

- les pertes en ligne fixes A, obtenues avant la mise en service de l'installation.
- les pertes maximales B induites par les deux contraintes d'environnement 60 °C - 10⁵ Gy durant la phase opérationnelle ; B est la somme algébrique des pertes dues aux deux effets simultanés.

| BILAN DE LIAISON | COMPOSANTS | VOIES | |
|---|---------------------|------------------|------------------|
| | | MAÎTRE - ESCLAVE | ESCLAVE - MAÎTRE |
| Puissance couplée P _c (dBm) | DLs et DEL | 0 | -7 |
| Pertes fixes A (dB) | Fibres | 1 | 1 |
| | Connecteurs (5) | 5 | 12,5 |
| Pertes d'ins au milieu hostile** B (dB) | Épaveurs-Périsseurs | 1 | 1 |
| | Fibres | 4 | 3 |
| Seuil de détection S _d (dBm) | Connecteurs (4) | 2* | 2* |
| | Épaveurs-Périsseurs | 1 | 1 |
| MARGES | Seuils APD et ASd | 8 | 4 |
| | POs et APD | -30 | -40 |
| | | 8 | 8,5 |

* Valeur estimée ** 60°C et 10⁵Gy

TABIEAU II BILAN DE LIAISON DE LA

et à la fin de leur constitution à A et B des différents composants de la liaison pour chaque type de transmission.

Il faut que la marge de sécurité soit suffisante pour garantir une sécurité de fonctionnement élevée, soit obtenue, la photodécoloration est essentielle avec le type de fibre choisie : l'atténuation induite est alors de 80 à 100 dB.km⁻¹ (au lieu de 300 dB.km⁻¹ sans photodécoloration). Cette valeur d'atténuation induite à 10⁵ Gy s'avère néanmoins importante vis-à-vis des résultats les plus récents [14, 15].

CONCLUSIONS

Les travaux présentés montrent l'intérêt des fibres optiques pour la télémanipulation en milieu nucléaire.

Le choix des composants (fibres, optoelectronique durcie, éléments opto-mécaniques) a été essentiel pour obtenir un bilan de liaison favorable. Bien que la fibre retenue ne soit pas la meilleure disponible sur le marché, le recours à la photodécoloration permet son utilisation dans des conditions acceptables. De nouveaux composants (câbles, connecteurs télémanipulables, enrouleur-dérouleur de câble) ont été réalisés. L'interface esclave durcie a été l'objet d'une conception élaborée.

Les ensembles optoelectronique et optomécanique de la liaison sont opérationnels jusqu'à 10⁵ Gy.

Certaines améliorations pourraient être apportées du point de vue durcissement des composants électroniques et de la fibre, pour laquelle des spécifications garanties seront nécessaires à terme.

Des essais d'endurance vont se poursuivre pour déterminer le comportement des divers éléments dans l'ambiance industrielle d'une cellule chaude.

Remerciements

Les auteurs remercient Jean SERRE, Gérard BARRANDON, Claude BONNEJEAN et Claude DUGNET pour l'assistance technique.

REFERENCES

- [1] J.C. COLLOMBAT, R. EYKERY, P. QUAY and G. STREIFF PROC. RECOO 87 VOL.3, 8, Paris (1987)
- [2] G. BREUZÉ, B. CARNET, R. GAUDUET, R. LE MEUR and A. PELRAS, PROC. PHOTON 83 SPIE 404, 102 (1983)
- [3] G. BOISDE, C. BONNEJEAN, J.J. PEREZ, V. NEUMANN, B. WURIER, D. BOUCHER. PROC. PHOTON 83 SPIE 404, 17 (1983)
- [4] G. BREUZÉ, J. SERRE, A. FRIANI SPIE 667 (Cannes - 1987)
- [5] G. BOISDE, F. BLANC, J.J. FERRÉZ. TALANTA 35(2), 75 (1988)
- [6] A. SIENZ, B. KLING et B. KLING, A. PLEYCHER BF. 2473.733 (1980) et BF 2.524.653 (1982)
- [7] E.M. DIAMOV, L.S. KORMIENKO, E.P. NIKITIN, A.O. RYBALOVSKY and P.V. CHERNOV, Sov. J. Quantum Electron. 22(9), 1171 (1981)
- [8] F.J. FRIEBELE and M.E. GINGERICH. Appl. Opt. 20(19), 3443 (1981)
- [9] G.H. SIGEL Jr., E.J. FRIEBELE, M.J. MARRONE and M.E. GINGERICH IEE Trans. Nucl. Sci. NS-28(6) 4795 (1981)

- [10] C.E. BARNES IRE Trans. Nucl. Sci. NS-29(4) 1439 (1982)
- [11] E.M. GILBERT IRE Trans. Nucl. Sci. NS-29(6) 1484 (1982)
- [12] R.H. WEST and A.P. LENHAM. Electron. Lett. 16(11) 483 (1982)
- [13] G. BREUZÉ PROC. OPTO 87, IIS, Paris (1987)
- [14] R.H. WEST SPIE 721, 51 (1986)
- [15] C.E. BARNES, R.A. GREENWELL, G.W. NELSON SPIE 857 (Cannes - 1987)