



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.650.2

(06/2002)

SÉRIE G: SYSTÈMES ET SUPPORTS DE
TRANSMISSION, SYSTÈMES ET RÉSEAUX
NUMÉRIQUES

Caractéristiques des supports de transmission – Câbles à
fibres optiques

**Définitions et méthodes de test applicables aux
attributs statistiques et non linéaires des fibres
et câbles optiques monomodes**

Recommandation UIT-T G.650.2

RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE G
SYSTÈMES ET SUPPORTS DE TRANSMISSION, SYSTÈMES ET RÉSEAUX NUMÉRIQUES

CONNEXIONS ET CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX	G.100–G.199
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES COMMUNES À TOUS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	G.200–G.299
CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX À COURANTS PORTEURS SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.300–G.399
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX HERTZIENS OU À SATELLITES ET INTERCONNEXION AVEC LES SYSTÈMES SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.400–G.449
COORDINATION DE LA RADIODÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
EQUIPEMENTS DE TEST	G.500–G.599
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.600–G.699
Généralités	G.600–G.609
Paires symétriques en câble	G.610–G.619
Câbles terrestres à paires coaxiales	G.620–G.629
Câbles sous-marins	G.630–G.649
Câbles à fibres optiques	G.650–G.659
Caractéristiques des composants et sous-systèmes optiques	G.660–G.699
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999
QUALITÉ DE SERVICE ET DE TRANSMISSION	G.1000–G.1999
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.6000–G.6999
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.7000–G.7999
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.8000–G.8999

Pour plus de détails, voir la Liste des Recommandations de l'UIT-T.

Recommandation UIT-T G.650.2

Définitions et méthodes de test applicables aux attributs statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes

Résumé

La présente Recommandation contient les définitions des paramètres statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes. Elle contient également les méthodes de test de référence et les méthodes de test alternatives permettant de caractériser ces attributs.

Historique

- 1993 Les définitions et les méthodes de test ont été retirées des Recommandations concernant les fibres monomodes telles que la Rec. UIT-T G.652 et ont été utilisées pour créer la version initiale de la Rec. UIT-T G.650.
- 1997 La deuxième version de la Rec. UIT-T G.650 ajoute des définitions et méthodes de test pour la dispersion modale de polarisation ainsi que les Appendices I, II et III. La détermination améliorée de la longueur d'onde de coupure (désormais § 5.3.1.3.4) a également été ajoutée.
- 2000 La troisième version a établi les méthodes de référence et les autres méthodes de test pour la dispersion modale de polarisation, modifié les définitions et méthodes de test pour l'erreur de concentricité de cœur (§ 3.4 et 5.2) et ajouté un § 5.1.4 et les Appendices IV, V et VI.
- 2002 La Rec. UIT-T G.650 a été divisée en Recommandations plus petites, en vue d'en faciliter la mise à jour. La Rec. UIT-T G.650.1 contient les définitions et méthodes de test applicables aux attributs linéaires déterministes des fibres et câbles optiques monomodes.

Source

La Recommandation G.650.2 de l'UIT-T, révisée par la Commission d'études 15 (2001-2004) de l'UIT-T, a été approuvée le 29 juin 2002 selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 2002

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	1
2	1
2.1	1
2.2	1
3	2
3.1	2
3.1.1	2
3.2	4
4	4
5	5
5.1	5
5.1.1	5
5.1.2	11
5.1.3	14
5.1.4	19
5.2	28
Appendice I – Détermination du retard associé à la PMD à partir d'un interférogramme.....	28
Appendice II – Attributs non linéaires.....	31
II.1	31
II.2	31
II.3	32
II.4	35
II.5	35
II.5.1	35
II.5.2	36
II.6	39
Appendice III – Méthodes de test pour la surface efficace (A_{eff}).....	39
III.1	39
III.1.1	39
III.1.2	39
III.1.3	40
III.1.4	42
III.2	42

	Page
III.2.1 Généralités.....	42
III.2.2 Montage de mesure.....	42
III.2.3 Procédure de mesure.....	44
III.2.4 Présentation des résultats.....	46
III.3 La technique de l'exploration du champ proche (NFS).....	46
III.3.1 Généralités.....	46
III.3.2 Montage de mesure.....	47
III.3.3 Procédure de mesure.....	47
III.3.4 Présentation des résultats.....	48

Recommandation UIT-T G.650.2

Définitions et méthodes de test applicables aux attributs statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes

1 Domaine d'application

La présente Recommandation contient les définitions et méthodes de test applicables principalement aux mesures en usine des attributs statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes décrits dans les Recommandations UIT-T G.652, G.653, G.654 et G.655. Ces définitions et méthodes de test ne conviennent généralement pas pour les fibres multimodes, telles qu'elles sont décrites dans la Rec. UIT-T G.651. Certaines de ces méthodes peuvent également servir le cas échéant, à caractériser des composants optiques autonomes tels que ceux décrits dans la Rec. UIT-T G.671. La Rec. UIT-T G.650.1 contient les définitions et méthodes de test applicables aux attributs linéaires déterministes.

2 Références

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants qui, de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute Recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée.

2.1 Références normatives

- [1] Recommandation UIT-T G.652 (2000), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes.*
- [2] Recommandation UIT-T G.653 (2000), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion décalée.*
- [3] Recommandation UIT-T G.654 (2002), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée.*
- [4] Recommandation UIT-T G.655 (2000), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion décalée non nulle.*
- [5] Recommandation UIT-T G.650.1 (2002), *Définitions et méthodes de test applicables aux attributs linéaires déterministes des fibres et câbles optiques monomodes.*

2.2 Références informatives

- [6] Recommandation UIT-T G.671 (2002), *Caractéristiques de transmission des composants et sous-systèmes optiques.*
- [7] Recommandation UIT-T G.663 (2000), *Aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques.*

3 Termes et définitions

3.1 Définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1.1 Dispersion modale de polarisation (PMD, *polarization mode dispersion*)

3.1.1.1 phénomène de dispersion modale de polarisation: la dispersion modale de polarisation (PMD) est le temps de propagation de groupe différentiel (DGD, *differential group delay*) entre deux modes de polarisations orthogonales qui est à l'origine de l'étalement des impulsions dans les systèmes numériques et de distorsions dans les systèmes analogiques.

NOTE 1 – Dans les fibres à symétrie circulaire parfaite, les deux modes de polarisation se propagent à la même vitesse. Dans la réalité cependant, les fibres ne sont pas parfaitement circulaires et peuvent être soumises à des contraintes locales; en conséquence, la lumière qui se propage est scindée en deux modes de polarisation locaux qui se propagent à des vitesses différentes. Cette asymétrie varie aléatoirement le long de la fibre et dans le temps, ce qui confère une nature statistique à la dispersion PMD. On peut déduire de ces statistiques une valeur de temps DGD maximale.

NOTE 2 – Pour une fibre, arbitrairement mise en place à un moment et à une fréquence optique donnés, il existe toujours deux états de polarisation appelés les états de polarisation principaux (PSP, voir § 3.1.1.2). Si un seul état est excité, l'étalement des impulsions dû à la dispersion PMD disparaît. Inversement, quand les deux états PSP sont également excités, l'étalement lié à la différence de temps de propagation de groupe associée aux deux états PSP est maximal.

3.1.1.2 principaux états de polarisation (PSP, *principal states of polarization*): lorsqu'on utilise une fibre optique à une longueur d'onde plus grande que la longueur d'onde de coupure dans un régime quasi monochromatique, les états de polarisation principaux (PSP) de sortie sont les deux états de polarisations orthogonales de sortie pour lesquels les polarisations de sortie ne changent pas quand la fréquence optique varie légèrement. Les états de polarisations orthogonales d'entrée correspondants sont les états PSP d'entrée.

NOTE 1 – La biréfringence locale change le long de la fibre et l'état PSP dépend de la longueur de la fibre (ce qui n'est pas le cas des fibres fortement biréfringentes).

NOTE 2 – Les états PSP sont des vecteurs complexes aléatoires dépendant du temps et de la fréquence optique. Toutefois, en vertu de cette définition, il existe une petite plage de fréquences, appelée la largeur de bande PSP, sur laquelle on peut considérer que ces états sont pratiquement constants.

NOTE 3 – Si un signal a une largeur de bande plus grande que la largeur de bande des états PSP, les effets de dispersion PMD du deuxième ordre entrent en ligne de compte. Ils peuvent entraîner une dépolarisation du champ de sortie accompagnée d'un effet de dispersion chromatique additionnel.

3.1.1.3 temps de propagation de groupe différentiel ($[\delta\tau(\nu)] = \text{ps}$): le temps de propagation de groupe différentiel (DGD) est la différence des temps de propagation de groupe des états PSP.

NOTE – Le temps DGD entre deux modes dépend de la longueur d'onde et peut varier en raison des conditions ambiantes. Des variations de 1 à 10 sont courantes. La distribution statistique des temps DGD est déterminée par la longueur moyenne (h) de couplage de modes de polarisation, la biréfringence de mode moyenne ainsi que le degré de cohérence de la source. Pour une longueur L de câble à fibres optiques standard nettement plus grande que h , ce qui est généralement le cas dans la pratique, se produit un fort couplage des modes de polarisation. Dans un tel cas, la distribution de probabilité des temps DGD est une distribution de Maxwell.

3.1.1.4 retard dû à la dispersion modale de polarisation: on estime que les trois définitions suivantes du retard dû à la PMD sont équivalentes dans les limites de la reproductibilité des mesures de tous les cas de la pratique.

Le retard P_s dû à la dispersion PMD du deuxième moment est défini comme étant deux fois l'écart quadratique moyen (2σ) de la distribution temporelle $I(t)$ de l'intensité lumineuse à la sortie de la fibre, diminuée de la contribution à la dispersion chromatique, lorsqu'une brève impulsion est injectée dans la fibre, autrement dit:

$$P_s = 2 \left(\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{\int I(t)t^2 dt}{\int I(t)dt} - \left(\frac{\int I(t)t dt}{\int I(t)dt} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3-1)$$

où t est l'instant d'arrivée à la sortie de la fibre.

NOTE 1 – Dans la pratique, la largeur de l'impulsion injectée et l'élargissement dû à la dispersion chromatique doivent être déconvolués pour obtenir P_s . Pour les détails, se référer à la méthode de test interférométrique de la dispersion PMD, au § 5.1.3.

Le temps de propagation de groupe différentiel moyen P_m est le temps de propagation de groupe différentiel $\delta\tau(\nu)$ entre les états de polarisation principaux moyennés sur l'intervalle fréquentiel optique (ν_1, ν_2):

$$P_m = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu) c \nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (3-2)$$

NOTE 2 – Une variante acceptable à l'intégration sur la fréquence est d'intégrer sur une perturbation thermique, temporelle ou mécanique.

Le temps de propagation différentiel quadratique moyen P_r est défini comme étant:

$$P_r = \left(\frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

3.1.1.5 Coefficient de dispersion modale de polarisation: on distinguera deux cas:

– le couplage modal faible (fibres courtes):

$$PMD_c [ps/km] = P_s / L, P_m / L, \text{ ou } P_r / L \quad (3-4)$$

– le couplage modal fort (fibres longues):

$$PMD_c [ps/\sqrt{km}] = P_s / \sqrt{L}, P_m / \sqrt{L}, \text{ ou } P_r / \sqrt{L} \quad (3-5)$$

NOTE – Le couplage modal fort est le plus souvent observé dans les câbles installés, d'une longueur supérieure à 2 km. En conditions normales, les temps de propagation de groupe différentiels sont des fonctions aléatoires de la longueur d'onde optique ou du temps, et varient aléatoirement d'une fibre à l'autre. Pour cette raison, dans la plupart des cas, il faut calculer le coefficient PMD au moyen de la formule de la racine carrée (3-5).

Les fibres à forte biréfringence ne présentent pas de distribution statistique des temps DGD étant donné que le couplage modal est pratiquement nul ou très faible. Généralement, les temps DGD sont constants.

Toutefois, on observe parfois un couplage intermédiaire sur les câbles installés. Une classification exacte est à l'étude.

Pour évaluer l'effet sur la performance du système, il faut déterminer si les temps DGD sont constants ou s'ils présentent une distribution statistique.

Les valeurs instantanées des temps DGD limitent la capacité de transmission des systèmes numériques. La dérivée du temps DGD par rapport à la longueur d'onde limite le rapport signal/bruit dans les systèmes analogiques. Pour cette raison, la distribution statistique des temps DGD (par rapport au temps et/ou par rapport à la longueur d'onde) joue un rôle important dans la prévision de la performance réelle du système.

3.2 Types de méthodes de test

3.2.1 méthode de test de référence (RTM, *reference test method*): méthode de test dans laquelle une caractéristique d'une classe spécifiée de fibres optiques ou de câbles à fibres optiques est mesurée d'une manière strictement conforme à la définition de cette caractéristique et qui donne des résultats précis, reproductibles et utilisables dans la pratique.

3.2.2 méthode de test alternative (ATM, *alternative test method*): méthode de test dans laquelle une caractéristique donnée d'une classe spécifiée de fibres optiques ou de câbles à fibres optiques est mesurée d'une manière cohérente avec la définition de cette caractéristique et qui donne des résultats reproductibles, comparables à ceux obtenus par la méthode de référence et utilisables dans la pratique.

4 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

ATM	méthode de test alternative (<i>alternative test method</i>)
DGD	temps de propagation de groupe différentiel (<i>differential group delay</i>)
DWDM	multiplexage par répartition en longueur d'onde à haute densité (<i>dense wavelength division multiplexing</i>)
ECL	laser à cavité externe (<i>external cavity laser</i>)
FWHM	largeur spectrale à mi-hauteur (<i>full width at half maximum</i>)
GPa	gigaPascal
LD	diode laser (<i>laser diode</i>)
LED	diode électroluminescente (<i>light emitting diode</i>)
MFD	diamètre de champ de mode (<i>mode field diameter</i>)
NFP	diagramme de champ proche (<i>near-field pattern</i>)
OTDR	réflecteur optique temporel (<i>optical time domain reflectometer</i>)
PMD	dispersion modale de polarisation (<i>polarization mode dispersion</i>)
PS	sphère de Poincaré (<i>Poincaré sphere</i>)
PSP	états principaux de polarisation (<i>principal state of polarization</i>)
RTM	méthode de test de référence (<i>reference test method</i>)
SOP	état de polarisation (<i>state of polarization</i>)
TBD	à déterminer (<i>to be determined</i>)
WDM	multiplexage par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplexing</i>)

5 Méthodes de mesure

On spécifie en général la méthode de test de référence (RTM, *reference test method*) ainsi que les autres méthodes possibles (ATM) pour chaque paramètre, les deux types de méthodes étant censés être applicables aux opérations normales de recette de produits. Toutefois, si avec une autre méthode, on constate la moindre incohérence, il est recommandé d'employer la méthode de référence pour obtenir les résultats de mesure définitifs.

NOTE – L'équipement et la procédure indiqués permettent d'obtenir seulement les caractéristiques de base essentielles des méthodes de test. On admet que l'instrumentation offrira toutes les dispositions nécessaires pour assurer la stabilité, l'élimination du bruit, le rapport signal/bruit, etc.

5.1 Méthodes de test par mesure de la dispersion modale de polarisation

5.1.1 Méthode de test de référence: technique d'évaluation du paramètre de Stokes

5.1.1.1 Généralités

La présente méthode d'essai décrit une procédure de mesure de la dispersion modale de polarisation (PMD) pour des fibres optiques monomodes. La variation de l'état de polarisation de sortie en fonction de la longueur d'onde est indiquée. Cette variation peut être caractérisée par l'analyse de la matrice caractéristique de Jones (JME, *Jones matrix eigenanalysis*) ou par la rotation du vecteur d'état de polarisation sur la sphère de Poincaré (PS, *Poincaré sphere*). La méthode peut s'appliquer tant aux fibres courtes qu'aux fibres longues, indépendamment du niveau de couplage du mode de polarisation. Dans un certain nombre de cas, il peut être nécessaire de répéter les mesures afin d'obtenir une précision satisfaisante. Cette méthode est limitée aux longueurs d'onde supérieures ou égales à la longueur d'onde où la fibre est réellement monomode.

Pour le cas d'un fort couplage de mode, une analyse plus exhaustive de la méthode de la sphère de Poincaré est en cours d'étude.

Lors de la mesure de fibres en mouvement (par exemple des fibres en OPGW), la méthode interférométrique constituerait un meilleur choix pour la fonction contentieuse de la méthode de test de référence (RTM).

5.1.1.2 Montage de test

Le schéma d'un équipement type de mesure est représenté à la Figure 1.

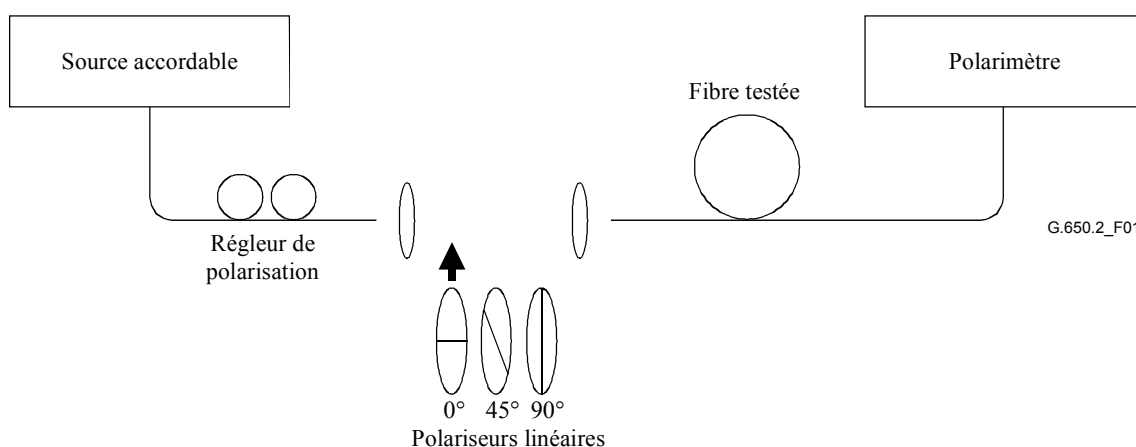


Figure 1/G.650.2 – Schéma d'un montage type d'essai

5.1.1.2.1 Source lumineuse

On utilise un laser monochromatique ou une source lumineuse à bande étroite pouvant être réglée sur toute la gamme de longueurs d'onde de mesure envisagées. La distribution spectrale sera suffisamment étroite pour que la lumière émergente de la fibre testée reste polarisée dans toutes les conditions de mesure. Il est préférable d'avoir un degré de polarisation (DOP, *degree of polarization*) de 90% ou plus grand, mais les mesures faites avec des valeurs atteignant à peine 25% sont possibles moyennant une précision réduite. Pour une valeur donnée du temps de propagation de groupe différentiel $\Delta\tau$, le degré de polarisation le plus faible susceptible d'apparaître est donné par:

$$DOP = 100 e^{-\frac{1}{4 \ln 2} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda_{FWHM}}{\lambda_0^2} \right)^2} \quad (5-1)$$

en prenant pour hypothèse un spectre de Gauss de $\Delta\lambda_{FWHM}$ de large centré à λ_0 . Le DOP est exprimé en pour cent.

5.1.1.2.2 Régleur de polarisation

Le laser est suivi d'un régleur de polarisation prévu pour donner aux polariseurs une lumière à polarisation à peu près circulaire, de telle manière que ceux-ci n'ont jamais de polarisation croisée avec leur lumière d'entrée. Le réglage de la polarisation s'effectue comme suit: on règle la longueur d'onde du laser sur le centre de la gamme à étudier, on introduit chacun des trois polariseurs dans le faisceau et on effectue les trois mesures de puissance correspondantes à la sortie du polariseur. On règle la polarisation de la source au moyen du régleur de telle manière que les trois puissances se maintiennent à 3 dB près l'un de l'autre. Dans une version du montage à faisceau ouvert, le réglage de la polarisation peut être fait au moyen d'une plaque polarisante.

5.1.1.2.3 Polariseurs

Trois polariseurs linéaires sont disposés à des angles relatifs d'environ 45 degrés pour être introduits tour à tour dans le faisceau lumineux. Les angles relatifs réels seront connus.

5.1.1.2.4 Optique d'entrée

Pour exciter la fibre testée, on utilisera un système optique ou une amorce de fibre monomode.

5.1.1.2.5 Amorce de fibre

Lorsqu'on utilise des amorces de fibre, il convient d'éviter l'effet d'interférence dû aux réflexions. Pour cela, il faut éventuellement utiliser des matériaux dont les indices sont compatibles ou un couplage en biseau. Les amorces de fibre doivent être monomodes.

5.1.1.2.6 Système optique

Lorsqu'on utilise un système optique, il convient de fixer fermement l'extrémité d'entrée de la fibre par un moyen approprié tel qu'un mandrin à dépression.

5.1.1.2.7 Suppresseur de mode de gaine

Il convient de supprimer de la fibre tout rayonnement en mode de gaine. Dans la plupart des cas, cette fonction sera assurée par le revêtement de la fibre; si tel n'est pas le cas, on utilisera un dispositif qui extrait le rayonnement en mode de gaine.

5.1.1.2.8 Optique de sortie

Cette optique sert à coupler toute la puissance optique transmise par la fibre au polarimètre. On pourrait utiliser un système optique avec lentilles, une épissure d'extrémité avec une amorce de fibre monomode ou un couplage direct avec adaptation d'indice avec le système détecteur.

5.1.1.2.9 Polarimètre

On utilisera un polarimètre pour mesurer les trois états de sortie de la polarisation correspondant à l'insertion de chacun des trois polariseurs. La gamme de longueurs d'onde du polarimètre englobera les longueurs d'onde produites par la source lumineuse.

5.1.1.3 Procédure de mesure

L'échantillon testé sera une fibre optique monomode de longueur connue, câblée ou non. L'échantillon et les amorces seront maintenus en position à une température constante nominale tout au long de la mesure. La stabilité de la température du dispositif de mesure peut être contrôlée en visualisant l'état de sortie de la polarisation de la fibre sur une sphère de Poincaré. Dans un intervalle de temps correspondant à une paire de mesures consécutives avec la matrice de Jones, les changements de polarisation à la sortie doivent être petits par rapport aux changements produits par une augmentation de la longueur d'onde.

NOTE – L'échantillon est généralement une fibre, mais le test peut également être effectué sur des composants discrets. Dans ce cas, le coefficient de PMD n'entre pas en ligne de compte.

Lorsqu'il est important de réduire autant que possible le couplage d'autres modes, la fibre non câblée devra être fixée (généralement sur un touret dont le rayon d'enroulement minimal sera de 150 mm) avec une tension pratiquement nulle (généralement inférieure à 15 g).

On peut utiliser des configurations différentes (la fibre enroulée sur un touret de transport, par exemple) s'il a été démontré qu'elles donnent des résultats comparables.

Coupler la source lumineuse au polariseur en passant par le régleur de polarisation.

Coupler la sortie des polariseurs à l'entrée de la fibre testée.

Coupler la sortie de la fibre testée à l'entrée du polarimètre.

Sélectionner ensuite l'intervalle de longueurs d'onde $\Delta\lambda$ sur lequel seront faites les mesures avec la matrice de Jones. La valeur maximale acceptable de $\Delta\lambda$ (au voisinage de λ_0) est fixée par l'équation:

$$\Delta\tau_{\max}\Delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (5-2)$$

où $\Delta\tau_{\max}$ est le temps de propagation de groupe différentiel (DGD) maximal attendu dans la gamme de longueurs d'onde de mesure. Par exemple, le produit du temps DGD maximal et de l'intervalle de longueur d'onde restera inférieur à 4 ps.nm à 1550 nm et inférieur à 2,8 ps.nm à 1300 nm. Cette condition assure que, d'une longueur de test à la suivante, l'état de sortie de la polarisation sera inférieur à 180 degrés sur l'axe principal de la sphère de Poincaré. Si l'on ne peut faire une estimation grossière de $\Delta\tau_{\max}$, effectuer une série de mesures échantillon sur la gamme de longueurs d'onde, chaque mesure faisant appel à une paire de longueurs d'onde étroitement espacées, adaptée à la largeur spectrale et à l'échelon d'accord minimal de la source optique. Multiplier le temps DGD maximal mesuré de cette manière par un facteur de sécurité de trois, substituer cette valeur à $\Delta\tau_{\max}$ dans l'expression ci-dessus, et calculer enfin la valeur de $\Delta\lambda$ qui sera utilisée dans la mesure proprement dite. Si on estime que l'intervalle de longueur d'onde utilisé pour une mesure est trop grand, on pourra répéter la mesure avec un intervalle plus petit. Si la forme de la courbe du temps DGD en fonction de la longueur d'onde et le temps DGD moyen sont pratiquement les mêmes, cela indique que l'intervalle de longueur d'onde initial est satisfaisant.

Rassembler toutes les données de mesure. Pour une longueur d'onde sélectionnée, introduire chacun des polariseurs et consigner les paramètres de Stokes correspondants sur le polarimètre.

5.1.1.4 Calculs et interprétation des résultats

Il y a deux manières (JME et PS) d'analyser les paramètres de Stokes qui ont été mesurés au § 5.1.1.3.

5.1.1.4.1 Analyse caractéristique de la matrice de Jones

5.1.1.4.1.1 Calculs

A partir des paramètres de Stokes, calculer la matrice de Jones de réponse pour chaque longueur d'onde. Pour chaque intervalle de longueur d'onde, calculer le produit de la matrice de Jones $\mathbf{T}(\omega + \Delta\omega)$ à la fréquence optique supérieure et la matrice de Jones inverse $\mathbf{T}^{-1}(\omega)$ à la fréquence optique inférieure. La pulsation optique ω est exprimée en radians par seconde; elle est liée à la fréquence optique ν par $\omega = 2\pi\nu$. Calculer le temps $\Delta\tau$ du temps DGD pour l'intervalle de longueur d'onde donné à partir de l'équation:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right| \quad (5-3)$$

où ρ_1 et ρ_2 sont les valeurs propres complexes de $\mathbf{T}(\omega + \Delta\omega) \mathbf{T}^{-1}(\omega)$ et Arg représente la fonction argument, autrement dit $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$. Pour l'analyse des données, prendre chaque valeur de temps DGD pour représenter le temps de propagation de groupe différentiel au point milieu de l'intervalle de longueur d'onde correspondant. La série de valeurs de temps DGD obtenues à partir d'une série d'intervalles de longueurs d'onde sur une gamme de longueurs d'onde représente une seule mesure.

5.1.1.4.1.2 Affichage du temps DGD en fonction de la longueur d'onde

Les données peuvent être représentées sous forme de courbe x-y, avec le temps DGD en ordonnée et la longueur d'onde en abscisse, comme indiqué à la Figure 2. Elles peuvent également être représentées au moyen d'un histogramme, comme le montre la Figure 3.

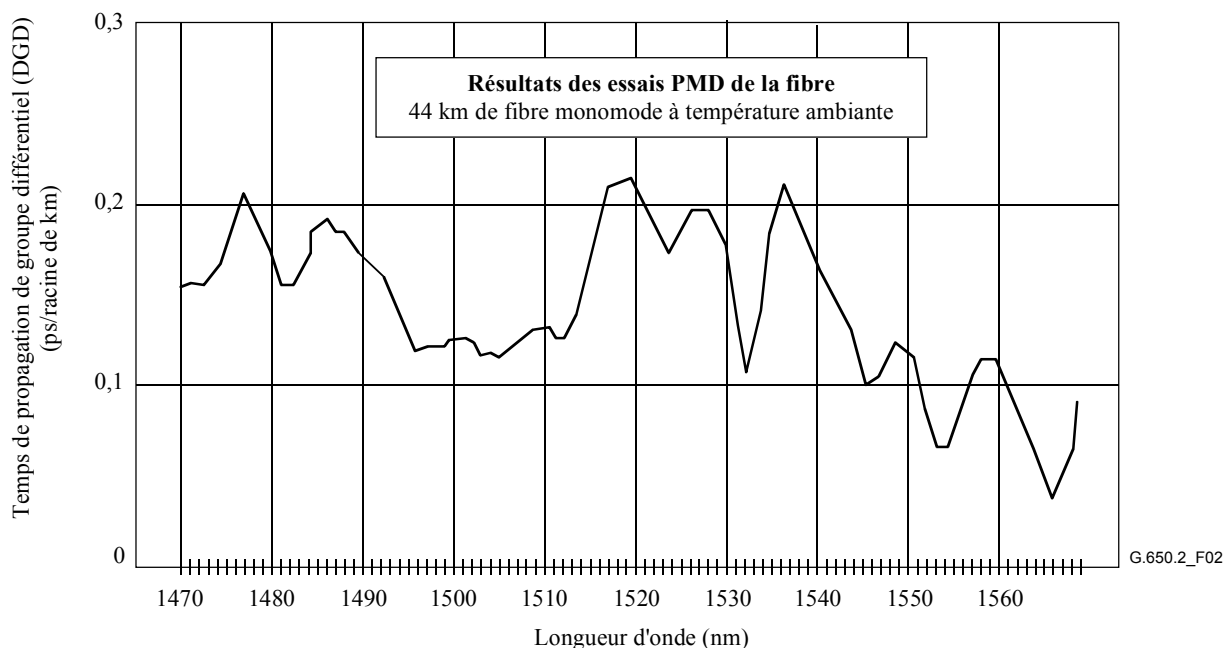
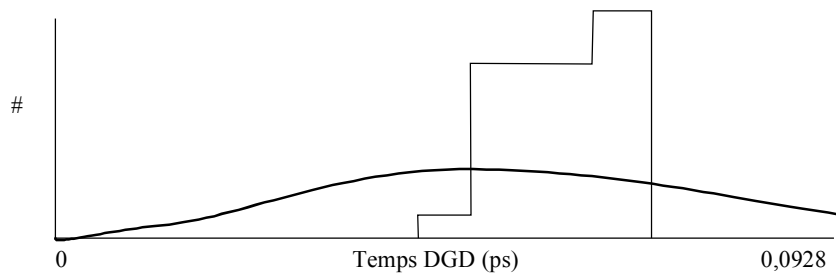
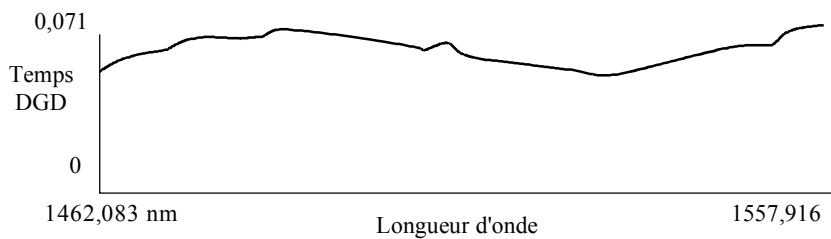
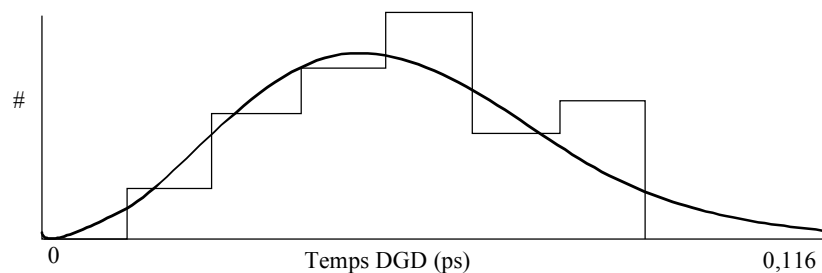
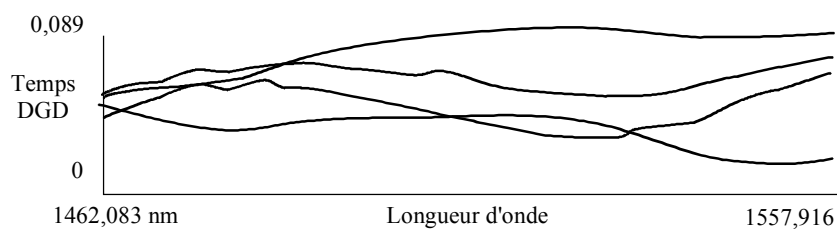


Figure 2/G.650.2 – Temps de propagation de groupe différentiel (DGD) mesuré sur 44 km de fibre monomode



a) Mesure unique sur 24 intervalles d'une fibre bobinée



G.650.2_F03

b) Mesures sur 24 intervalles sur la même bobine effectuées à différentes températures d'étuve

Une courbe de Maxwell est superposée à chaque histogramme. Les courbes du temps DGD mesuré en fonction de la longueur d'onde sont données pour référence.

Figure 3/G.650.2 – Exemples de données de temps DGD présentées sous forme d'histogramme

5.1.1.4.1.3 Temps DGD moyen

La valeur de temps PMD $\langle \Delta\tau \rangle_\lambda$ du temps DGD obtenu à partir d'une seule mesure est simplement la moyenne des valeurs de temps DGD mesurées correspondant aux intervalles de longueur d'onde. Si l'on effectue plusieurs mesures dans des conditions différentes pour augmenter la taille de l'échantillon, il faut utiliser la moyenne de l'ensemble.

5.1.1.4.1.4 Coefficient de retard dû à la dispersion modale de polarisation (PMD, *polarization mode dispersion*)

Le retard dû à la dispersion PMD peut être exprimé en termes de coefficient PMD pour une fibre courte ou une fibre longue selon le type de couplage des modes de la fibre. En l'absence d'un tel couplage, on utilisera le coefficient "fibre courte" donné dans l'équation (3-4). Pour les fibres à couplage de modes aléatoire, on utilisera le coefficient "fibre longue" donné dans l'équation (3-5).

Si l'écart type de $\Delta\tau$ sur la gamme de longueurs d'onde de mesure est inférieur à $1/10^\circ$ de la moyenne, on considère que la fibre testée présente un couplage de modes négligeable (il s'agit alors d'un dispositif "déterministe") et le retard dû à la dispersion PMD peut être exprimé au moyen du coefficient PMD "fibre courte" $\langle \Delta\tau \rangle/L$.

5.1.1.4.2 Méthode de la sphère de Poincaré (PS)

a) La trace sur la sphère de Poincaré qui décrit l'évolution de l'état de polarisation (SOP, *state of polarization*) en fonction de la longueur d'onde sera reconstruite à partir des mesures faites sur les paramètres de Stokes (S_0, S_1, S_2 et S_3). S_0, S_1, S_2 et S_3 correspondent respectivement à la puissance optique totale, l'état de polarisation rectiligne 0° , l'état de polarisation rectiligne 45° et l'état de polarisation circulaire droite. Dans la Figure 4, (o) et (●) sont des arcs d'état SOP des valeurs mesurées de PMD en fonction de la longueur d'onde λ . Dans ce cas, P_{a-a} est l'état de polarisation principal (PSP, *states of polarization*).

La trace sera analysée progressivement, compte tenu des intervalles de longueur d'onde (qui peuvent comprendre plus de deux pas de longueur d'onde), de telle manière que les hypothèses assurant l'existence d'états PSP bien déterminés soient vraies. L'axe local des PSP sur la sphère de Poincaré et l'angle de rotation correspondant $\Delta\Phi$ causé par la variation de longueur d'onde considérée $\Delta\lambda$ sont ensuite déterminés au moyen de considérations géométriques simples. Une procédure possible serait l'analyse de la trace sur la sphère de Poincaré en considérant les points mesurés trois par trois et en déterminant le point d'intersection des axes des segments identifiés par deux paires de points. A partir de ce point, il est possible de calculer la valeur de $\Delta\Phi$ au moyen de relations trigonométriques.

Le temps DGD ou le retard PMD ($\delta\tau$) est donné par:

$$\delta\tau = \frac{\Delta\Phi}{2\pi\Delta f} = \frac{\Delta\Phi\lambda_1\lambda_n}{2\pi c\Delta\lambda} \quad (5-4)$$

où $\Delta\Phi$, Δf et c sont respectivement la différence de phase (arc de vecteur de Stokes sur la sphère de Poincaré), la différence de fréquence et la vitesse de la lumière en espace libre, et où λ_1 et λ_n sont les longueurs d'onde initiale et finale de $\Delta\lambda$.

- b) Le temps DGD (en ps) sera calculé en fonction de la longueur d'onde. Les données peuvent également être visualisées sous la forme d'un histogramme obtenu en traçant la distribution des fréquences d'occurrence des valeurs de temps DGD mesurées.
- c) La valeur moyenne des temps DGD mesurés, $\langle \delta\tau \rangle_\lambda$, doit être calculée sur la gamme de longueurs d'onde considérée. Pour élargir la taille de l'échantillon, on peut effectuer plusieurs mesures.
- d) Les coefficients de dispersion PMD seront calculés par normalisation de la valeur moyenne mesurée du temps DGD $\langle \delta\tau \rangle_\lambda$ en fonction de la longueur L de la fibre (en km).

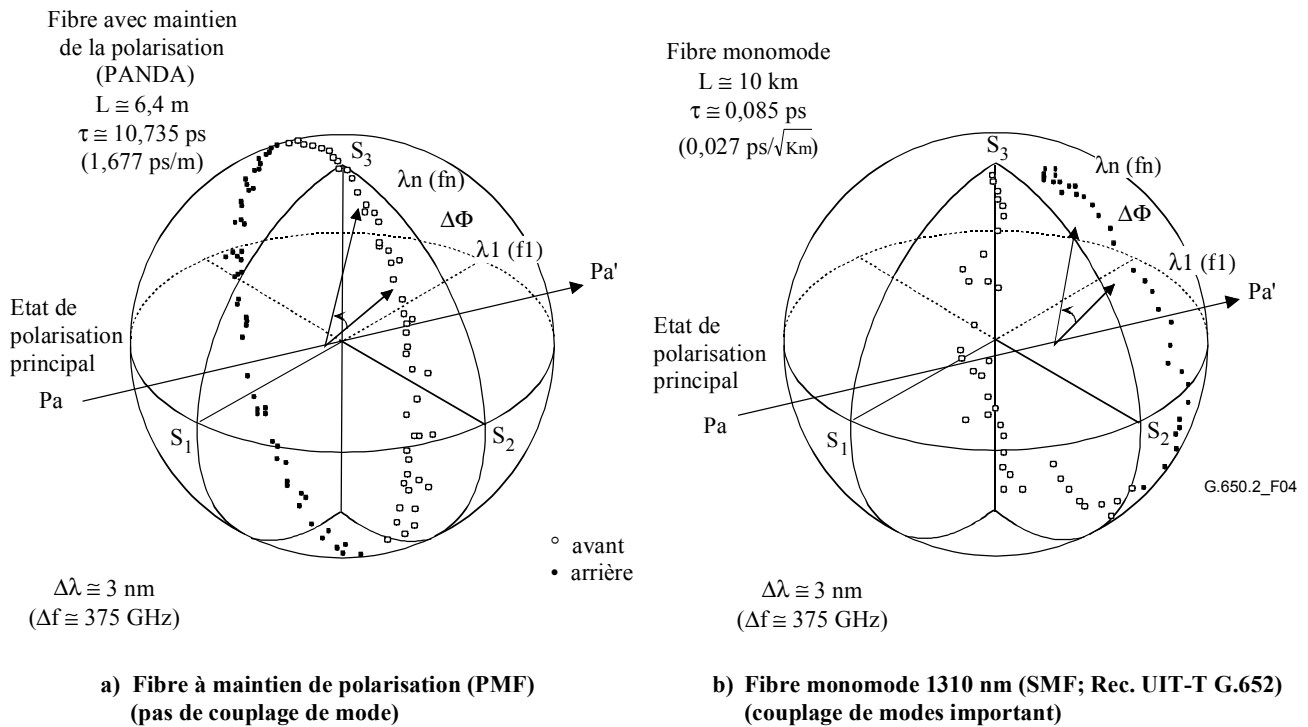


Figure 4/G.650.2 – Représentation sur la sphère de Poincaré de deux exemples de mesure de dispersion modale de polarisation

5.1.1.5 Présentation des résultats

- Identification de la fibre et/ou du câble à mesurer.
- Longueur de l'échantillon.
- La gamme des longueurs d'onde sur lesquelles les mesures ont été effectuées, la valeur du pas de longueur d'onde et le nombre de points échantillonnés.
- La configuration physique de l'échantillon de fibre ou de câble.
- Type de couplage de modes: déterministe, semi-aléatoire ou aléatoire.
- Méthode d'analyse (JME ou PS).
- Dispersion modale de polarisation, en ps. Si le degré de couplage de modes est connu, le coefficient de PMD peut être exprimé en ps/km (couplage de modes négligeable) ou en ps/km^{1/2} (couplage de modes aléatoire).
- Lorsqu'une dispersion modale de polarisation moyenne a été obtenue à partir de mesures répétées de l'échantillon, consigner le nombre de mesures effectuées.

5.1.2 Autre méthodes possible (n° 1): méthode de l'état de polarisation (SOP)

5.1.2.1 Généralités

Cette méthode est limitée à la tranche de longueur d'ondes dans laquelle la fibre est réellement monomode. On peut l'appliquer aux fibres courtes ou aux fibres longues, indépendamment du degré de couplage des modes de polarisation.

La méthode est basée sur le fait qu'en faisant varier la fréquence optique de la lumière injectée, l'état de polarisation à la sortie de la fibre, représenté sur la sphère de Poincaré dans l'espace des paramètres de Stokes, tourne autour de l'axe qui coïncide avec la direction des états PSP à une cadence qui dépend du retard associé à la PMD: plus le temps est long, plus la rotation est rapide. Pour cette raison, lorsqu'on mesure l'angle de rotation de $\Delta\theta$ du point représentatif de la sphère de

Poincaré correspondant à la variation de fréquence angulaire $\Delta\omega$, le retard associé à la PMD ($\delta\tau$) est donné par la relation:

$$\delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \right| \quad (5-5)$$

Il faut noter que si l'on excite l'un des états PSP à l'entrée, l'état de polarisation correspondant à la sortie de la fibre est inchangé, par définition, et on ne détecte aucune rotation de la sphère de Poincaré.

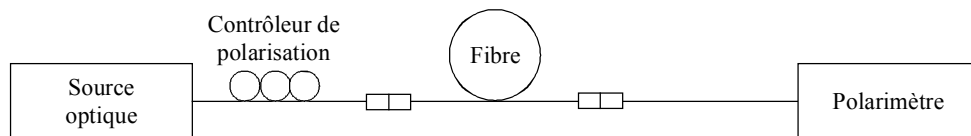
Cette technique permet d'obtenir directement les temps de propagation de groupe différentiels (DGD, *differential group delay*) entre les principaux états de polarisation de la fibre testée en fonction de la longueur d'onde ou du temps. Pour obtenir la dispersion modale de polarisation, on fait une moyenne par rapport au temps ou à la longueur d'onde, ou aux deux. La méthode permet d'obtenir des renseignements complets sur les statistiques des temps DGD.

5.1.2.2 Montage de test

Le schéma du montage de test est représenté à la Figure 5. Cette technique requiert la mesure de l'état de sortie de polarisation de la fibre pour un nombre donné de longueurs d'onde d'une gamme spectrale donnée en y injectant la lumière, l'état de polarisation étant fixe.

5.1.2.2.1 Source optique

Il convient de disposer d'un laser monochromatique stable, pouvant être accordé sur la gamme des longueurs d'onde de mesure. La largeur spectrale du laser doit être suffisamment étroite pour éviter la dépolarisation du signal consécutive à la dispersion PMD dans la fibre.



G.650.2_F05

Figure 5/G.650.2 – Schéma de l'appareil destiné aux mesures de la PMD par analyse de l'état de polarisation

5.1.2.2.2 Contrôleur de polarisation

Un contrôleur de polarisation sera placé entre la source optique et la fibre.

5.1.2.2.3 Polarimètre

Le polarimètre est destiné à mesurer les paramètres de Stokes en fonction de la longueur d'onde à la sortie de la fibre.

5.1.2.2.4 Echantillons

L'échantillon sera une fibre monomode de longueur connue, câblée ou non. L'échantillon et les amorces doivent être immobilisés à une température constante nominale pendant toute la durée de la mesure. Celle-ci se déroulera dans les conditions ambiantes normales. Pour les fibres et câbles installés, la mesure se fera dans les conditions de déploiement réelles.

Lorsqu'il est important de réduire autant que possible le couplage de modes additionnel, la fibre non câblée sera soutenue (en général sur un touret ayant un rayon d'enroulement minimal de 150 mm) avec une tension pratiquement nulle (enroulement lâche).

On pourra faire des tests dans d'autres conditions (fibre enroulée sur un touret utilisé pour le transport, par exemple) s'il a été démontré que les résultats obtenus sont comparables.

NOTE – Bien que l'échantillon soit normalement une fibre, le test peut aussi être fait sur des composants discrets. Bien évidemment, dans ce cas, la notion de PMD n'est pas applicable.

5.1.2.3 Procédure de mesure

5.1.2.3.1 Mesure

- a) La lumière sortant de la source optique traverse le contrôleur de polarisation pour ensuite être couplée à la fibre testée. Le contrôleur de polarisation est réglé de manière à optimiser les conditions de détermination de l'angle de rotation de la sphère de Poincaré, si nécessaire. Si les trajets sont en fibre, il faut immobiliser celles-ci pendant les mesures.
- b) La sortie de la fibre testée est couplée à l'entrée du polarimètre.
- c) On sélectionne la gamme de longueurs d'onde sur laquelle les mesures seront faites.
- d) On sélectionne l'échelon de longueur d'onde $\Delta\lambda$ (en nm) auquel les paramètres de Stokes doivent être mesurés. Pour éviter que l'état de polarisation de sortie (PSP) tourne de plus de 180° par rapport à l'axe des PSP sur la sphère de Poincaré en passant d'une longueur de test à la suivante, il faut que la condition $\Delta\tau_{\max}\Delta\lambda \leq 4$ ps.nm soit satisfaite, dans laquelle $\Delta\tau_{\max}$ (en ps) est le temps DGD maximal prévu de la fibre.
- e) Les valeurs mesurées des paramètres de Stokes aux longueurs d'onde sélectionnées sont enregistrées sous une forme adaptée à l'analyse ci-dessous.

5.1.2.3.2 Calculs et interprétation des résultats

Quand la variation de polarisation a été mesurée par l'analyseur de Stokes (ou analyseur rotatif), elle peut être transformée en courbe d'état de polarisation en fonction de la longueur d'onde (fréquence).

L'état de polarisation est exprimé de la manière suivante:

$$SOP = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (5-6)$$

où:

$$\eta = \tan \left[0.5 \tan^{-1} \left\{ S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right\} \right] \quad (5-7)$$

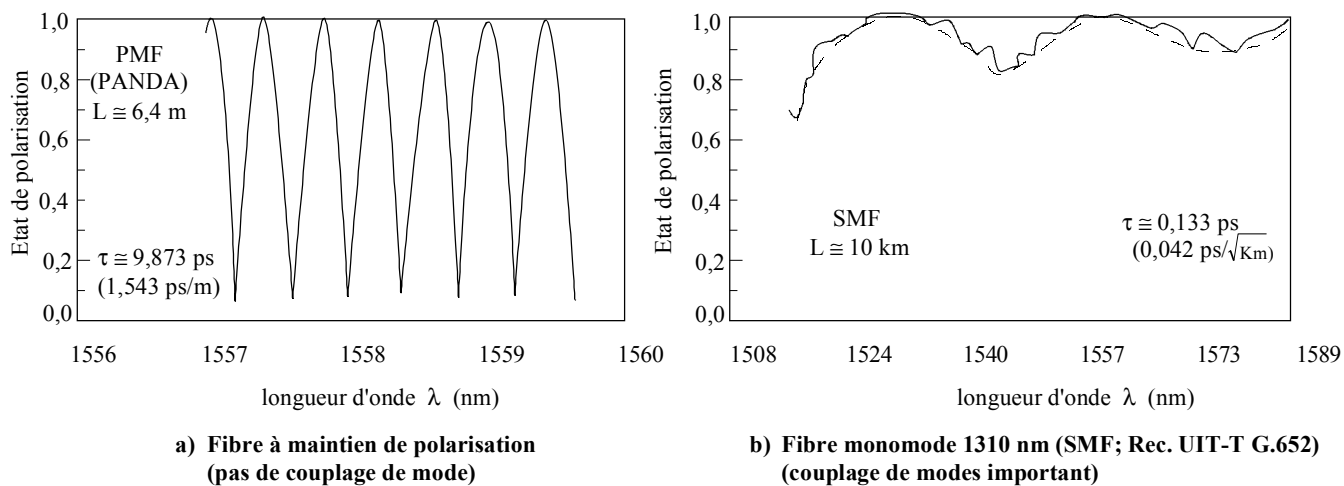
Dans le cas présent, η est l'ellipticité de polarisation. S_1 , S_2 et S_3 sont des paramètres de Stokes.

Dans la Figure 6, les valeurs crête à crête (ou les extremums) des courbes d'état de polarisation sont équivalentes à la différence de phase de π .

Le temps DGD ou PMD ($\delta\tau$) est donné par:

$$\delta\tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c \Delta\lambda} \quad (5-8)$$

où N représente le nombre d'extrema à extrema de courbes d'état de polarisation.



G.650.2_F06

Figure 6/G.650.2 – Représentation de l'état de polarisation de deux exemples de mesure de la PMD

5.1.2.4 Présentation des résultats

- Montage de test, algorithmes de traitement.
- Gamme de longueurs d'onde, échelon de longueur d'onde, nombre de points échantillonnés.
- Température de l'échantillon et conditions ambiantes.
- Identification et longueur de la fibre.
- Conditions de mise en place de la fibre.
- Indications sur la précision et reproductibilité.
- Courbe de la précision et de la reproductibilité.
- Histogramme des temps DGD mesurés en fonction de la longueur d'onde (si nécessaire).
- Temps DGD moyen.
- Coefficient PMD.

5.1.3 Autre méthode possible (n° 2): la technique interféromètre

5.1.3.1 Généralités

La présente méthode permet de mesurer la dispersion modale moyenne de polarisation des fibres et câbles optiques monomodes.

La valeur mesurée représente le retard dû à la dispersion modale de polarisation (voir la définition de la PMD) sur la gamme de longueurs d'onde étudiée qui est généralement comprise entre 60 et 80 nm dans la fenêtre de 1310 nm ou de 1550 nm, selon les spécifications de l'utilisateur.

La dispersion PMD est déterminée à partir de la fonction d'autocorrélation ou d'intercorrélation du champ électromagnétique émergeant à une extrémité de la fibre lorsque l'autre extrémité est illuminée par une source à large bande. Dans le cas d'un interféromètre à autocorrélation, l'interférogramme a un pic de cohérence central correspondant à l'autocorrélation de la source optique.

Le principal avantage de cette méthode est la rapidité de la mesure et le fait que l'équipement puisse être utilisé sur le terrain.

La dynamique et la stabilité sont obtenus par la technique bien connue de la spectroscopie à transformée de Fourier.

La fibre sera monomode dans la gamme de longueurs d'onde étudiée.

5.1.3.2 Montages de test

Diverses réalisations sont possibles. L'interféromètre peut être à trajet aérien ou à fibre, il peut être de type Michelson ou Mach-Zehnder et être situé du côté de la source ou du côté du détecteur du montage de test. Des exemples sont donnés dans les Figures 7, 8 et 9.

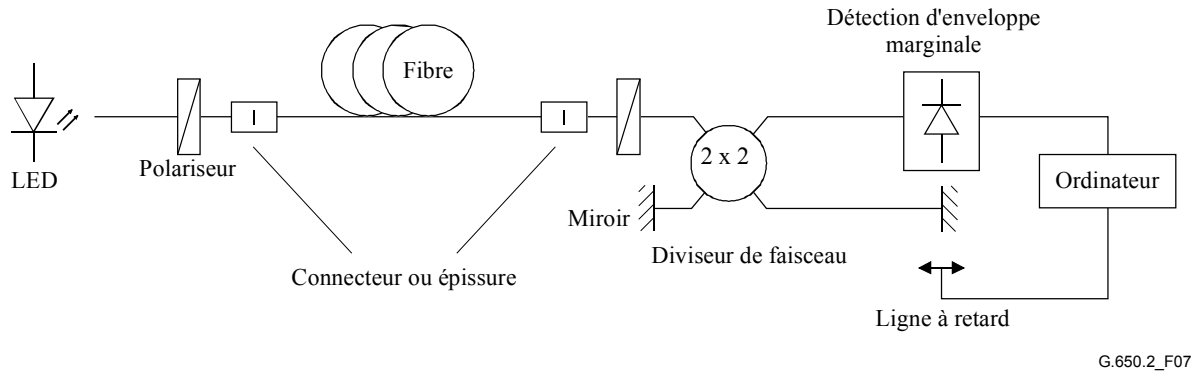


Figure 7/G.650.2 – Technique utilisant l'interféromètre de Michelson avec coupleur de fibre

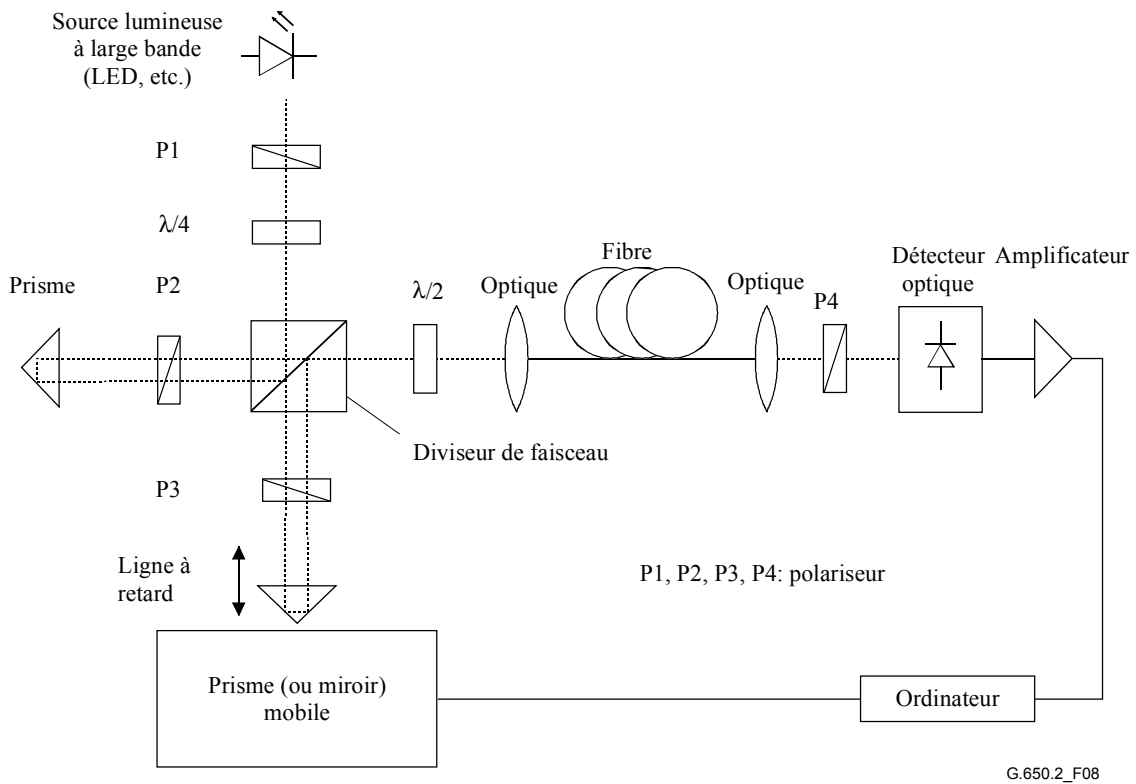
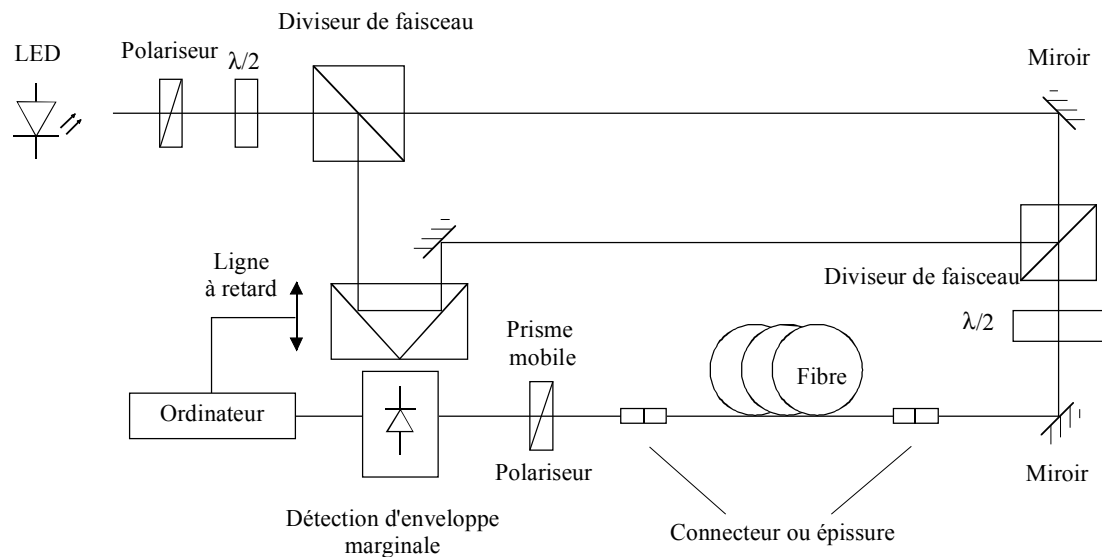


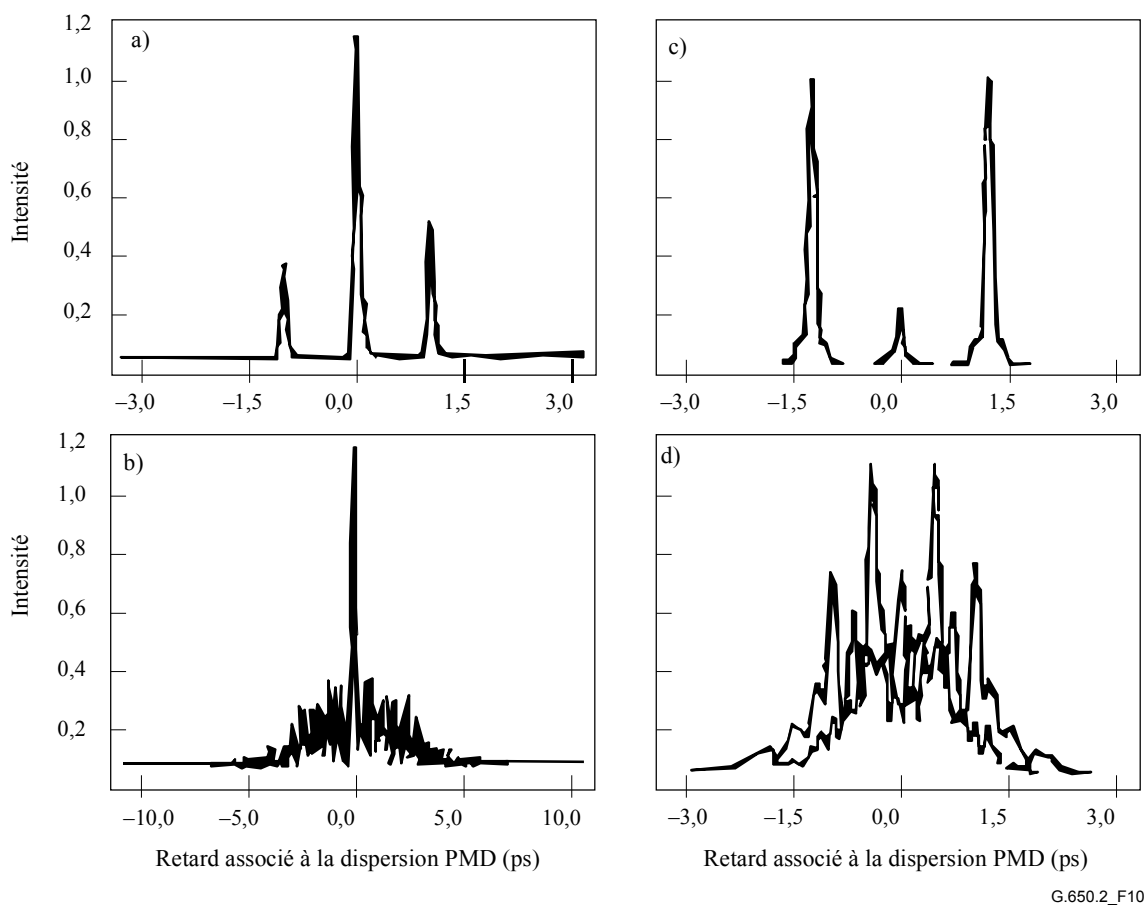
Figure 8/G.650.2 – Technique utilisant un interféromètre de Michelson avec trajet aérien



G.650.2_F09

Figure 9/G.650.2 – Technique utilisant un interféromètre de type Mach-Zehnder avec trajet aérien

NOTE – Dans un interférogramme d'autocorrélation apparaît un pic d'autocorrélation central si l'interféromètre est parfaitement réglé (par exemple Figure 10 a), b)). Les interférogrammes d'intercorrélation, quant à eux, sont obtenus lorsque les effets de la polarisation des deux bras de l'interféromètre sont tels que le pic central s'estompe (par exemple Figure 10 c), d)).



G.650.2_F10

Figure 10/G.650.2 – Exemple de configuration de franges obtenu avec un appareil à autocorrélation (a, b) à intercorrélation (c, d) dans le cas d'un couplage de modes de polarisation faible (haut) et important (bas)

5.1.3.2.1 Source optique

Il faut utiliser une source de lumière polarisée à large spectre, par exemple une LED suivie d'un polariseur. La longueur d'onde centrale de la source lumineuse se trouvera dans la fenêtre 1310 nm ou 1550 nm. La largeur de raie à mi-hauteur est généralement d'environ 60 nm. Le spectre sera approximativement gaussien, sans ondulation pouvant influencer la fonction d'autocorrélation de la lumière émergente.

5.1.3.2.2 Polariseur

Le polariseur agira sur toute la gamme de longueurs d'onde de la source.

5.1.3.2.3 Diviseur de faisceau

Le diviseur de faisceau de l'interféromètre sert à scinder le faisceau polarisé incident en deux composantes qui se propagent dans les bras de l'interféromètre. Le diviseur peut être un coupleur de fibres optiques ou un prisme.

5.1.3.2.4 Détecteur

La lumière émergent de la fibre testée est couplée à un photodétecteur dont le rapport signal/bruit est adapté à la mesure. Le système de détection peut être du type synchrone et utiliser un découpeur/amplificateur synchrone ou une autre technique équivalente.

5.1.3.2.5 Echantillons

L'échantillon testé sera une fibre monomode de longueur connue, câblée ou non. L'échantillon et les amorces doivent être immobilisés à température nominale constante pendant toute la mesure. Les conditions ambiantes standard sont assurées. Dans le cas de fibres et de câbles installés, l'essai pourra être réalisé dans les conditions réelles de déploiement.

Lorsqu'il est important de réduire autant que possible le couplage de modes additionnel, la fibre non câblée sera soutenue (en général sur un touret ayant un diamètre d'enroulement minimal de 150 mm) avec une tension pratiquement nulle (enroulement non serré).

On pourra effectuer ces mesures dans d'autres conditions (la bobine de transport de la fibre, par exemple) s'il a été démontré que des résultats comparables peuvent être obtenus.

NOTE – Bien que l'échantillon soit normalement une fibre, le test peut également porter sur des composants discrets. Bien évidemment, dans ce cas, la notion de PMD n'est pas applicable.

5.1.3.2.6 Traitement des données

On utilisera, pour l'analyse du modèle d'interférence, un ordinateur et un logiciel approprié.

5.1.3.3 Procédure de mesure

Une extrémité de la fibre testée est couplée à la sortie de la source de lumière polarisée. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de l'interféromètre comme indiqué à la Figure 7 ou la Figure 8, ou encore en détecteur à travers la lentille et le polariseur représentés à la Figure 9. Ce couplage peut être réalisé au moyen de connecteurs de fibres standards, d'épissures ou d'un système d'alignement des fibres. Dans ce dernier cas, l'utilisation d'une huile adaptatrice d'indice permet d'éviter les réflexions.

La puissance optique de sortie de la source lumineuse est ajustée à une valeur de référence caractéristique pour le système de détection. Pour obtenir un contraste de franges suffisant, la puissance optique dans les deux bras sera pratiquement identique.

Faire une première acquisition en déplaçant le miroir du bras de l'interféromètre et en consignait l'intensité lumineuse. A partir du modèle de frange obtenu pour un état donné de polarisation, on peut calculer le retard dû à la PMD comme indiqué ci-après. Un exemple type de modèle de frange pour un couplage de modes polarisé faible et élevé est montré à la Figure 10.

En cas de couplage de modes de polarisation insuffisant ou en cas de faible dispersion PMD, il est recommandé de répéter la mesure pour divers états de polarisation ou de moduler l'état de polarisation au cours de la mesure afin d'obtenir un résultat qui est une moyenne de tous les états de polarisation.

5.1.3.4 Détermination de la dispersion modale de polarisation

5.1.3.4.1 Couplage de modes faible

En cas de couplage de modes faible, le retard associé à la PMD est déterminé à partir de la séparation des deux pics de cohérence satellites séparés du centre par le temps de propagation de groupe différentiel du dispositif testé. Dans ce cas, le temps DGD est équivalent au retard associé à la PMD.

$$\Delta\tau = \frac{2\Delta L}{c} \quad (5-9)$$

où ΔL est le trajet mobile de la ligne de retard optique et c la célérité de la lumière en espace libre.

5.1.3.4.2 Couplage de modes important

En cas de couplage de modes important, le retard associé à la PMD est déterminé à partir de la largeur de l'interférogramme. Ce retard, $\Delta\tau$, dû à la PMD est déterminé à partir du paramètre de largeur, σ , de la courbe d'ajustement de Gauss pour l'interférogramme suivant:

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}}\sigma \quad (5-10)$$

NOTE – σ est l'écart type de la courbe de Gauss.

L'Appendice I contient un exemple d'algorithme pour déterminer le retard associé à la PMD ($\Delta\tau$) à partir d'un interférogramme. Comme dans la plupart des cas, le rapport de σ_e à σ est constant, on peut utiliser indifféremment l'une ou l'autre valeur. D'autres algorithmes sont possibles, à savoir ceux qui utilisent l'intégration cumulative.

Pour l'algorithme de l'Appendice I, la gamme de mesure type est de 0,1-100 ps. D'autres algorithmes peuvent élargir cette gamme.

5.1.3.5 Etalonnage de l'équipement

L'équipement est étalonné par contrôle de la mécanique de ligne à retard avec une fibre très biréfringente et un retard associé à la PMD connu. Une autre possibilité consiste à utiliser une "superfibre" dont le temps PMD est connu.

5.1.3.6 Présentation des résultats

- a) Date.
- b) Identification de la fibre.
- c) Type de fibre.
- d) Longueur de la fibre.
- e) Montage de test, y compris type de source, longueur d'onde, largeur maximale de raie (à mi-hauteur).
- f) Technique d'injection.
- g) Type de technique de détection de frange.
- h) Courbe correspondant à la gamme explorée, avec modèle de frange (uniquement lorsque le type de couplage de modes n'est pas aléatoire).
- i) Déploiement de la fibre et conditions ambiantes (rayon, tension, température, etc.).
- j) Type de couplage de modes (aléatoire, semi-aléatoire ou déterministe).
- k) Dispersion PMD en ps et coefficient de PMD. Si le degré de couplage de modes est connu, le coefficient peut être exprimé en ps/km ou ps/ $\sqrt{\text{km}}$.
- l) Autres conditions spéciales.

5.1.4 La technique de l'analyseur fixe

5.1.4.1 Généralités

Cette méthode de test permet de mesurer la dispersion modale de polarisation (PMD) de fibres optiques monomodes. Elle produit une seule valeur qui représente la dispersion PMD sur toute la gamme de longueurs d'onde de mesure, qui est généralement de quelques centaines de nanomètres. La méthode peut être appliquée aux fibres courtes ou aux fibres longues, dans les limites d'un couplage de modes de polarisation nul ou fort. Dans certaines circonstances, il sera nécessaire de répéter les mesures pour obtenir une précision satisfaisante au moyen de cette méthode. La procédure est limitée aux longueurs d'onde supérieures ou égales à celles à laquelle la fibre est réellement monomode.

5.1.4.2 Montage de test

Le schéma du montage de test type est représenté à la Figure 11.

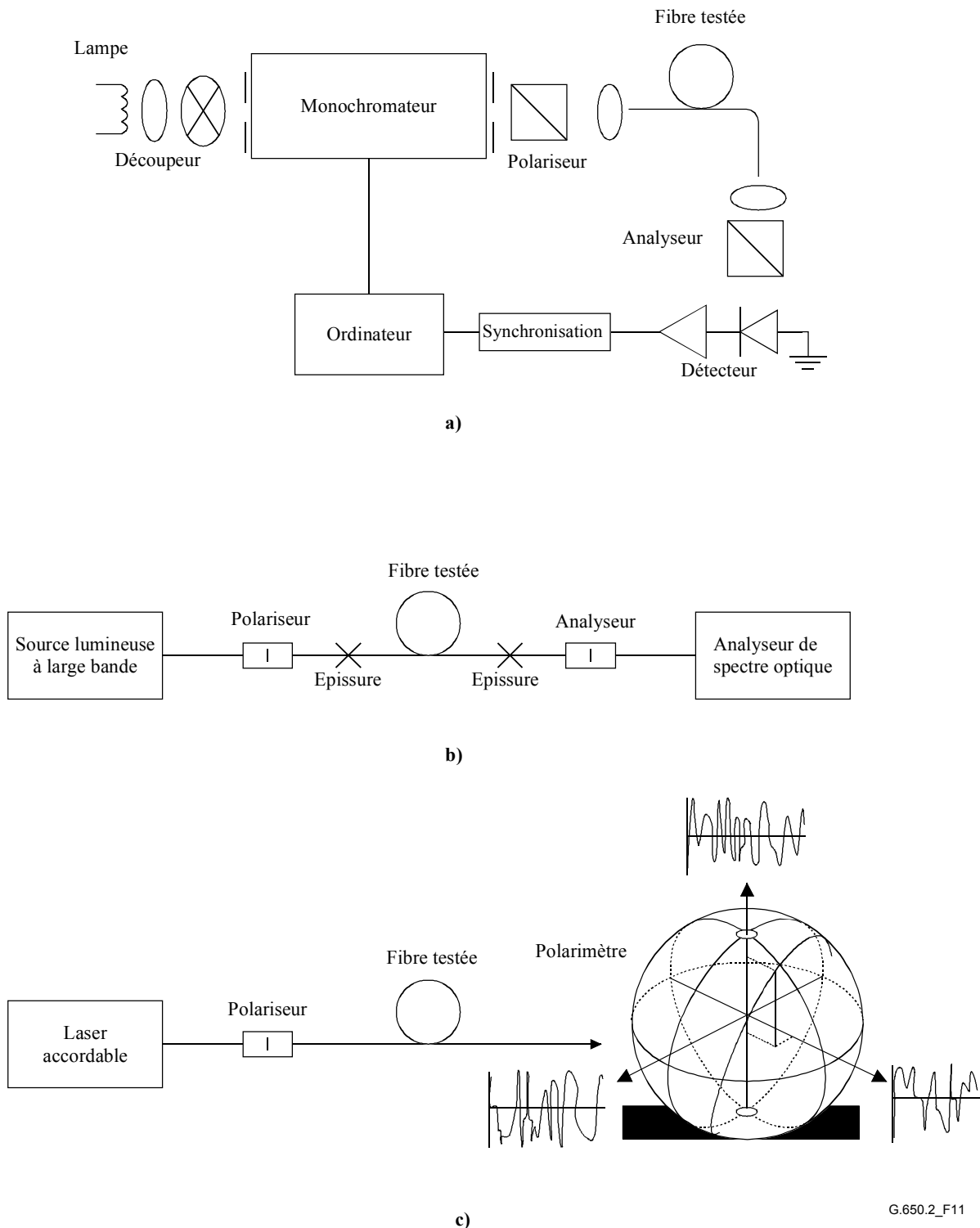


Figure 11/G.650.2 – Schéma des montages types

5.1.4.2.1 Source lumineuse

On utilise une source lumineuse qui émet un rayonnement aux longueurs d'onde de mesure envisagées, telle qu'une lampe à large bande, une ou plusieurs diodes électroluminescentes ou un ou plusieurs lasers accordables. La source lumineuse sera stable en intensité et en distribution spectrale sur une période suffisamment longue pour effectuer la mesure.

5.1.4.2.2 Monochromateur

On obtiendra un ensemble donné de longueurs d'onde de test en filtrant la source lumineuse au moyen d'un monochromateur comme celui de la Figure 11 a) ou d'un analyseur de spectre optique tel que le détecteur montré à la Figure 11 b). Ce filtrage n'est pas requis lorsqu'on utilise un laser accordable (voir la Figure 11 c)). La distribution spectrale doit être suffisamment étroite pour éviter une dépolarisation majeure du signal sous l'influence de la dispersion modale de polarisation de la fibre testée (voir § 5.1.4.4.1.4 et 5.1.4.4.2.8).

5.1.4.2.3 Optique d'entrée

On peut utiliser un système de lentilles ou une amorce de fibre monomode pour exciter la fibre testée. La puissance injectée dans la fibre sera stable pendant la durée du test. Si l'on utilise des amorces de fibre, il faut éviter les interférences dues aux réflexions. Pour cette raison, il faut éventuellement des matériaux dont les indices sont compatibles ou un couplage en biseau. Les amorces seront monomodes.

Si l'on utilise un système optique, il convient de faire appel à un moyen approprié tel qu'un mandrin à dépression pour supporter fermement l'extrémité d'entrée de la fibre.

5.1.4.2.4 Suppresseur de mode de gaine

Il faudra éliminer de la fibre tout rayonnement en mode de gaine. Dans la plupart des cas, cette fonction sera assurée par le revêtement de la fibre; mais on pourra utiliser un dispositif qui extrait ce rayonnement.

5.1.4.2.5 Optique de sortie

Tout le rayonnement émergent de la fibre doit être couplé à la région active du système de détection (voir Figure 11). On pourra par exemple utiliser: un système optique, des épissures mises bout à bout avec une amorce de fibre monomode, un raccordement direct fibre à fibre à adaptation d'indice avec le système de détection.

5.1.4.2.6 Détection du signal

Pour détecter le signal, il faut utiliser un détecteur optique linéaire, stable sur la gamme d'intensités et de durées de mesure correspondant à ce type de test. Un système type sera constitué d'un système à détection synchrone doté d'un découpeur/amplificateur synchrone, un puissance mètre optique, un analyseur de spectre optique ou un polarimètre. Afin de pouvoir utiliser la totalité de la gamme spectrale de la source, le système de détection doit avoir une gamme de longueurs d'onde qui inclut les longueurs d'onde produites par la source lumineuse.

5.1.4.2.7 Polariseur et analyseur

La présence d'un polariseur à l'entrée de la fibre (Figure 11) n'est nécessaire que si le faisceau injecté n'est pas encore polarisé (en général un rapport d'extinction de 3 dB suffit). L'orientation angulaire des polariseurs n'est pas critique, mais doit rester fixe tout au long de la mesure. Lorsque le couplage de modes est faible, quelques ajustements de l'orientation du polariseur peuvent être utiles pour maximiser l'amplitude des oscillations représentée à la Figure 12 a). On peut obtenir le même effet par rotation de la ou des fibres aux épissures ou aux connecteurs.

L'analyseur n'est pas nécessaire quand la détection du signal est faite au moyen d'un polarimètre (Figure 11 c)).

5.1.4.3 Procédure de mesure

L'échantillon testé sera une fibre optique monomode de longueur connue, câblée ou non. L'échantillon et les amorces doivent être immobilisés et à une température constante nominale, pendant toute la mesure.

NOTE – Bien que l'échantillon testé soit normalement une fibre, la mesure peut également porter sur des composants discrets. Dans ce cas, la notion de coefficient de dispersion modale de polarisation n'est pas applicable.

La stabilité de la température du dispositif de test sera connue en mesurant le rayonnement de sortie de la fibre à une longueur d'onde donnée, l'analyseur de sortie étant en place. Sur une période de temps correspondant à une mesure complète type, la variation de la puissance de sortie doit être faible par rapport aux changements produits par des augmentations de la longueur d'onde.

Lorsqu'il est important de réduire autant que possible le couplage de modes additionnel, la fibre non câblée sera soutenue (généralement par un touret de rayon minimal égal à 150 mm) avec une tension de la fibre pour ainsi dire nulle (normalement inférieure à 15 g).

D'autres manières de soutenir la fibre peuvent être utilisées (sur un touret de transport par exemple) quand il a été démontré que des résultats comparables peuvent être obtenus.

On couplera l'extrémité d'entrée de la fibre à la source lumineuse et le rayonnement de sortie de la fibre au système de détection.

Après avoir correctement réglé le monochromateur, l'analyseur de spectre optique ou le laser accordable, on injectera la lumière dans la fibre, successivement à chaque longueur d'onde λ désignée. Le choix des longueurs d'onde dépend de la gamme désignée de longueurs d'onde d'exploration et de la méthode d'analyse (voir § 5.1.4.4.1 et 5.1.4.4.2).

On enregistrera le signal de sortie pour chaque longueur d'onde. Cette procédure sera exécutée sans modification des conditions d'injection et de détection. On désignera la puissance reçue par $P_A(\lambda)$, A indiquant la présence de l'analyseur.

On retirera l'analyseur du faisceau et on recommencera l'exploration au monochromateur. On désignera la puissance reçue par $P_{TOT}(\lambda)$. On peut utiliser cette dernière pour éliminer la dépendance spectrale des éléments du système de mesure et l'affaiblissement dans la fibre testée. Des courbes typiques du rapport

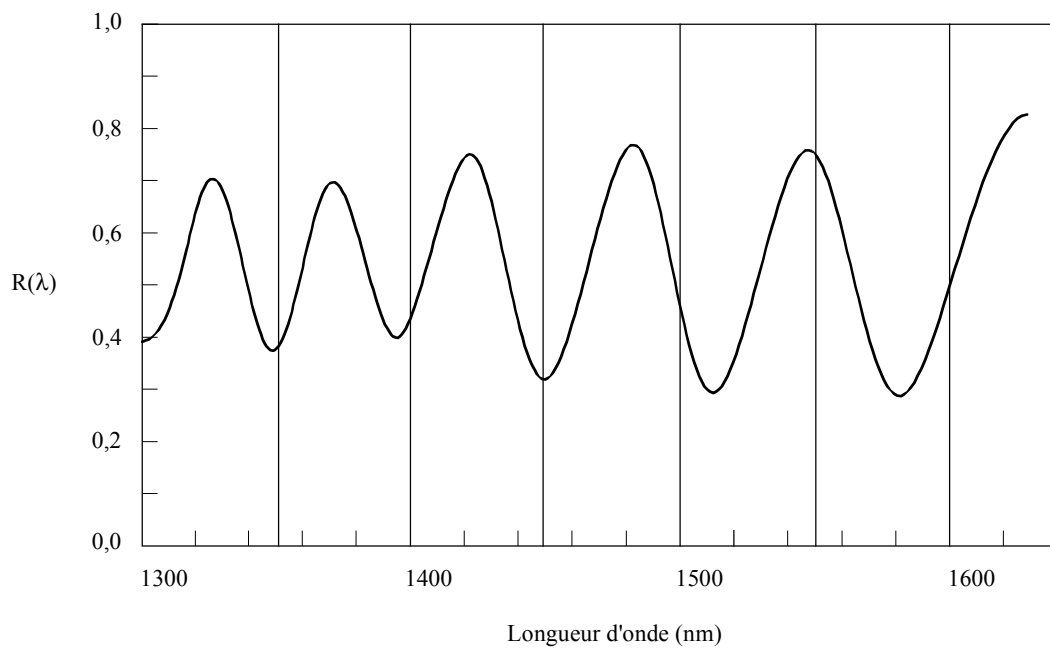
$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{TOT}(\lambda)} \quad (5-11)$$

sont représentées à la Figure 12.

Une autre procédure consiste à laisser l'analyseur en place, mais en le tournant de 90° par rapport à l'orientation utilisée ci-dessus. Dans ce cas, on désignera le rayonnement reçu $P_{ROT}(\lambda)$, où:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_{ROT}(\lambda)} \quad (5-12)$$

Si l'on utilise un polarimètre comme élément de détection, les paramètres de Stokes normalisés sont mesurés en fonction de la longueur d'onde. Les trois fonctions spectrales sont indépendantes de la puissance reçue et sont analysées par les mêmes méthodes appliquées à $R(\lambda)$ (voir § 5.1.4.4.1 et 5.1.4.4.2). Chaque paramètre de Stokes normalisé mène ensuite à une valeur de $\langle \Delta\tau \rangle$.



a) Couplage de modes faible



b) Couplage de modes fort

Figure 12/G.650.2 – Données types obtenues par mesure de la dispersion modale de polarisation

5.1.4.4 Calculs et interprétation des résultats

On utilisera l'une des deux méthodes suivantes décrites aux § 5.1.4.4.1 et 5.1.4.4.2 pour calculer la dispersion modale de polarisation à partir des données mesurées.

5.1.4.4.1 Comptage des valeurs extrêmes

5.1.4.4.1.1 Dispersion modale de polarisation

On déterminera le rapport $R(\lambda)$ à des intervalles de longueur d'onde régulièrement espacés. E est le nombre d'extremums dans la fenêtre $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$. On pourra aussi choisir λ_1 et λ_2 de manière à ce qu'ils coïncident avec les valeurs extrêmes, auquel cas E est le nombre d'extremums (y compris ceux qui coïncident avec λ_1 et λ_2) moins un.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{k E \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (5-13)$$

où c est la célérité de la lumière dans le vide, k est un facteur de couplage de modes qui est égal à 1,0 en l'absence de couplage (régime de l'équation (3-4)) et à 0,82 dans la limite d'un couplage de modes fort (régime de l'équation (3-5)).

Si l'on utilise comme élément de détection un polarimètre, il convient de prendre pour valeur finale de $\langle \Delta\tau \rangle$ la moyenne des valeurs dérivées des trois réponses au paramètre de Stokes normalisé. La valeur de $\langle \Delta\tau \rangle$ fournie par l'équation (5-13) ou la moyenne des trois valeurs de $\langle \Delta\tau \rangle$ obtenues par la détection polarimétrique peuvent s'utiliser dans l'équation (3-4) ou (3-5) (selon l'échantillon utilisé) pour calculer le coefficient de dispersion modale de polarisation. On considérera que la valeur résultante est une moyenne sur la gamme de longueurs d'onde $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$.

5.1.4.4.1.2 Précision

On obtiendra la plus grande précision en rendant $(\lambda_2 - \lambda_1)$ suffisamment grand pour que E soit nettement supérieur à 1. Cela est particulièrement important en présence d'un fort couplage de modes (Figure 12 b)) et moins important dans le cas contraire (Figure 12 a)). Les valeurs de E sont généralement comprises entre 7 et 40. Lorsque E se trouve au bas de cette fourchette, les incertitudes de pourcentage tant dans E que dans la dispersion modale de polarisation deviennent grandes. En haut de la gamme, l'élargissement instrumental peut entraîner la non-résolution de certaines crêtes adjacentes.

La fenêtre d'exploration doit théoriquement être centrée sur la longueur d'onde utilisée par la fibre et la fenêtre doit être rendue suffisamment grande pour que E soit supérieur à 10 environ pour la valeur de dispersion modale de polarisation maximale étudiée (où acceptation/refus est une conclusion).

5.1.4.4.1.3 Identification des crêtes

L'identification des extremums dans $R(\lambda)$ peut être plus difficile en présence de bruit et/ou de fort couplage de modes. C'est le cas de l'exemple de la Figure 12 b). Un algorithme présentant les caractéristiques suivantes est utile pour identifier les extremums:

- 1) un polynôme est ajusté sur plusieurs points adjacents de $R(\lambda)$ pour donner une courbe lissée;
- 2) un extremum est défini comme un point où la dérivée par rapport à la longueur d'onde de cette courbe lissée change de signe.

Cet algorithme d'identification des crêtes pourra au besoin être amélioré.

5.1.4.4.1.4 Résolution spectrale

Pour pouvoir observer les éléments du spectre optique avec une résolution suffisante, la résolution spectrale $\Delta\lambda$ devra satisfaire la condition:

$$\Delta\lambda / \lambda < (8v\Delta\tau)^{-1} \quad (5-14)$$

où ν est la fréquence optique. $\Delta\lambda$ est soit la largeur spectrale de l'instrument, soit le pas de longueur d'onde (on retiendra la valeur la plus élevée). Si la longueur d'onde λ est voisine de 1550 nm, la condition (5-14) se ramène à ce que $\Delta\lambda$ (nm) doit être inférieur à l'inverse de $\Delta\tau$ (ps).

5.1.4.4.2 Analyse de Fourier

5.1.4.4.2.1 Aperçu général

On utilise pour déterminer la dispersion modale de polarisation une analyse de Fourier de $R(\lambda)$ généralement désignée par ν dans le domaine de la fréquence optique. La transformation de Fourier fait passer ces données du domaine fréquentiel optique au domaine temporel. La transformée de Fourier donne des renseignements directs sur la distribution des instants d'arrivée $\delta\tau$ de la lumière. Ces données sont ensuite traitées comme indiqué ci-après pour déterminer la dispersion modale de polarisation attendue, $\langle\Delta\tau\rangle$, pour la fibre testée. La méthode est applicable aux fibres avec couplage de modes faible ou fort (voir § 5.1.4.4.2.4 et 5.1.4.4.2.5, respectivement).

5.1.4.4.2.2 Prétraitement des données et transformation de Fourier

Pour utiliser cette méthode, la transformation de Fourier nécessite normalement des intervalles de fréquence optique égaux afin que les données $R(\lambda)$ soient collectées (comme indiqué au § 5.1.4.3) à des valeurs λ régulièrement espacées dans le domaine des fréquences optiques. Une autre solution consiste, pour générer ces points, à ajuster (par exemple au moyen d'une fonction spline cubique) des données prises à des intervalles de longueurs d'onde égaux et à les interpoler, voire d'utiliser des techniques d'évaluation spectrale encore plus évoluées. Dans chaque cas, le rapport $R(\lambda)$ correspondant à chaque valeur λ utilisée est calculé au moyen de l'équation (5-11) ou (5-12) selon le cas.

On peut effectuer sur les données de rapport $R(\lambda)$ le remplissage par des zéros ou l'interpolation des données et l'élimination du niveau continu. Le fenêtrage des données peut également être utilisé comme étape de mise en forme préalable avant la transformée de Fourier. La transformation est ensuite exécutée pour obtenir la distribution des données d'amplitude $P(\delta\tau)$ pour chaque valeur de $\delta\tau$.

5.1.4.4.2.3 Ajustement des données de la transformée

Les données de la transformée de Fourier à zéro $\delta\tau$ n'ont guère de signification car à moins d'avoir été soigneusement éliminées, les composantes DC de $R(\lambda)$ peuvent être partiellement dues à des affaiblissements d'insertion de l'analyseur, par exemple. Quand le niveau continu n'est pas retiré, jusqu'à deux points de données sont généralement contournés (pas utilisés) dans tous les calculs subséquents. On définit une variable j de telle manière que le "premier paquet valable" au-dessus de zéro $\delta\tau$ qui est inclus dans les calculs correspond à $j = 0$.

Pour supprimer le bruit de mesure des calculs subséquents, on compare $P(\delta\tau)$ à un niveau seuil T_1 généralement fixé à 200% du niveau de bruit quadratique moyen du système de détection. Il faut ensuite déterminer si la fibre a un couplage de modes faible ou fort.

Si l'on constate que les X premiers points valables de $P(\delta\tau)$ sont tous au-dessous de T_1 , on en déduit que $P(\delta\tau)$ doit avoir des caractéristiques transitoires discrètes typiques des fibres à faible couplage. La valeur de X est trois, à moins d'utiliser le remplissage par des zéros dans l'analyse de Fourier. Dans ce cas, la valeur de X peut être déterminée à partir de $3 \cdot (\text{nombre de points de données initiaux}) / (\text{longueur totale du réseau après remplissage de zéros})$; on calcule la dispersion modale de polarisation conformément aux indications du § 5.1.4.4.2.4. Si tel n'est pas le cas, on calcule la dispersion modale de polarisation conformément au § 5.1.4.4.2.5 ou 5.1.4.4.2.6.

5.1.4.4.2.4 Calcul de la dispersion modale de polarisation des fibres à faible couplage de modes

Pour une fibre faiblement couplée (par exemple, une fibre à biréfringence élevée) ou pour un composant biréfringent, $R(\lambda)$ ressemble à une onde sinusoïdale modulée (Figure 12 a)). La transformation de Fourier donnera des résultats de $P(\delta\tau)$ contenant un pic discret situé en un point correspondant au temps relatif d'arrivée de l'impulsion, $\delta\tau$, dont le centroïde est la valeur de la dispersion modale de polarisation, soit $\langle \Delta\tau \rangle$.

Pour définir le centroïde $\langle \Delta\tau \rangle$ du pic, on utilise dans l'équation (5-15) les points pour lesquels $P(\delta\tau)$ excède un second niveau seuil T_2 prédéterminé, généralement mis à 200% du niveau de bruit quadratique moyen du système de détection:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)\delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)]} \quad (5-15)$$

où $M' + 1$ est le nombre de points de données de P faisant partie de la pointe qui dépassent T_2 . $\langle \Delta\tau \rangle$ de l'équation (5-15) est généralement exprimé en picosecondes. Si le dispositif testé est une fibre de longueur L , le coefficient de dispersion modale de polarisation peut être calculé au moyen de l'équation (3-4). Si l'on ne détecte aucun pic (c'est-à-dire que $M' = 0$), la dispersion modale de polarisation est nulle. D'autres paramètres tels que la largeur de pic quadratique moyenne et/ou la valeur crête du pic peuvent être indiqués.

Si le dispositif testé contient un ou plusieurs éléments biréfringents, le nombre de pics sera supérieur à 1. Pour un nombre n des fibres/dispositifs concaténés, on obtiendra $2^{(n-1)}$ pics.

5.1.4.4.2.5 Calcul de la dispersion modale de polarisation dans les fibres à couplage de modes important

En cas de couplage de modes important, $R(\lambda)$ a l'allure d'une onde complexe comme celle de la Figure 12 b), dont les caractéristiques exactes sont fondées sur les statistiques réelles du processus de couplage à l'intérieur de la fibre ou du câble. Les données obtenues par transformation de Fourier deviennent maintenant une distribution $P(\delta\tau)$ représentant l'autocorrélation de la distribution de probabilité des instants d'arrivée ($\delta\tau$) des impulsions lumineuses dans la fibre.

En partant de $j = 0$, on détermine le premier point de P supérieur à T_1 et qui est suivi d'au moins X points de données qui sont inférieurs à T_1 . Ce point représente le dernier point significatif dans (c'est-à-dire à l'extrémité de) la distribution $P(\delta\tau)$ pour une fibre à fort couplage de modes qui n'est pas fortement affectée par le bruit de mesure. La valeur $\delta\tau$ pour ce point est désignée par $\delta\tau_{\text{last}}$ et la valeur de j à $\delta\tau_{\text{last}}$ par M'' . Cette fibre a un couplage de modes important. La racine carrée du second moment, σ_R , de la distribution définit la dispersion modale de polarisation ($\langle \Delta\tau \rangle$) de la fibre et elle est donnée par:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)\delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{1/2} \quad (5-16)$$

La valeur $\langle \Delta\tau \rangle$ calculée au moyen de l'équation (5-16) est généralement exprimée en picosecondes. Un exemple des résultats de la transformée de Fourier obtenus dans une fibre de 25 km avec un fort couplage de modes est montré à la Figure 13.

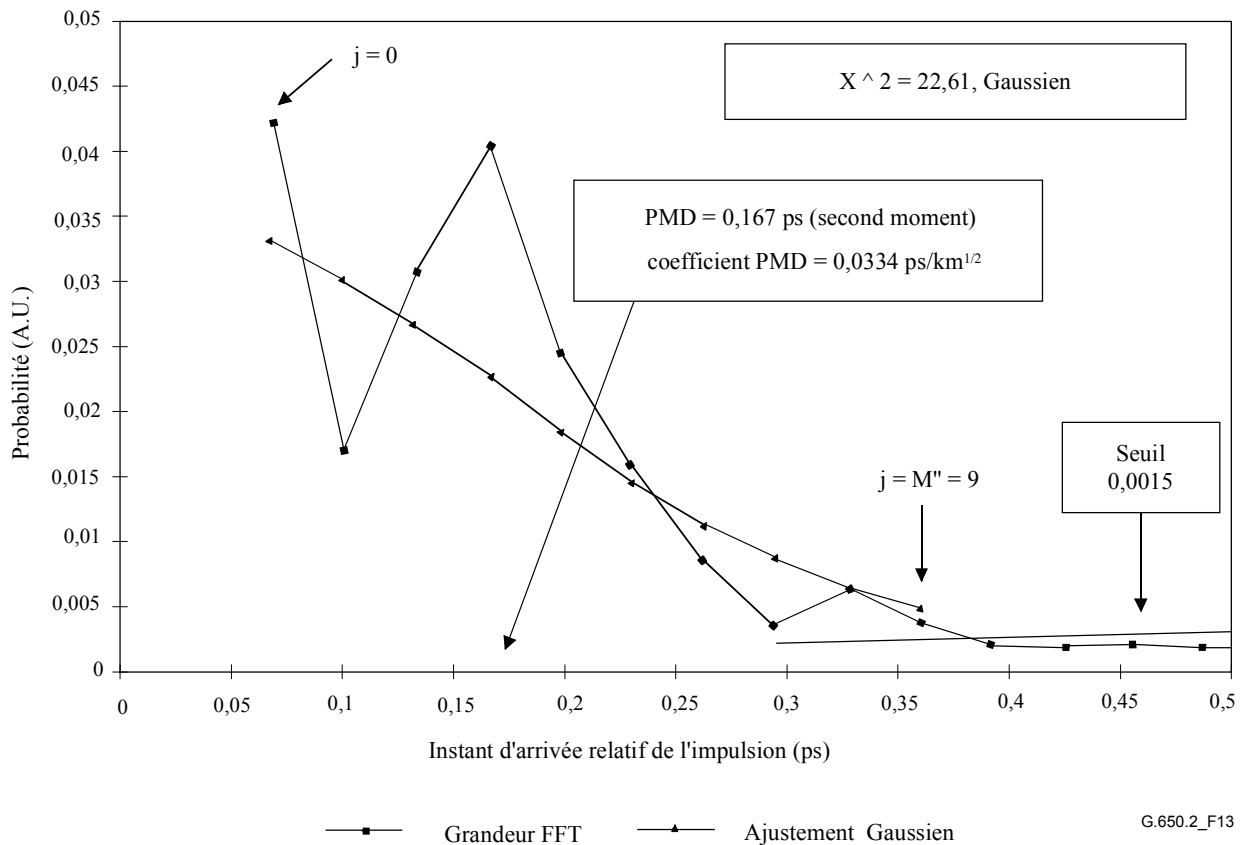


Figure 13/G.650.2 – Mesure de la dispersion modale de polarisation par analyse de Fourier

5.1.4.4.2.6 Calcul de la dispersion modale de polarisation pour les systèmes à fibres à couplage mixte

Il peut arriver que des fibres ou des composants à faible couplage et des fibres à fort couplage soient concaténées pour former le système testé. Dans ce cas, il faut à la fois déterminer le centroïde (§ 5.1.4.4.2.4) et la dérivée du second moment (§ 5.1.4.4.2.5). On notera que les pics dans $P(\delta\tau)$ ne peuvent être déterminés qu'au-delà du $\delta\tau_{\text{last}}$ calculé.

5.1.4.4.2.7 Gamme spectrale

Pour les fibres à fort couplage, il faut utiliser une gamme spectrale suffisante pour former l'ensemble spectral (moyen) avec une précision suffisante. L'incertitude statistique peut être rendue minimale si l'on utilise la gamme spectrale la plus large possible (d'au moins 200 nm par exemple). La précision requise et par conséquent la gamme spectrale doit être spécifiée avant la mesure. La gamme maximale utilisable est limitée par la longueur d'onde de coupure de la fibre (1270 nm ou au-dessous) à l'extrémité courte (λ_1) et par la baisse de sensibilité du détecteur à l'extrémité élevée (λ_2) (par exemple 1700 nm).

De plus, des valeurs de $\delta\tau$ très faibles donneront des périodes très longues dans $R(\lambda)$ et la gamme spectrale λ_1 à λ_2 doit couvrir au moins deux cycles complets. La gamme spectrale couverte définit la plus petite valeur de $\delta\tau$ qui peut être résolue dans $P(\delta\tau)$, soit $\delta\tau_{\text{min}}$:

$$\delta\tau_{\text{min}} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (5-17)$$

où le facteur 2 est introduit pour tenir compte du fait que deux points de données dans P , à zéro et adjacent à zéro, sont généralement ignorés (voir § 5.1.4.4.2.3). Par exemple, pour $\lambda_1 = 1270$ nm, $\lambda_2 = 1700$ nm et $\delta\tau_{\text{min}} = 0,033$ ps.

Pour les fibres à forte dispersion modale de polarisation et faible couplage ayant des données de rapport $R(\lambda)$ qui s'apparentent à la Figure 12 a), le critère de moyenne spectrale décrit ci-dessus peut être assoupli et la gamme spectrale réduite [par exemple $(\lambda_2 - \lambda_1) \sim 30$ nm] afin de permettre l'examen de la variation de la dispersion modale de polarisation en fonction de la longueur d'onde.

5.1.4.4.2.8 Taille des pas de longueur d'onde et résolution spectrale

Pour faire en sorte que toutes les caractéristiques (fréquences) de $R(\lambda)$ soient déterminées avec une résolution suffisante, la pas spectral du monochromateur, exprimé dans le domaine des fréquences optiques ($\Delta\nu$), doit être inférieur à la moitié de la "fréquence d'oscillation" correspondant à la valeur $\delta\tau$ maximale mesurée (condition de Nyquist):

$$\delta\tau_{\max} = 1/(2 \cdot \Delta\nu) \quad (5-18)$$

S'il apparaît clairement dans la transformée de Fourier qu'une énergie importante est présente au voisinage de $\delta\tau_{\max}$ [c'est-à-dire que $R(\lambda)$ est "replié"], il faut réduire la taille des échelons $\Delta\nu$ (si possible) et recommencer la mesure.

La largeur des raies spectrales (résolution) du monochromateur exprimée en unités de fréquence optique est généralement égale ou plus petite que la plus petite valeur $\Delta\nu$ à utiliser (correspondant à la valeur $\delta\tau$ la plus grande à mesurer).

Par exemple, pour $\delta\tau_{\max} = 1,34$ ps, la largeur des raies du monochromateur est couramment de 3 nm à 1550 nm ($\Delta\nu = 374$ GHz).

5.1.4.5 Présentation des résultats

- a) Identification de la fibre et/ou du câble à mesurer.
- b) Longueur de l'échantillon.
- c) Dispersion modale de polarisation (généralement en picosecondes). Si le degré de couplage modale est connu, le coefficient de dispersion modale de polarisation peut être exprimé en ps/km (couplage de modes négligeable) ou en ps/km^{1/2} (couplage de modes important).
- d) Gamme de longueurs d'onde sur laquelle les mesures ont été effectuées, ainsi que la taille des pas de longueur d'onde ou de fréquence.
- e) Configuration physique de l'échantillon de fibre ou de câble.
- f) Type de couplage de modes: déterministe, semi-aléatoire ou aléatoire.
- g) Nombre de mesures si la dispersion modale de polarisation moyenne a été obtenue à partir de mesures répétées sur l'échantillon.

5.2 Méthodes de test pour attributs non linéaires

(À l'étude)

Appendice I¹

Détermination du retard associé à la PMD à partir d'un interférogramme

Le présent appendice contient une méthode permettant de déterminer le retard associé à la PMD à partir d'un interférogramme avec une crête d'autocorrélation centrale, comme indiqué dans la Figure I.1.

¹ Il s'agit de l'Appendice II de la Rec. UIT-T G.650 (2000).

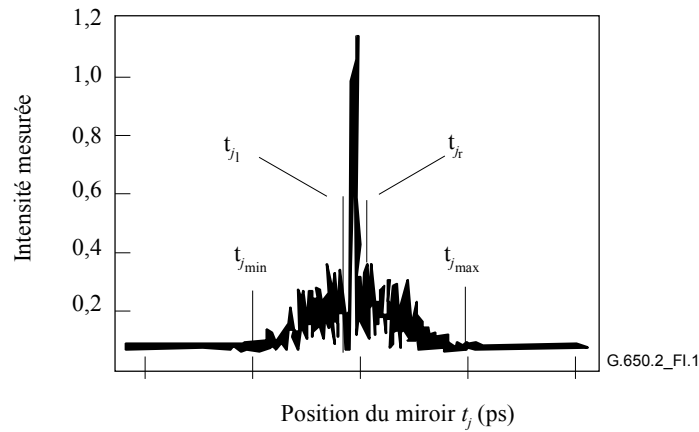


Figure I.1/G.650.2 – Paramètres pour l'analyse par interférogramme

Soit \tilde{I}_j l'intensité mesurée de l'interférogramme en des positions croissantes t_j , où $j = 1 \dots N$, avec $[t_j] = \text{ps}$.

Etape 1 – Calcul de l'intensité zéro \tilde{I}_0 et de l'amplitude de bruit Na

Définition: $N_5 = (5 N/100)$

$$\tilde{I}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j + \tilde{I}_{N-j})}{2N_5} \quad (\text{I-1})$$

$$X_2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j^2 + \tilde{I}_{N-j}^2)}{2N_5} \quad (\text{I-2})$$

$$Na = \sqrt{X_2 - \tilde{I}_0^2} \quad (\text{I-3})$$

Etape 2 – Définition de l'intensité décalée I_j

$$I_j := \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \text{ si } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 > 4Na \quad (\text{I-4})$$

$$I_j := 0 \text{ si } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \leq 4Na \quad (\text{I-5})$$

Etape 3 – Calcul du centre C de l'interférogramme

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N t_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j} \quad (\text{I-6})$$

Etape 4 – Suppression de la crête d'autocorrélation centrale

Définition: $j_l :=$ l'indice j le plus grand tel que $C - t_j > \tau_c$ (I-7)

$j_r :=$ l'indice j le plus bas tel que $t_j - C > \tau_c$ (I-8)

où τ_c est le temps de cohérence de la source.

NOTE 1 – Pour les interférogrammes d'autocorrélations, on appliquera la définition suivante:

$$j_r := j_l + 1 \quad (\text{I-9})$$

Etape 5 – Calcul du second moment S de l'interférogramme

$$S = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=1}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^N (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^N I_j}} \right\} \quad (\text{I-10})$$

Etape 6 – Troncature de l'interférogramme

Mettre j_{\min} à l'indice j le plus grand tel que $C - t_j > 2S$ (I-11)

Mettre j_{\max} à l'indice j le plus faible tel que $t_j - C > 2S$ (I-12)

Etape 7 – Calcul du second moment σ_ε de l'interférogramme tronqué

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} I_j}} \right\} \quad (\text{I-13})$$

Etape 8 – Calcul de σ du $e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}}$ de Gauss tel que

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} + \sqrt{\frac{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} \right\} \quad (\text{I-14})$$

Etape 9 – Détermination du retard dû à la PMD $\Delta\tau$

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (\text{I-15})$$

NOTE 2 – Si l'interférogramme est correctement mesuré, on peut montrer que $\frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma} \approx \sqrt{\frac{3}{4}}$.

Appendice II

Attributs non linéaires

II.1 Rappel

Des interactions non linéaires entre le signal et le support de transmission à fibre de silice commencent à apparaître quand la puissance du signal optique est augmentée dans le but d'atteindre des distances de transmission plus grandes à des débits élevés. En conséquence, le comportement non linéaire des fibres est un élément important dans les systèmes à forte capacité et les longues routes sans régénération. Ces non-linéarités peuvent généralement être classées soit comme des effets de diffusion (diffusion stimulée de Brillouin et diffusion stimulée de Raman) ou des effets liés à l'effet Kerr, c'est-à-dire la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité (modulation autophase, modulation transphase, instabilité de modulation, formation de solitons et mélange à quatre ondes). De nombreux paramètres influencent l'importance de ces effets de non-linéarité, y compris les caractéristiques de dispersion de la fibre, la surface effective de la fibre, le nombre et l'espacement des voies dans les systèmes multivoies, la longueur totale de la partie sans régénération du système, le degré d'uniformité longitudinale des caractéristiques de la fibre ainsi que l'intensité du signal et la largeur de raie spectrale de la source.

II.2 Surface effective (A_{eff})

La surface effective est un paramètre qui est étroitement lié aux non-linéarités de la fibre optique qui affecteront la qualité de transmission des systèmes à fibres optiques, surtout les systèmes à grande distance et à amplification optique.

La zone effective A_{eff} est définie de la manière suivante:

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left[\int_0^{\infty} I(r) r dr \right]}{\int_0^{\infty} I(r)^2 r dr} \quad (\text{II-1})$$

où $I(r)$ est la distribution des intensités de champ du mode fondamental de la fibre au rayon r . L'intégration de l'équation (II-1) est effectuée sur toute la section droite de la fibre. Si nous faisons, par exemple, une approximation de Gauss telle que:

$$I(r) = \exp\left(-2r^2 / W^2\right) \quad (\text{II-2})$$

où $2w$ est le diamètre du champ de mode (MFD, *mode field diameter*), alors l'équation (II-1) peut être intégrée analytiquement pour donner:

$$A_{eff} = \pi w^2 \quad (\text{II-3})$$

L'approximation de Gauss est précise pour les fibres UIT-T G.652 [1] et UIT-T G.654 [3] à saut d'indice au voisinage de la coupure LP_{11} , mais pour ces mêmes fibres à des longueurs d'onde beaucoup plus grandes, et dans le cas des fibres UIT-T G.653 [2] à dispersion décalée, A_{eff} ne peut pas être estimée avec précision avec l'équation (II-3).

Une relation plus générale mais empirique entre A_{eff} et w est²:

$$A_{eff} = k\pi w^2 \quad (\text{II-4})$$

² NAMIHIRA (Y.), Relationship between non-linear effective area and mode field diameter for dispersion shifted fibres, *Electron. Lett.*, vol. 30, N.° 3 p. 262-263, 1994.

où k est un facteur de correction.

II.3 Facteur de correction k

Dans l'expérience, le diamètre de champ de mode (MFD, *mode field diameter*) a été mesuré par la technique de test de l'ouverture variable. A partir du diagramme de champ lointain (FFP, *far-field pattern*) de la puissance optique de sortie $P(r)$, il est alors possible de calculer le diagramme de champ proche (NFP, *near-field pattern*) à l'aide d'une transformation de Hankel inverse. La surface A_{eff} est ensuite déduite de NFP à l'aide de l'équation (II-1).

Le facteur de correction k de l'équation (II-4) dépend de la longueur d'onde et des paramètres de la fibre tels que les profils d'indice de réfraction, le diamètre MFD et la longueur d'onde de dispersion nulle.

La Figure II.1 illustre des exemples (obtenus par mesure) de la dépendance de la longueur d'onde du diamètre MFD et de la surface A_{eff} pour les fibres UIT-T G.652 et UIT-T G.653 dans les régions de longueurs d'onde comprises entre 1200 nm et 1600 nm. La Figure II.2 fournit des exemples (obtenus par mesure et par calcul) de la dépendance de la longueur d'onde du diamètre MFD et de la surface A_{eff} ainsi que le facteur de correction k pour les fibres UIT-T G.652, UIT-T G.653 et UIT-T G.654 dans la même région de longueurs d'onde.

Les plages du facteur de correction k dans ces exemples sont récapitulées dans le Tableau II.1.

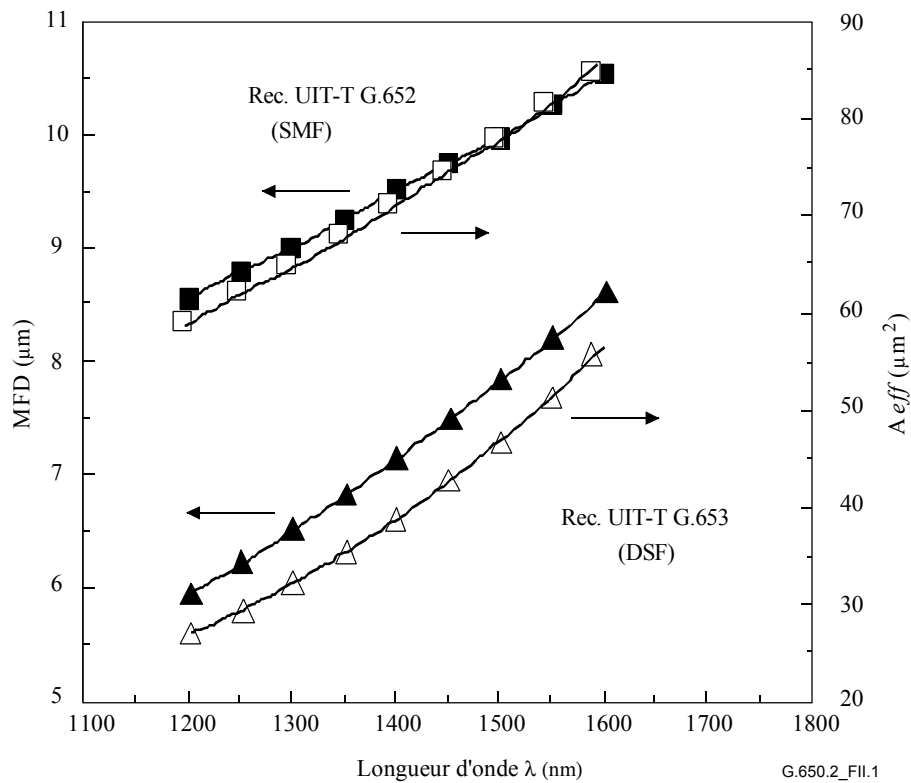
Pour d'autres conceptions de fibre qui peuvent être développées pour des applications optiques sous-marines et de WDM, la relation entre A_{eff} et w peut varier et il convient de la déterminer à l'aide de l'équation (II-1).

La Figure II.3 montre la dépendance de la longueur d'onde de A_{eff} pour les fibres UIT-T G.653 (DSF) et UIT-T G.655 (NZ-DSF) dans les régions de longueurs d'onde comprises entre 1520 nm et 1580 nm pour les applications WDM.

On a trouvé des valeurs moyennes de k et un écart type de $0,953 \pm 0,005$ pour les fibres UIT-T G.653 et de $1,09 \pm 0,070$ pour les fibres UIT-T G.655.

Tableau II.1/G.650.2 – Tableau récapitulatif des facteurs de correction k de A_{eff} et des diamètres de champ de mode ($= 2W$) pour les fibres G.652, G.653 et G.654 établi à partir des exemples de la Figure II.2

Longueur d'onde λ	~ 1310 nm	~ 1550 nm
UIT-T G.652	0,970 ~ 0,980 (Note)	0,960 ~ 0,970
UIT-T G.654	...	0,975 ~ 0,985 (Note)
UIT-T G.653	0,940 ~ 0,950	0,950 ~ 0,960 (Note)
NOTE – Région de longueur d'onde optimale.		



MFD A_{eff}
 ■ □ Rec. UIT-T G.652 (SMF) [saut d'indice]
 ▲ △ Rec. UIT-T G.653 (DSF) [sans saut d'indice]

Figure II.1/G.650.2 – Exemple de mesure de la dépendance de A_{eff} et du diamètre de champ de mode (= 2W) en fonction de la longueur d'onde pour des fibres G.652 et G.653

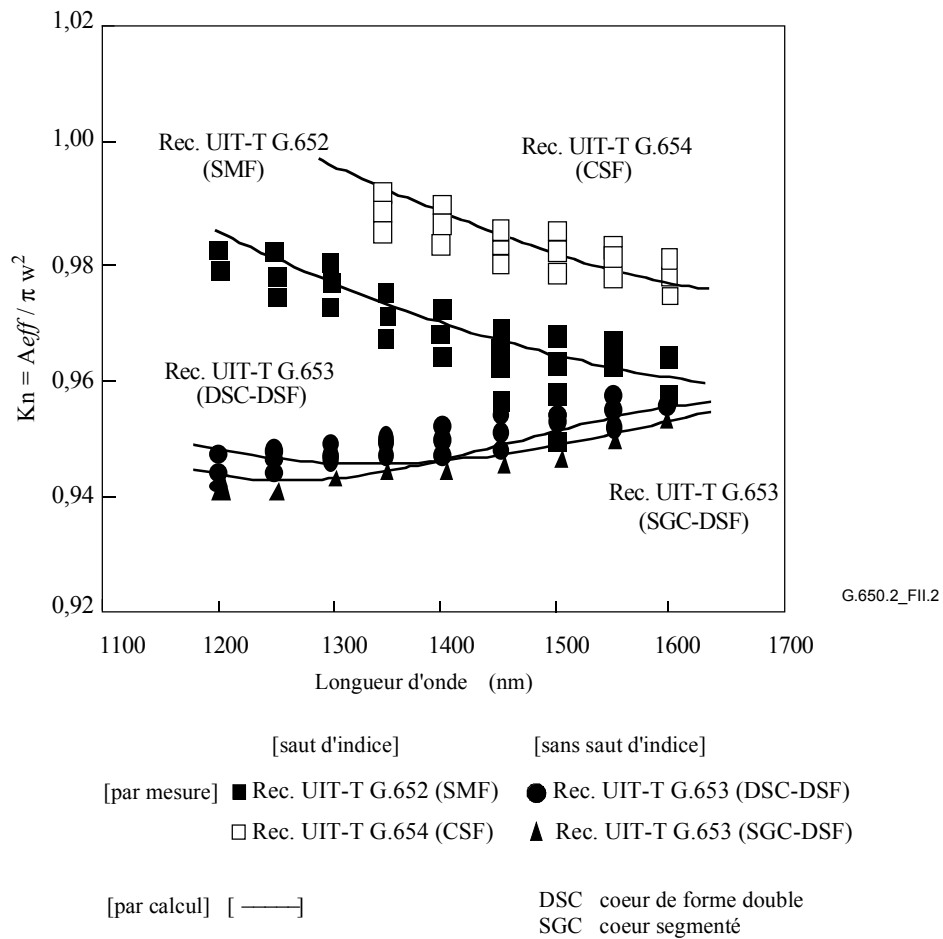


Figure II.2/G.650.2 – Facteur de correction k en fonction de la longueur d'onde pour des fibres G.652, G.653 et G.654 (obtenues par calcul et par mesures)

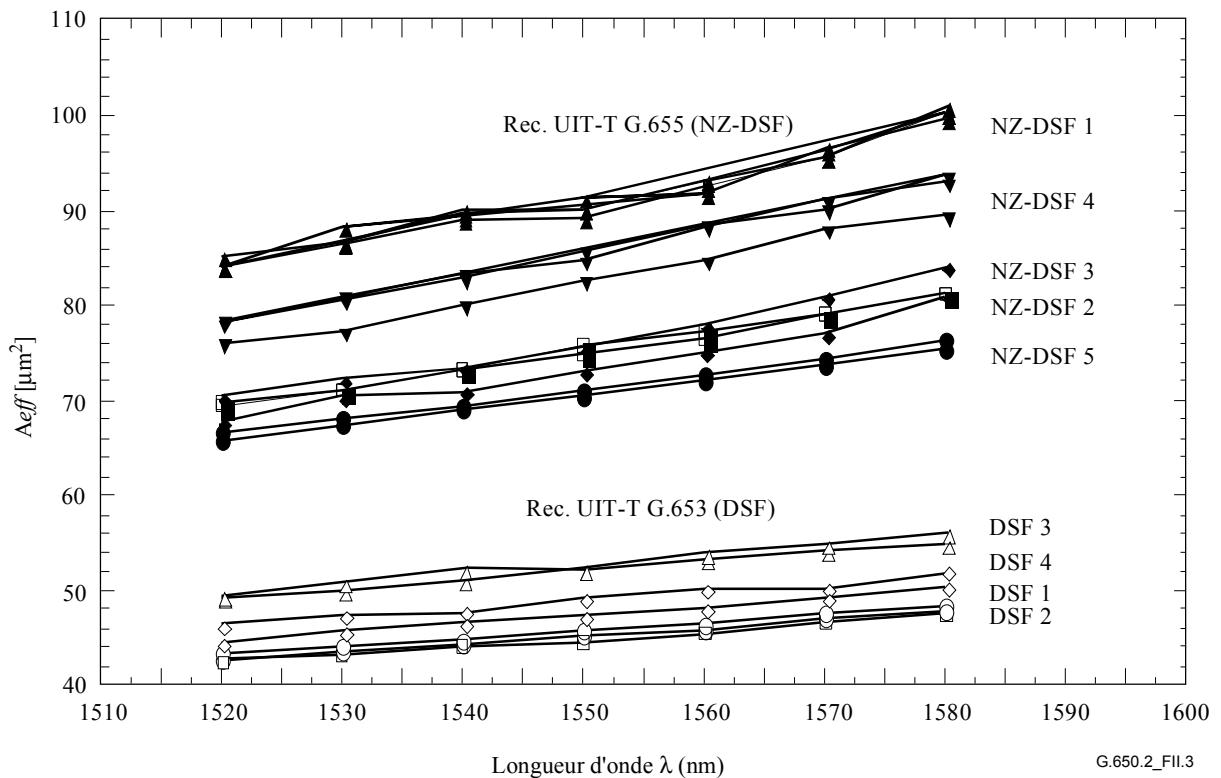


Figure II.3/G.650.2 – A_{eff} en fonction de la longueur d'onde pour des fibres G.653 et G.655 (obtenues par mesure)

II.4 Coefficient de non-linéarité (n_2/A_{eff})

Pour les champs particulièrement intenses, l'indice de réfraction des fibres optiques dépend de l'intensité optique à l'intérieur des fibres et peut être exprimé par:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (\text{II-5})$$

où n est l'indice de réfraction, n_0 la partie linéaire de l'indice de réfraction, n_2 l'indice de réfraction non linéaire et I l'intensité optique à l'intérieur des fibres.

Le coefficient de non-linéarité est défini comme étant n_2/A_{eff} . Il joue un rôle important dans l'évaluation de la dégradation des performances du système dues aux non-linéarités dans le cas des systèmes à forte densité de puissance.

Les méthodes de mesure du coefficient de non-linéarité sont à l'étude.

II.5 Diffusion stimulée de Brillouin

II.5.1 Description de l'effet

Dans un système à modulation d'intensité utilisant une source à raie spectrale étroite, une partie importante du rayonnement optique est transférée du signal à propagation vers l'avant vers un signal à propagation vers l'arrière lorsque le seuil de diffusion stimulée de Brillouin (SBS, *stimulated Brillouin scattering*) est dépassé. Dans la diffusion SBS, la lumière se propageant vers l'avant est diffusée par des phonons acoustiques. En raison de l'adaptation des phases (ou de la conservation de la quantité de mouvement), la lumière diffusée se propage préférentiellement vers l'arrière. La lumière diffusée est abaissée par l'effet de Brillouin d'environ 11 GHz à 1550 nm.

II.5.2 Estimation du seuil de diffusion stimulée de Brillouin (SBS) pour les fibres monomodes

II.5.2.1 Seuil de diffusion SBS

En général, le seuil de diffusion SBS est exprimé par:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B} \quad (\text{II-6})$$

où l'on part de l'hypothèse d'une pompe de Lorentz et d'une largeur de raie spectrale de Brillouin, et où g représente le coefficient de gain de Brillouin (unités de longueur/puissance) et A_{eff} la surface effective. K est une constante ($1 \leq K \leq 2$) déterminée par le degré de liberté de l'état de polarisation. $\Delta\nu_B$ et $\Delta\nu_p$ représentent respectivement la largeur de bande de Brillouin et la largeur de raie de la lumière de la pompe (MHz). L_{eff} est la longueur effective définie comme étant:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (\text{II-7})$$

où α est l'affaiblissement linéique et L la longueur de la fibre.

Le seuil de diffusion SBS, P_{th} , dépend de la largeur de raie, $\Delta\nu_p$, de la lumière de la pompe. Lorsque $\frac{\Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \ll 1$, P_{th} atteint sa valeur minimale, qui définit la puissance d'entrée maximale en régime permanent, P_m , en l'absence soit d'une plus grande largeur de raie de la lumière de la pompe, soit d'autres schémas de modulation. La puissance d'entrée maximale peut être exprimée par la relation:

$$P_m = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \quad (\text{II-8})$$

NOTE 1 – La puissance d'entrée maximale réelle du système de transmission peut être augmentée par divers schémas de modulation que l'on trouvera dans la documentation traitant du sujet.

NOTE 2 – P_{th} et P_m nécessitent tous deux une estimation du coefficient de gain, g , qui doit être déterminé expérimentalement et, facultativement, être défini comme une fonction du diamètre de champ de mode pour un type de fibre donné.

II.5.2.2 Montage de mesure du seuil de diffusion SBS

La Figure II.4 représente un montage destiné à mesurer le seuil de diffusion SBS. La pompe 1,32 μm est un laser monochromatique Nd:YAG à pompage par diode laser ayant une largeur de raie d'environ 5 kHz. La pompe 1,55 μm est une diode laser DFB LD monomode ayant une largeur de raie de 200 kHz. La lumière à onde continue (CW, *continuous wave*) de la diode laser est amplifiée par un amplificateur à fibre dopée à l'erbium. Les largeurs de raie de lumière de la pompe sont jugées négligeables par rapport à $\Delta\nu_B$ (20 à 100 MHz). La lumière CW de la pompe est injectée dans la fibre testée au moyen d'un coupleur ayant un coefficient d'aiguillage de 1,9. La puissance du rayonnement d'entrée, du rayonnement transmis et du rayonnement rétrodiffusé est mesurée par des puissancemètres.

La Figure II.5 montre un exemple de lumière transmise et rétrodiffusée à 1,32 μm en fonction d'une puissance d'entrée pour une fibre de type UIT-T G.654 [3]. La puissance transmise cesse de croître et la puissance rétrodiffusée augmente rapidement quand la puissance d'entrée atteint un niveau donné. Le seuil de diffusion SBS est défini comme étant la puissance de pompe d'entrée qui produit une puissance de Stokes rétrodiffusée égale à la puissance de pompe transmise (voir la Figure II.5). Le Tableau II.2 résume les paramètres de la fibre et les seuils de diffusion SBS pour divers types de fibre.

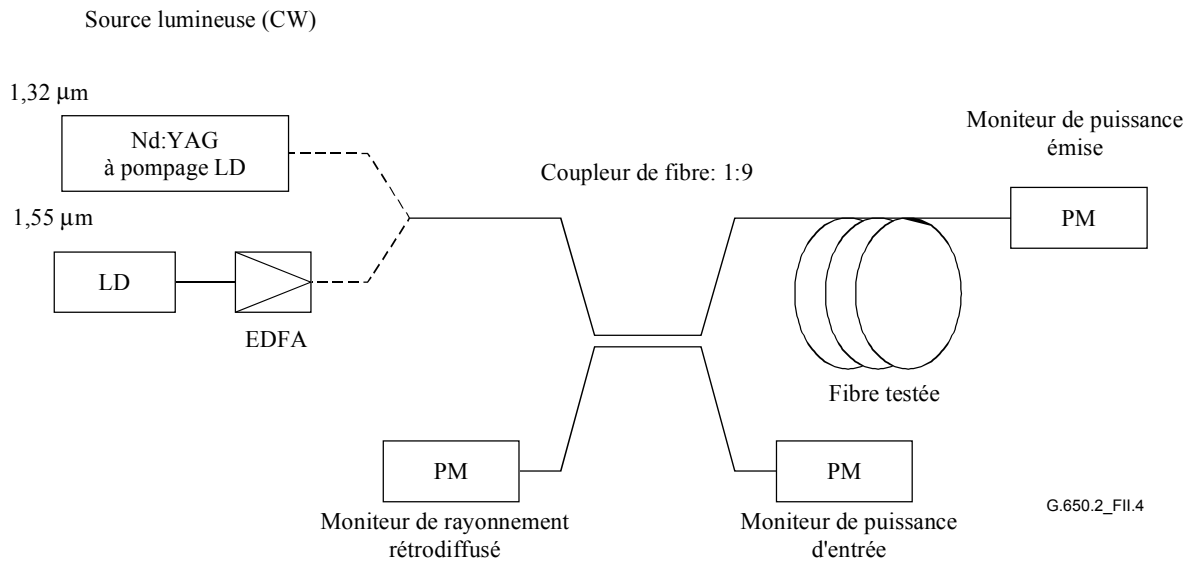


Figure II.4/G.650.2 – Montage de mesure

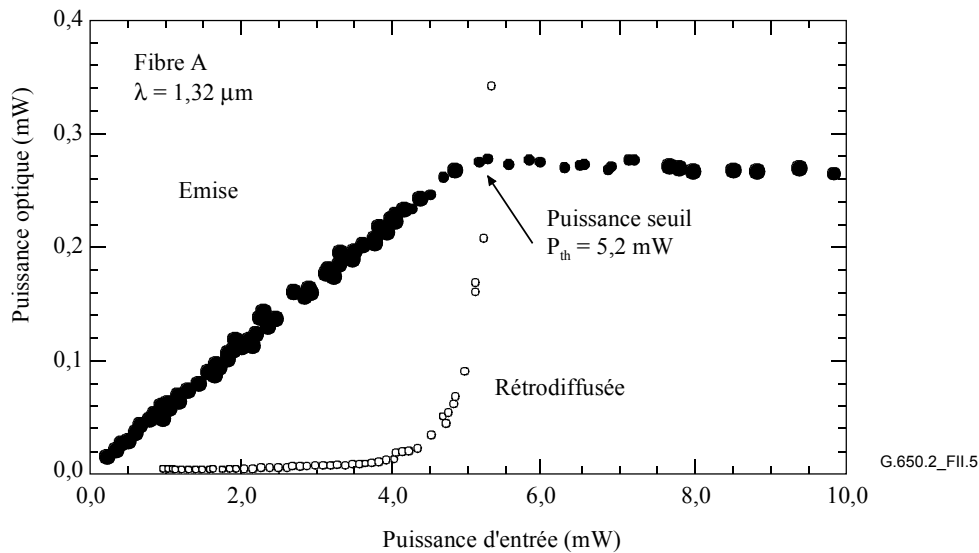


Figure II.5/G.650.2 – Puissance émise et puissance rétrodiffusée en fonction de la puissance d'entrée

Les puissances seuil indiquées dans le Tableau II.2 ne sont valables que pour les fibres étudiées dans les conditions de test décrites. Dans le cas de systèmes de transmission en exploitation réelle, on peut utiliser des valeurs nettement plus élevées.

Tableau II.2/G.650.2 – Valeurs des paramètres obtenues avec certaines fibres lors des tests

Fibre		A	B	C	D	E	F	G
Type de fibre		Rec. UIT-T G.654	Rec. UIT-T G.652	Rec. UIT-T G.653	Rec. UIT-T G.653	Rec. UIT-T G.653	Rec. UIT-T G.653	Rec. UIT-T G.653
Longueur L (km)		41,3	32,0	20,2	25,2	24,1	21,6	30,0
Affaiblissement (dB/km)	1320 nm	0,302	0,322	0,360	0,360	0,360	0,362	0,364
	1550 nm	0,172	0,194	0,200	0,200	0,200	0,200	0,209
MFD (µm)	1320 nm	9,1	9,8	6,3	6,5	6,3	6,7	6,2
	1550 nm	10,1	10,9	7,8	8,1	7,8	8,3	7,6
Changement de déplacement de fréquence de Brillouin (MHz)		1	1,5	1,5	–	–	–	6,0
Puissance seuil (mW)	1320 nm	5,2	6,4	3,3	3,4	2,9	3,6	4,1
	1550 nm	4,2	5,3	3,9	3,7	3,3	4,4	4,0

II.5.2.3 Estimation du seuil de diffusion SBS

La Figure II.6 montre la relation entre le seuil de diffusion SBS et le rapport A_{eff}/L_{eff} pour les fibres testées. Elle montre que ce seuil dépend linéairement du rapport A_{eff}/L_{eff} . Ce seuil peut être évalué au moyen de l'équation suivante:

$$P_{th} = 0.11 \left[\frac{A_{eff}}{L_{eff}} \right] \quad (II-9)$$

où A_{eff} est exprimé en μm^2 , L_{eff} en km et P_{th} en mW.

L'équation (II-9) peut être réécrite compte tenu de la longueur de fibre L, du diamètre du champ de mode 2W et de l'affaiblissement linéique α sous la forme suivante:

$$P_{th} = 0.11 \left[k\pi \left(\frac{2W}{2} \right)^2 \frac{\alpha}{1 - \exp(-\alpha L)} \right] \quad (II-10)$$

Dans ce cas, k est un facteur de correction qui établit la relation entre le diamètre de champ de mode et A_{eff} pour un type de fibre et une longueur d'onde donnés.

NOTE – Si le déplacement de la fréquence de Brillouin varie de plusieurs MHz le long de la fibre, P_{th} sera plus grand que la valeur obtenue au moyen de l'équation (II-9).

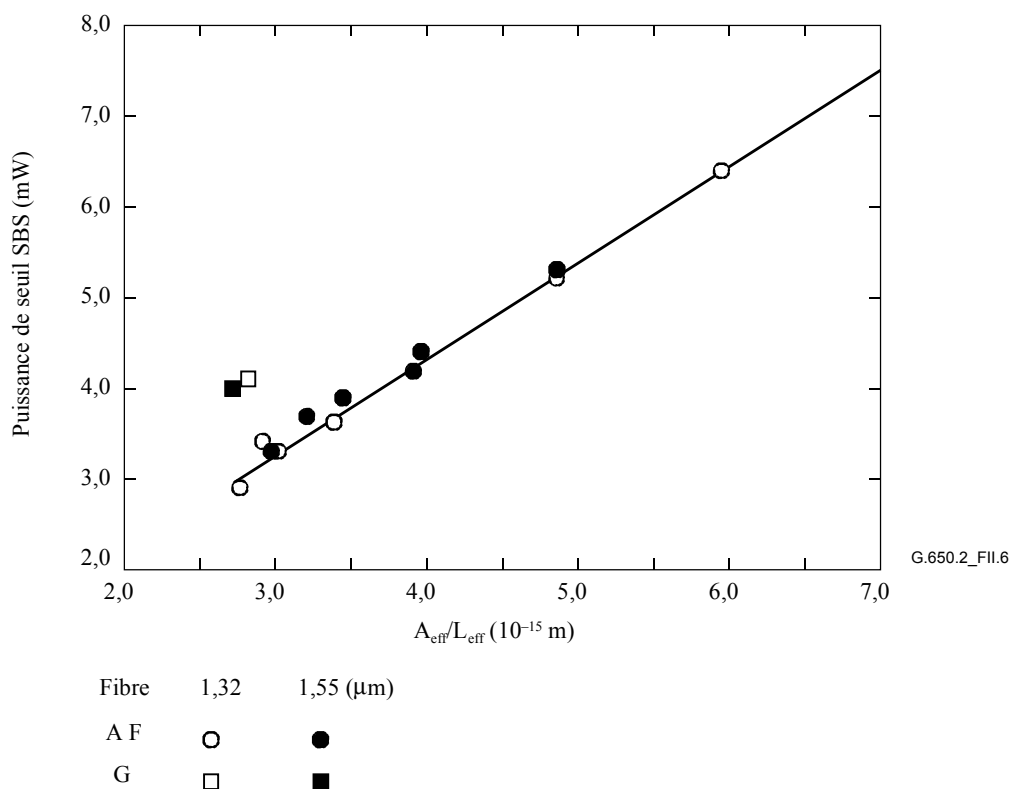


Figure II.6/G.650.2 – Relations entre le seuil de diffusion SBS et le rapport $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$

II.6 Autres effets

D'autres effets optiques non linéaires (mélange de quatre ondes, instabilité de modulation, modulation autophase, modulation transphase, solitons et brouillage stimulé de Raman) sont décrits dans l'Appendice II/G.663.

Appendice III

Méthodes de test pour la surface efficace (A_{eff})

III.1 Technique d'exploration du champ lointain (FFS, *far-field scan*)

III.1.1 Généralités

La surface efficace (A_{eff}) des fibres optiques monomodes est déterminée par la technique d'exploration du champ lointain (FFS).

III.1.2 Montage de mesure

Un schéma de principe du montage de mesure pour l'exploration du champ lointain (FFS, *far-field scan*) est illustré dans la Figure III.1.

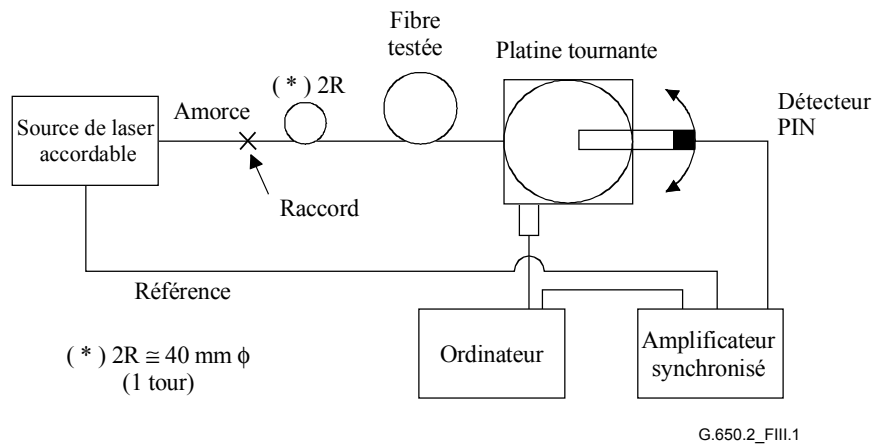


Figure III.1/G.650.2 – Montage type pour l'exploration du champ lointain (FFS)

III.1.2.1 Source lumineuse (comme dans § 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.1.2.2 Modulation (comme dans § 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.1.2.3 Conditions d'injection (comme dans § 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.1.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme dans § 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.1.2.5 Echantillon (comme dans § 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.1.2.6 Appareil d'exploration (comme dans § 5.1.1.2.6/G.650.1)

III.1.2.7 Détecteur (comme dans § 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.1.2.8 Amplificateur (comme dans § 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.1.2.9 Acquisition de données (comme dans § 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.1.3 Procédure de mesure

L'extrémité d'injection de la fibre est alignée avec le faisceau d'injection et l'extrémité de sortie de la fibre avec le dispositif de sortie approprié.

La surface efficace (A_{eff}) est calculée à l'aide de l'équation (III-1).

III.1.3.1 Etalonnage de l'équipement

Pour l'étalonnage de l'équipement, le grossissement fourni par l'optique de grossissement doit être mesuré en explorant la longueur d'un échantillon dont les dimensions sont déjà connues avec une précision convenable. Le grossissement doit être consigné.

III.1.3.2 Calculs

III.1.3.2.1 Equations et figures pour le calcul de la surface efficace (A_{eff})

1) Classifier les données sur la puissance du rayonnement de champ lointain:

soit $P(\theta_i)$ la puissance mesurée en fonction de la position angulaire, θ_i (radians) d'indice i . La courbe de puissance, $P_f(\theta_i)$, pour $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\text{max}}$ est:

$$P_f(\theta_i) = \frac{P(\theta_i) + P(-\theta_{-i})}{2} \quad (\text{III-1})$$

2) Calculer le diagramme d'intensité de champ proche:

utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (III-1). Un exemple en est donné dans l'équation (III-2) et toute autre méthode d'intégration doit être au moins aussi précise.

Calculer les valeurs du champ proche pour une plage de valeurs des rayons, r_j , allant de zéro à une valeur suffisamment grande pour que l'intensité calculée au rayon maximal soit inférieure à 0,01% de l'intensité maximale.

$$I(r_j) = \left[\sum_0^n P_f^{1/2}(\theta_1) J_0 \left(\frac{2\pi r_j \sin(\theta_i)}{\lambda} \right) \sin(2\theta_i) \Delta\theta \right]^2 \quad (\text{III-2})$$

où $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$

3) Calculer les intégrales de l'équation (III-2):

utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (III-2). Un exemple en est donné ci-après et toute autre méthode d'intégration doit être au moins aussi précise.

$$T = \left[\sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{III-3})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{III-4})$$

où $\Delta r = r_1 - r_0$ et m est le nombre de positions mesurées.

4) Terminer les calculs:

$$A_{eff} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{III-5})$$

Un exemple de données mesurées de puissance de champ lointain est illustré dans la Figure III.2.

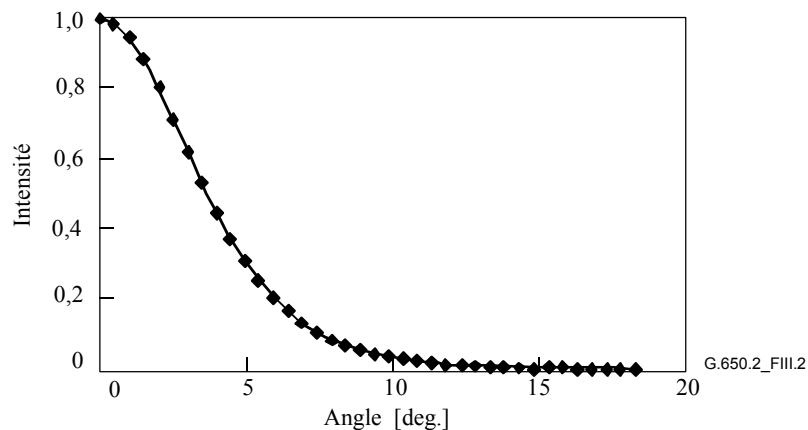


Figure III.2/G.650.2 – Exemple de données de diagramme de champ lointain FFP (obtenues par mesure)

III.1.4 Présentation des résultats

Les détails suivants doivent être présentés:

- a) le montage de mesure, la dynamique du système de mesure, les algorithmes de traitement ainsi qu'une description de l'ensemble d'ouverture utilisé (y compris l'ouverture numérique);
- b) les conditions d'injection;
- c) la longueur d'onde et la largeur spectrale à mi-hauteur de la raie spectrale de la source;
- d) l'identification de la fibre et sa longueur;
- e) le type de supprimeur de mode de gaine;
- f) le type et les dimensions du détecteur;
- g) la température de l'échantillon et les conditions ambiantes (lorsque cela est nécessaire);
- h) l'indication de la précision et de la reproductibilité des mesures;
- i) la surface efficace (A_{eff});
- j) la courbe de $A_{\text{eff}}(\lambda)$, s'il y a lieu.

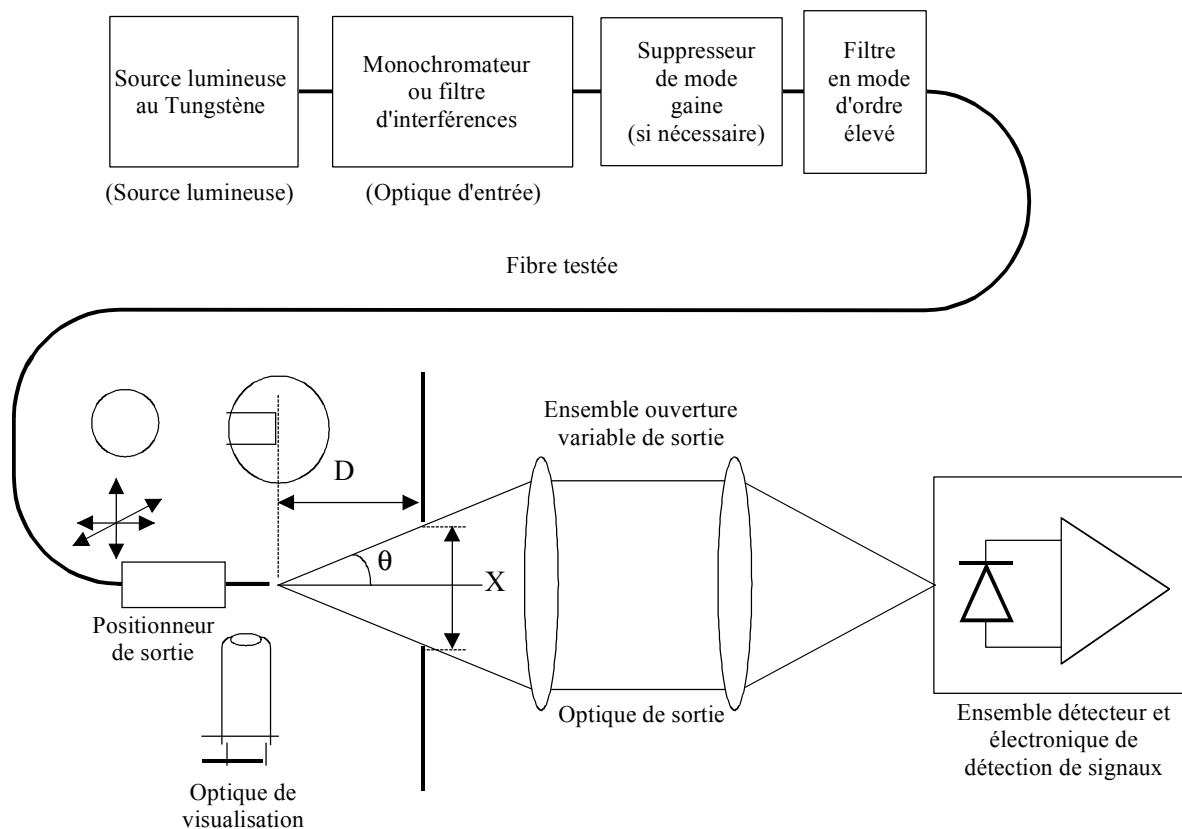
III.2 Technique de l'ouverture variable (VA, *variable aperture*)

III.2.1 Généralités

La surface efficace (A_{eff}) de fibres monomodes est déterminée par l'ouverture variable (VA) dans la technique de mesure du champ lointain.

III.2.2 Montage de mesure

Un schéma de principe du montage pour la mesure par la technique VA est illustré dans la Figure III.3.



G.650.2_FIII.3

Figure III.3/G.650.2 – Montage type pour technique de l'ouverture variable (VA)

III.2.2.1 Source lumineuse (comme dans § 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.2.2.2 Modulation (comme dans § 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.2.2.3 Conditions d'injection (comme dans § 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.2.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme dans § 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.2.2.5 Echantillon (comme dans § 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.2.2.6 Appareil d'ouverture

Il convient d'utiliser un mécanisme contenant au moins douze ouvertures, couvrant la gamme des demi-angles d'ouverture numérique allant de 0,02 à 0,25 (0,4 pour les fibres couvertes par la Rec. UIT-T G.653). La lumière transmise par l'ouverture est collectée et focalisée sur le détecteur.

NOTE – L'ouverture numérique (NA, *numerical aperture*) de l'optique collectrice doit être suffisamment grande pour ne pas influencer les résultats de mesure.

III.2.2.7 Ensemble ouverture variable de sortie

Un dispositif constitué d'ouvertures de transmission rondes de différentes tailles (une roue d'ouverture par exemple) doit être placé à une distance D d'au moins $100 w^2/\lambda$ de l'extrémité de la fibre et il sert à faire varier la puissance collectée du diagramme de sortie de la fibre. On utilise généralement 12 à 20 ouvertures qui sont placées à une distance d'environ 20 mm à 50 mm de l'extrémité de la fibre. L'ouverture numérique maximale de l'ensemble d'essai doit être de 0,40. Des moyens de centrer les ouvertures par rapport au diagramme doivent être utilisés pour diminuer la sensibilité à l'angle frontal de la fibre.

Comme élément du montage des équipements (voir Figure III.4), mesurer soigneusement et noter la distance longitudinale D entre la position de l'extrémité de sortie de la fibre et le plan des ouvertures ainsi que le diamètre X_i de chacune des ouvertures. Déterminer le demi-angle sous-tendu par chaque ouverture de la roue et noter ces valeurs θ_i , ($i = 1$ à n dans l'ordre croissant des tailles d'ouverture) pour des calculs ultérieurs. Ces valeurs sont indépendantes de la longueur d'onde du test.

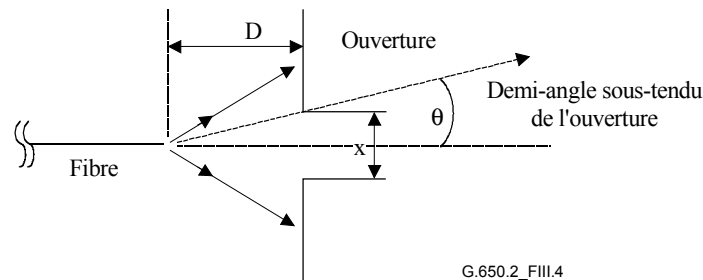


Figure III.4/G.650.2 – Montage de l'appareil de réglage de l'ouverture

III.2.2.8 Détecteur (comme dans § 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.2.2.9 Amplificateur (comme dans § 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.2.2.10 Acquisition des données (comme dans § 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.2.3 Procédure de mesure

L'extrémité d'injection de la fibre sera alignée sur le faisceau d'injection, et son extrémité de sortie sera alignée sur le dispositif de sortie approprié.

La surface efficace (A_{eff}) est calculée à partir des équations (III-6) à (III-10) suivantes.

III.2.3.1 Etalonnage de l'équipement

Pour étalonner l'équipement, on doit mesurer le grossissement de l'optique en balayant la longueur d'un échantillon dont les dimensions sont déjà connues avec une bonne précision. Cet agrandissement doit être consigné.

III.2.3.2 Calculs

III.2.3.2.1 Equations et figures pour le calcul de la surface efficace (A_{eff})

La technique de l'ouverture variable (VA) mesure la puissance totale normalisée $f(\theta)$ qui passe à travers une ouverture donnée comme le montre la Figure III.3 soutendant un angle de champ lointain θ au niveau de la fibre. Ces valeurs de puissance équivalent à une intégration de la distribution de puissance en champ lointain normalisée $F^2(\theta)$, ce qu'indique l'équation (III-6).

$$f(\theta) = \int_0^{\theta} F^2(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (\text{III-6})$$

Une courbe de la puissance transmise à travers les ouvertures, normalisée, en fonction de l'angle θ est illustrée par la Figure III.5.

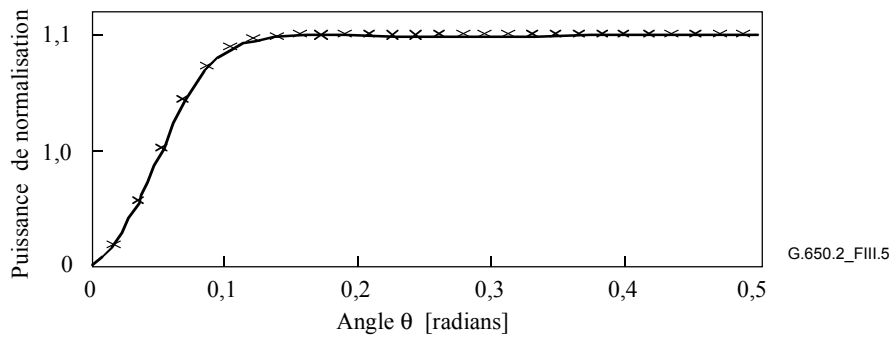


Figure III.5/G.650.2 – Courbes de données VA mesurées

Une quartique est ajustée aux données de l'ouverture de champ lointain et elle est donnée par l'équation (III.7):

$$f(\theta) = A\theta^4 + B\theta^3 + C\theta^2 + D\theta^1 + E \quad (\text{III-7})$$

La surface efficace, A_{eff} , est calculée à partir de la distribution de puissance du champ lointain $I(r)$ comme une fonction du rayon r . Pour ce calcul, il faut en premier lieu différencier les données de puissance intégrées, $f(\theta)$, pour obtenir la distribution de puissance du champ lointain $F^2(\theta)$,

$$F^2(\theta) = \frac{df(\theta)}{d(\theta)} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{III-8})$$

Une courbe de cette distribution FFP calculée est illustrée dans la Figure III.6.

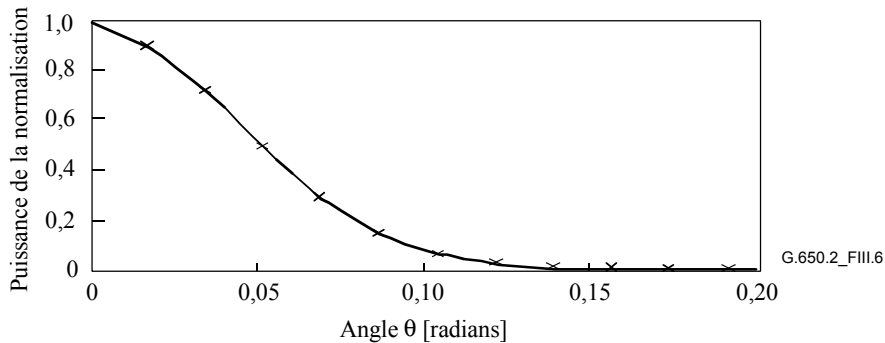


Figure III.6/G.650.2 – Courbes de la distribution FFP

A partir de la distribution de puissance du champ lointain $F^2(\theta)$, il est alors possible de calculer la distribution de puissance du champ proche $I(r)$ comme une fonction du rayon r , à l'aide de la transformée inverse de Hankel de la manière suivante:

$$I(r) = \left[\int_0^{\infty} \sqrt{F^2(\theta)} \cdot J_0\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) \sin 2\theta d\theta \right]^2 \quad (\text{III-9})$$

Une courbe de cette distribution calculée de champ proche $I(r)$ en fonction du rayon r est illustrée dans la Figure III.7.

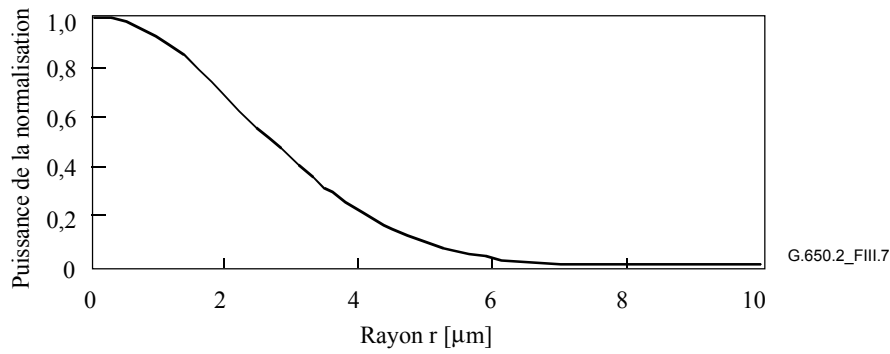


Figure III.7/G.650.2 – Courbe de la distribution NFP

La surface efficace, A_{eff} , est alors calculée à partir de la distribution du champ proche $I(r)$ à l'aide de l'équation (III-10).

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \cdot \frac{\left[\int_0^{\infty} I(r) \cdot r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 \cdot r dr} \quad (\text{III-10})$$

III.2.4 Présentation des résultats

Les détails suivants doivent être présentés:

- a) le montage de mesure, la dynamique du système de mesure, les algorithmes de traitement ainsi qu'une description de l'ensemble d'ouverture utilisé (y compris l'ouverture numérique);
- b) les conditions d'injection;
- c) la longueur d'onde et la largeur spectrale maximale à mi-hauteur de la raie spectrale de la source;
- d) l'identification de la fibre et sa longueur;
- e) le type de suppresseur de mode de gaine;
- f) le type et les dimensions du détecteur;
- g) la température de l'échantillon et les conditions ambiantes (lorsque cela est nécessaire);
- h) l'indication de la précision et de la reproductibilité des mesures;
- i) la surface efficace (A_{eff});
- j) la courbe de $A_{\text{eff}}(\lambda)$, s'il y a lieu.

III.3 La technique de l'exploration du champ proche (NFS)

III.3.1 Généralités

La surface efficace (A_{eff}) de fibres monomodes est déterminée par la technique de mesure par exploration du champ proche (NFS, *near-field scan*).

III.3.2 Montage de mesure

III.3.2.1 Source lumineuse (comme dans § 5.1.1.2.1/G.650.1)

III.3.2.2 Modulation (comme dans § 5.1.1.2.2/G.650.1)

III.3.2.3 Conditions d'injection (comme dans § 5.1.1.2.3/G.650.1)

III.3.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme dans § 5.1.1.2.4/G.650.1)

III.3.2.5 Echantillon (comme dans § 5.1.1.2.5/G.650.1)

III.3.2.6 Appareil d'exploration (comme dans § 5.1.1.2.6/G.650.1)

III.3.2.7 Détecteur (comme dans § 5.1.1.2.7/G.650.1)

III.3.2.8 Amplificateur (comme dans § 5.1.1.2.8/G.650.1)

III.3.2.9 Acquisition de données (comme dans § 5.1.1.2.9/G.650.1)

III.3.3 Procédure de mesure

L'extrémité d'injection de la fibre est alignée avec le faisceau d'injection et l'extrémité de sortie de la fibre avec le dispositif de sortie approprié.

La surface efficace (A_{eff}) est calculée à l'aide des équations (III-11) à (III-15).

III.3.3.1 Etalonnage de l'équipement

Pour l'étalonnage de l'équipement, le grossissement fourni par l'optique de grossissement doit être mesuré en explorant la longueur d'un échantillon dont les dimensions sont déjà connues avec une précision convenable. Le grossissement doit être consigné.

III.3.3.2 Calculs

III.3.3.2.1 Equations et figures pour le calcul de la surface efficace (A_{eff})

1) Calculer le centroïde:

pour une section transversale donnée du diagramme de champ proche (NFP) qui est d'extension maximale, avec des valeurs de position données par r et des valeurs d'intensités selon $I(r_i)$, la position du centroïde, r_c , est donnée par:

$$r_c = \frac{\sum r_i I(r_j)}{\sum I(r_i)} \quad (\text{III-11})$$

2) Calculer le profil d'intensité:

réindexer les données de position et d'intensité autour de la position r_c de manière à ce que les positions au-dessus aient des valeurs d'indice supérieures à zéro et que les positions du dessous aient des valeurs d'indice inférieures à zéro. L'indice maximal est donné égal à n . Le profil d'intensité est:

$$I_f(r_i) = \{I(r_i) + I(r_{-i})\} / 2 \quad (\text{III-12})$$

3) Calculer les intégrales à partir de l'équation (III-12):

utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (III-12). Un exemple en est donné ci-après et toute autre méthode d'intégration doit être au moins aussi précise.

$$T = \left[\sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{III-13})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{III-14})$$

où $\Delta r = r_1 - r_0$

4) Terminer les calculs:

$$A_{eff} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{III-15})$$

Un exemple de diagramme de champ proche obtenu par mesure est illustré dans la Figure III.7.

III.3.4 Présentation des résultats

Les détails suivants doivent être présentés:

- a) le montage de mesure, la dynamique du système de mesure, les algorithmes de traitement ainsi qu'une description de l'ensemble d'ouverture utilisé (y compris l'ouverture numérique);
- b) les conditions d'injection;
- c) la longueur d'onde et la largeur spectrale maximale à mi-hauteur de la raie spectrale de la source;
- d) l'identification de la fibre et sa longueur;
- e) le type de supprimeur de mode de gaine;
- f) le type et les dimensions du détecteur;
- g) la température de l'échantillon et les conditions ambiantes (lorsque cela est nécessaire);
- h) l'indication de la précision et de la reproductibilité des mesures;
- i) la surface efficace (A_{eff});
- j) la courbe de $A_{eff}(\lambda)$, s'il y a lieu.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, circuits téléphoniques, télégraphie, télécopie et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information et protocole Internet
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication