



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.650

(04/97)

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

Caractéristiques des supports de transmission – Câbles à
fibres optiques

**Définition des paramètres des fibres
monomodes et méthodes de test associées**

Recommandation UIT-T G.650

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

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
SYSTÈMES INTERNATIONAUX ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	
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 RADIOTÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	
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
SYSTÈMES DE TRANSMISSION NUMÉRIQUES	
EQUIPEMENTS TERMINAUX	G.700–G.799
Caractéristiques principales des équipements de multiplexage en hiérarchie numérique synchrone	G.780–G.789
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTION NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999

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

RECOMMANDATION UIT-T G.650

DEFINITION DES PARAMETRES DES FIBRES MONOMODES ET METHODES DE TEST ASSOCIEES

Source

La Recommandation UIT-T G.650, révisée par la Commission d'études 15 de l'UIT-T (1997-2000), a été approuvée le 8 avril 1997 selon la procédure définie dans la Résolution n° 1 de la CMNT.

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.

La Conférence mondiale de normalisation des télécommunications (CMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'études 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 n° 1 de la CMNT.

Dans certains secteurs de la technologie 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 avait/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 1997

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	Définition des paramètres relatifs aux fibres monomodes..... 1
1.1	Définitions générales 1
1.1.1	profil d'indice de réfraction..... 1
1.1.2	méthode de test de référence (<i>RTM, reference test method</i>)..... 1
1.1.3	méthode de test alternative (<i>ATM, alternative test method</i>) 1
1.1.4	suppresseur de mode de gaine 1
1.1.5	filtre de mode..... 1
1.2	Caractéristiques mécaniques 1
1.2.1	revêtement primaire 1
1.2.2	revêtement secondaire 1
1.2.3	niveau de test de résistance..... 1
1.2.4	paramètre de susceptibilité aux contraintes 2
1.3	Caractéristiques du champ de mode 2
1.3.1	champ de mode 2
1.3.2	diamètre du champ de mode 2
1.3.3	centre du champ de mode 2
1.3.4	Erreur de concentricité du champ de mode 2
1.3.5	non-circularité du champ de mode 3
1.4	Caractéristiques de la gaine optique 3
1.4.1	gaine optique..... 3
1.4.2	centre de gaine optique 3
1.4.3	diamètre de gaine optique..... 3
1.4.4	écart sur le diamètre de gaine optique 3
1.4.5	champ de la tolérance de gaine optique..... 3
1.4.6	non-circularité de la gaine optique 3
1.5	Définitions de la dispersion chromatique 3
1.5.1	dispersion chromatique..... 3
1.5.2	coefficient de dispersion chromatique..... 3
1.5.3	pente de dispersion nulle 4
1.5.4	longueur d'onde de dispersion nulle 4
1.5.5	décalage de la longueur d'onde de la source..... 4
1.5.6	décalage de dispersion 4
1.6	Autres caractéristiques 4
1.6.1	longueur d'onde de coupure..... 4
1.6.2	affaiblissement..... 5
1.6.3	Dispersion modale de polarisation 6
2	Méthodes de mesure pour les fibres monomodes..... 8
2.1	Méthodes de test de référence du diamètre du champ de mode..... 8

2.1.1	Méthode de référence: exploration du champ lointain	8
2.1.2	Autre méthode possible (n° 1): technique de l'ouverture variable.....	11
2.1.3	Autre méthode possible de test (n° 2): exploration du champ proche.....	12
2.2	Méthodes de test du diamètre de la gaine, de l'erreur de concentricité du champ de mode et de la non-circularité de la gaine	13
2.2.1	Méthode de test de référence: technique du champ proche émis	13
2.2.2	Autre méthode de test possible (n° 1): technique du champ proche réfracté	16
2.2.3	Autre méthode test possible (n° 2): technique de la visée latérale	18
2.2.4	Autre méthode de test possible (n° 3): technique de l'image du champ proche transmis.....	21
2.3	Méthodes de test de la longueur d'onde de coupure.....	23
2.3.1	Méthode de test de référence de la longueur d'onde de coupure (λ_c) d'une fibre sous revêtement primaire et de celle des câbles de jarretière (λ_{cj}): technique de la puissance émise	23
2.3.2	Autre méthode de test possible: technique du mandrin λ_c	28
2.3.3	Méthode de mesure de référence de la longueur d'onde de coupure (λ_{cc}) de la fibre câblée: technique de la puissance émise.....	29
2.3.4	Autre méthode de test possible pour mesurer la longueur d'onde de coupure (λ_{cc}) de la fibre câblée.....	31
2.4	Méthodes de test de l'affaiblissement	32
2.4.1	Méthode de test de référence: technique de la fibre coupée.....	32
2.4.2	Autre méthode possible (n° 1): technique de la rétrodiffusion.....	35
2.4.3	Autre méthode de test possible (n° 2): technique de l'affaiblissement d'insertion.....	38
2.5	Méthodes de test de la dispersion chromatique	42
2.5.1	Méthode de test de référence: la technique du déphasage.....	42
2.5.2	Autre méthode possible (n° 1): la technique interférométrique.....	46
2.5.3	Autre méthode possible (n° 2): la technique du temps de propagation d'impulsions	50
2.6	Méthodes de test d'épreuve	52
2.6.1	Méthode de test de référence: traction longitudinale.....	52
2.7	Méthodes de test par mesure de la dispersion modale de polarisation	57
2.7.1	La technique de l'analyse caractéristique avec matrice de Jones.....	57
2.7.2	La technique de l'analyseur fixe.....	62
2.7.3	Méthode de test: technique de l'interféromètre.....	71
2.7.4	Méthodes de l'état principal de polarisation (PSP).....	76
	Appendice I – Méthodes d'interpolation de la longueur d'onde de coupure	81
I.1	Méthode du nombre limité d'erreurs négatives.....	81
I.2	Méthode des moindres carrés.....	83

	Page
Appendice II – Détermination du retard associé à la PMD à partir d'un interférogramme.....	83
Appendice III – Attributs non linéaires.....	85
III.1 Rappel	85
III.2 Surface effective (A_{eff}).....	86
III.3 Facteur de correction k.....	86
III.4 Coefficient de non-linéarité (n_2/A_{eff})	88
III.5 Diffusion stimulée de Brillouin	89
III.5.1 Description de l'effet.....	89
III.5.2 Estimation du seuil de diffusion stimulée de Brillouin (SBS) pour les fibres monomodes.....	89
III.6 Autres effets	92

Recommandation G.650

DEFINITION DES PARAMETRES DES FIBRES MONOMODES ET METHODES DE TEST ASSOCIEES

(révisée en 1997)

1 Définition des paramètres relatifs aux fibres monomodes

1.1 Définitions générales

1.1.1 profil d'indice de réfraction

Variations de l'Indice de réfraction le long d'un diamètre de la fibre.

1.1.2 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.

1.1.3 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.

1.1.4 supprimeur de mode de gaine

Dispositif qui facilite la conversion des modes de gaine en modes de rayonnement.

1.1.5 filtre de mode

Dispositif conçu de manière à accepter ou éliminer un ou plusieurs modes.

1.2 Caractéristiques mécaniques

1.2.1 revêtement primaire

La ou les couches de matériau protecteur appliquées par dessus la gaine optique pendant ou juste après la phase d'étirage, l'objectif étant de préserver l'intégrité de la surface de la gaine et d'offrir le minimum de protection nécessaire (par exemple, revêtement de 250 μm).

1.2.2 revêtement secondaire

La ou les couches de matériau protecteur appliquées sur une ou plusieurs fibres déjà enrobées d'un revêtement primaire, afin de renforcer la protection ou de regrouper les fibres dans une structure donnée (par exemple, gainage de 900 μm , gainage serré ou gainage ruban).

1.2.3 niveau de test de résistance

Valeur spécifiée de contrainte de tension ou d'allongement à laquelle est soumise une longueur de fibre pendant une courte période de temps spécifiée. Ce test est généralement effectué séquentiellement le long de la fibre.

1.2.4 paramètre de susceptibilité aux contraintes

Coefficient sans dimension qui lie empiriquement à la croissance des criques la contrainte appliquée. Il dépend de la température, de l'humidité et d'autres conditions ambiantes.

On peut définir pour ce paramètre des valeurs statique et dynamique.

La valeur statique n_s est l'opposé de la pente de la courbe log-log de fatigue statique du temps de rupture en fonction de la contrainte appliquée

La valeur dynamique est n_d , où $1/(n_d + 1)$ est la pente de la courbe log-log de fatigue dynamique de la contrainte de rupture en fonction de la vitesse de variation de la contrainte appliquée.

NOTE – La valeur n n'est pas nécessairement entière.

1.3 Caractéristiques du champ de mode

1.3.1 champ de mode

Le champ de mode est la distribution du champ monomode fondamental LP₀₁ qui engendre la distribution spatiale de l'intensité dans la fibre.

1.3.2 diamètre du champ de mode

Le diamètre $2w$ du champ de mode (MFD, *mode field diameter*), est une mesure de l'étendue transverse de l'intensité du champ électromagnétique du mode dans une section droite de la fibre, et se définit à partir de la distribution d'intensité du champ lointain, $F^2(\theta)$, où θ est l'angle du champ lointain, à partir de l'équation:

$$2w = \frac{\lambda}{\pi} \left[\frac{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} F^2(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \right]^{1/2} \quad (1-1)$$

1.3.3 centre du champ de mode

Le centre de champ de mode est la position du centroïde de la distribution d'intensité spatiale dans la fibre.

NOTE 1 – Le centroïde est situé à r_c , qui est l'intégrale d'intensité pondérée normalisée du vecteur d'intégration r .

$$r_c = \frac{\iint_{Area} r I(r) dA}{\iint_{Area} I(r) dA} \quad (1-2)$$

NOTE 2 – La correspondance entre la position du centroïde définie ci-dessus et la position du maximum de la distribution d'intensité spatiale nécessite des études complémentaires.

1.3.4 Erreur de concentricité du champ de mode

Distance entre le centre du champ de mode et le centre géométrique de la gaine optique.

1.3.5 non-circularité du champ de mode

Etant donné qu'il est inutile, en général, de mesurer la non-circularité du champ de mode dans les tests de recette (comme indiqué aux 1.4.1 des Recommandations G.652, G.653 et G.654), une définition de la non-circularité du champ de mode n'est pas nécessaire ici.

1.4 Caractéristiques de la gaine optique

1.4.1 gaine optique

Partie externe d'indice de réfraction constant d'une section droite de la fibre.

1.4.2 centre de gaine optique

Pour une section droite d'une fibre optique, centre du cercle qui s'adapte le mieux à la limite externe de la gaine optique.

NOTE – La méthode de meilleure adaptation doit être spécifiée. Une méthode possible est décrite dans l'Appendice I de la section I de l'Annexe B/G.651.

1.4.3 diamètre de gaine optique

Diamètre du cercle définissant le centre de la gaine.

1.4.4 écart sur le diamètre de gaine optique

Différence entre la valeur effective et la valeur nominale du diamètre de la gaine.

1.4.5 champ de la tolérance de gaine optique

Pour une section droite de la fibre optique, région comprise entre le cercle circonscrit au contour de la gaine et le cercle inscrit dans ce contour, les deux cercles ayant le même centre que la gaine.

1.4.6 non-circularité de la gaine optique

Différence entre les diamètres des deux cercles définis par le champ de tolérance de la gaine, divisée par le diamètre nominal de la gaine.

1.5 Définitions de la dispersion chromatique

1.5.1 dispersion chromatique

Etalement d'une impulsion lumineuse dans une fibre optique causé par la différence des vitesses de propagation de groupe des diverses longueurs d'onde qui constituent le spectre de la source.

NOTE – Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la dispersion chromatique: dispersion par le matériau, dispersion du guide d'ondes, dispersion du profil.

1.5.2 coefficient de dispersion chromatique

Modification du temps de propagation d'une impulsion lumineuse par unité de longueur de fibre causé par une modification de longueur d'onde unitaire. Il est généralement exprimé en ps/(nm · km).

NOTE – La durée d'une impulsion lumineuse par unité de largeur de spectre de la source après le passage dans une fibre de longueur unitaire est égale au coefficient de dispersion chromatique si les conditions préalables suivantes sont remplies:

- 1) la source a un spectre large;
- 2) la durée de l'impulsion à l'entrée de la fibre est brève par rapport à la durée à la sortie et la longueur d'onde est différente de la longueur d'onde de dispersion nulle.

1.5.3 pente de dispersion nulle

Pente de la courbe du coefficient de dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde, à la longueur d'onde pour laquelle la dispersion est nulle.

1.5.4 longueur d'onde de dispersion nulle

Longueur d'onde à laquelle disparaît la dispersion chromatique.

1.5.5 décalage de la longueur d'onde de la source

Seulement pour les fibres visées dans la Recommandation G.653.

Différence, en valeur absolue, entre la longueur d'onde de la source et 1550 nm.

1.5.6 décalage de dispersion

Seulement pour les fibres visées dans la Recommandation G.653.

Déplacement, en valeur absolue, de la longueur d'onde de dispersion nulle, par rapport à 1550 nm.

1.6 Autres caractéristiques

1.6.1 longueur d'onde de coupure

La longueur d'onde de coupure théorique est la longueur d'onde la plus courte à laquelle la propagation monomode peut avoir lieu dans une fibre monomode. Ce paramètre peut être calculé à partir du profil de l'indice de réfraction de la fibre. Aux longueurs d'onde inférieures à la longueur d'onde de coupure théorique, la propagation peut se faire selon plusieurs modes différents et dans ce cas la fibre n'est plus monomode mais multimode.

Dans les fibres optiques, le passage du comportement multimode au comportement monomode n'a pas lieu à une longueur d'onde déterminée, mais plutôt de manière progressive sur une gamme de longueurs d'ondes. En conséquence, pour déterminer le comportement des fibres optiques dans un réseau de télécommunication, la longueur d'onde de coupure théorique est moins utile que la longueur d'onde seuil réelle du fonctionnement monomode en conditions réelles. Il convient donc d'utiliser, pour la spécification des fibres monomodes, des notions supplémentaires, définies comme suite:

La longueur d'onde de coupure est définie comme étant la longueur d'onde plus grande que celle à laquelle le rapport entre la puissance totale, y compris des modes injectés d'ordre plus élevé, et la puissance en mode fondamental descend au-dessous de 0,1 dB. Selon cette définition, la puissance en mode du deuxième ordre (LP₁₁) subit un affaiblissement supplémentaire de 19,3 dB par rapport à celle en mode fondamental (LP₀₁) pour la même excitation.

Etant donné que la longueur d'onde de coupure dépend de la longueur et des courbures de la fibre ainsi que des contraintes qui lui sont imposées, la valeur de la longueur de coupure dépend de l'état de la fibre: câblée et en place, ou courte et non câblée. Pour cette raison, trois types de longueurs d'onde de coupure ont été définis: **la longueur d'onde de coupure de câble, longueur de coupure de fibre et longueur d'onde de coupure de jarretière.**

longueur d'onde de coupure de câble (λ_{cc}) – Elle est mesurée avant la mise en place sur un câble pratiquement droit de 22 m de long préparé en dénudant le câble sur 1 mètre aux deux extrémités de manière à faire apparaître les fibres avec leur protection primaire et à réaliser sur chaque extrémité une boucle de 40 mm de rayon. Une autre possibilité consiste à mesurer ce paramètre sur 22 m de fibre non câblée, comportant sa couche de protection primaire, disposée librement en boucles de rayon supérieur à 140 mm, avec une boucle de 40 mm de rayon à chaque extrémité.

D'autres configurations sont possibles si leurs résultats sont équivalents à 10 nm près ou s'ils sont meilleurs que ceux obtenus avec les configurations ci-dessus. C'est le cas par exemple, de deux boucles de 40 mm de rayon dans une fibre non câblée de 2 m de long pour certains types de fibre et de câble.

longueur d'onde de coupure de fibre (λ_c) – Elle est mesurée sur une fibre munie de sa protection primaire, non câblée, dans la configuration suivante: 2 m de long avec une boucle de 140 mm de rayon (ou équivalent, par exemple la technique du mandrin), faiblement tendue, le reste de la fibre étant essentiellement droite.

longueur d'onde de coupure de jarretière (λ_{cj}) – Elle est mesurée dans les conditions suivantes: jarretière de 2 mètres de long, comportant une boucle de x mm¹ de rayon (ou disposition équivalente, par exemple au moyen d'un mandrin), la partie restante étant principalement rectiligne.

Pour éviter d'être gêné par le bruit modal et la dispersion modale, la longueur d'onde de coupure (λ_{cc}) de la plus courte longueur de câble (y compris la longueur nécessaire aux réparations, le cas échéant) doit être inférieure à la plus petite longueur d'onde prévue pour le système, λ_s :

$$\lambda_{cc} < \lambda_s \quad (1-3)$$

Dans ces conditions, chaque section de câble individuelle est suffisamment monomode. Toute épissure imparfaite créera une certaine puissance dans un mode d'ordre élevé (PL₁₁) auquel les fibres monomodes se prêtent généralement sur de courtes distances (de l'ordre de quelques mètres, selon les conditions de mise en place). Il convient donc de spécifier une distance minimale entre les épissures afin que la fibre soit assez longue pour affaiblir le mode LP₁₁ avant l'épissure suivante. Si l'inégalité (1-3) est satisfaite dans la section la plus courte du câble, elle le sera automatiquement dans les sections plus longues et la propagation sera monomode indépendamment de la longueur de la section élémentaire.

Pour évaluer la sensibilité d'une fibre à la courbure, on peut combiner la longueur d'onde de coupure de fibre et le diamètre du champ de mode: une fréquence de coupure élevée et un faible diamètre de champ de mode se traduiront par une fibre moins sensible à la courbure. Cela explique pourquoi il est souvent souhaitable de spécifier des valeurs élevées pour la fréquence de coupure, λ_c , même si la limite supérieure de ce paramètre dépasse la longueur d'onde de fonctionnement. Les techniques d'installation réelles et les types de câble seront choisis de manière à obtenir une longueur d'onde de coupure de câble inférieure à la longueur d'onde de fonctionnement.

Etant donné que la spécification de la longueur d'onde de coupure de câble, λ_{cc} , est un moyen plus direct d'assurer le fonctionnement monomode du câble, on préfère spécifier celle-ci plutôt que la longueur d'onde de coupure de fibre, λ_c . Toutefois, lorsque les circonstances ne permettent pas de spécifier directement λ_{cc} (dans les câbles à fibre unique tels que les amorces et jarretières, ou dans les câbles qu'il faut mettre en place d'une manière complètement différente de celle de la méthode de test de référence), il est utile de spécifier une limite supérieure pour λ_{cj} ou λ_c . Cette possibilité est traitée dans les Recommandations G.652, G.653, G.654 et G.655.

1.6.2 affaiblissement

L'affaiblissement $A(\lambda)$ à la longueur d'onde λ entre deux sections transversales 1 et 2 d'une fibre, séparées par la distance L , est défini par la formule:

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (\text{dB}) \quad (1-4)$$

¹ Certaines Administrations attribuent à x la valeur 76 mm.

où $P_1(\lambda)$ est la puissance optique traversant la section 1 et $P_2(\lambda)$ la puissance optique traversant la section 2 à la longueur d'onde λ .

Pour une fibre uniforme, il est possible de définir un affaiblissement de longueur unitaire ou un affaiblissement linéique indépendant de la longueur de la fibre:

$$a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \quad (\text{dB/ longueur unitaire}) \quad (1-5)$$

1.6.3 Dispersion modale de polarisation

1.6.3.1 le phénomène de dispersion modale de polarisation

La dispersion modale de polarisation (PMD, *polarization mode dispersion*) est le temps de propagation de groupe différentiel (DGD, *differential group delay time*) 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, *principal states of polarization*, voir 1.6.3.2). 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.

1.6.3.2 états de polarisation principaux (*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.

1.6.3.3 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.

1.6.3.4 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:

$$P_s = 2\left(\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2\right)^{1/2} = 2\left(\frac{\int I(t)t^2 dt}{\int I(t)dt} - \left(\frac{\int I(t)t dt}{\int I(t)dt}\right)^2\right)^{1/2} \quad (1-6)$$

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 2.7.3.

Le temps de propagation de groupe différentiel moyen P_m est le temps de propagation de groupe différentiel $\delta\tau(v)$ entre les états de polarisation principaux moyennés sur l'intervalle fréquentiel optique (v_1, v_2):

$$P_m = \frac{v_1 \int_{v_1}^{v_2} \delta\tau(v) cv}{v_2 - v_1} \quad (1-7)$$

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:

$$P_r = \left(\frac{\int_{v_1}^{v_2} \delta\tau(v)^2 dv}{v_2 - v_1}\right)^{1/2} \quad (1-8)$$

1.6.3.5 Coefficient de dispersion modale de polarisation

On distinguera deux cas:

- le couplage modal faible (fibres courtes):

$$PMD_c [ps / km] = P_s / L, P_m / L, \text{ ou } P_r / L \quad (1-9)$$

- le couplage modal fort (fibres longues):

$$PMD_c [ps / \sqrt{km}] = P_s / \sqrt{L}, P_m / \sqrt{L}, \text{ ou } P_r / \sqrt{L} \quad (1-10)$$

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 1-10.

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 qualité de fonctionnement 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 qualité de fonctionnement réelle du système.

2 Méthodes de mesure pour les fibres monomodes

On spécifie en général la méthode de test de référence (RTM) 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.

2.1 Méthodes de test de référence du diamètre du champ de mode

2.1.1 Méthode de référence: exploration du champ lointain

2.1.1.1 Généralités

Le diamètre du champ de mode se détermine à partir de la distribution d'intensité du champ lointain, $F^2(\theta)$, conformément à la définition figurant au 1.3.2. Les limites d'intégration indiquées sont 0 et $\pi/2$, mais il est entendu que cette notation sous-entend la troncature des intégrales dans la limite de l'argument croissant. Alors que la valeur physique maximale de l'argument θ est $\pi/2$, les expressions à intégrer approchent rapidement zéro avant que cette valeur ne soit atteinte. L'erreur relative dans la détermination du diamètre de champ de mode, introduite par cette troncature, est examinée au 2.1.1.2.6.

2.1.1.2 Montage de mesure

La représentation schématique du montage de mesure est montrée à la Figure 1.

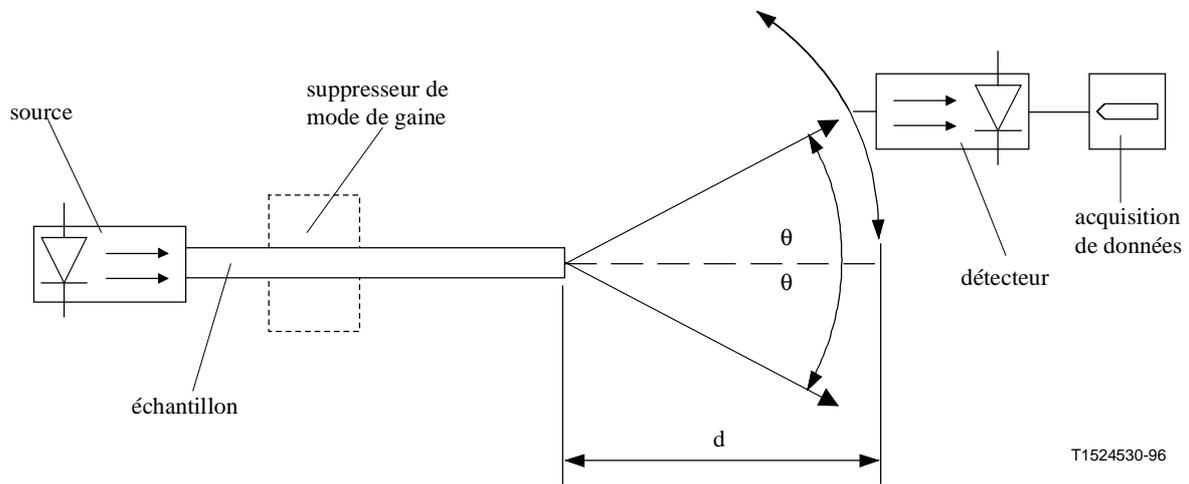


Figure 1/G.650 – Montage type d'exploration du champ lointain

2.1.1.2.1 Source lumineuse

La source lumineuse doit avoir une assise, une intensité et une longueur d'onde stables pendant une durée assez longue pour que l'on puisse mener à bien la mesure. On doit choisir pour la source des caractéristiques spectrales de nature à empêcher tout fonctionnement multimode. La largeur spectrale totale à mi-hauteur (FWHM) ne sera pas supérieure à 10 nm.

2.1.1.2.2 Modulation

Il est d'usage de moduler la source lumineuse pour améliorer le rapport signal/bruit dans le récepteur. Si cette procédure est adoptée, le détecteur sera relié à un système de traitement du signal synchronisé avec la fréquence de modulation de la source. Le système de détection doit avoir des caractéristiques de sensibilité essentiellement linéaires.

2.1.1.2.3 Conditions d'injection

Les conditions d'injection appliquées doivent être suffisantes pour exciter le mode fondamental (LP_{01}). On peut citer par exemple:

- l'injection par raccordement avec une fibre;
- l'injection avec un système optique approprié.

On doit veiller à ce que les modes d'ordre élevé ne se propagent pas. Il peut alors être nécessaire, pour les éliminer, d'introduire une boucle de rayon approprié ou un autre filtre de mode.

2.1.1.2.4 Suppresseur de mode de gaine

Des précautions doivent être prises pour empêcher la propagation et la détection des modes de gaine.

2.1.1.2.5 Echantillon

L'échantillon consistera en une courte longueur de la fibre à mesurer. On retirera le revêtement primaire de la section de fibre insérée dans le suppressor de mode, si on utilise un tel suppressor. Les extrémités des fibres doivent être propres, lisses et perpendiculaires à leurs axes. Il est recommandé que les faces extrêmes soient planes et perpendiculaires aux axes de la fibre à moins de 1° près.

2.1.1.2.6 Appareillage d'exploration

On utilisera un mécanisme pour explorer la distribution d'intensité du champ lointain (par exemple, un photodétecteur balayeur à micro-ouverture ou un photodétecteur balayeur hélicoïdal). Le détecteur doit être placé à 10 mm au moins de l'extrémité de la fibre, et la zone active du détecteur ne doit pas sous-tendre un angle trop important dans le champ lointain. Cela peut être assuré en plaçant le détecteur à une distance de l'extrémité de la fibre supérieure à $40wb/\lambda$, où $2w$ est le diamètre du champ de mode attendu de la fibre à mesurer et b le diamètre de la zone active du détecteur.

La dynamique minimale de la mesure doit être de 50 dB. Cette valeur correspond à un demi-angle d'exploration maximal de 20° et 25° , ou plus, pour les fibres des Recommandations G.652 et G.653 respectivement.

NOTE 1 – En diminuant la dynamique nécessaire (ou le demi-angle d'exploration maximal), on risque d'introduire des erreurs. Par exemple, si on limite ces valeurs à 30 dB et $12,5^\circ$ pour les fibres G.652, et à 40 dB et 20° pour les fibres G.653, la détermination du diamètre du champ de mode risque d'être entachée d'une erreur relative de plus de 1%.

NOTE 2 – Les considérations développées pour les fibres G.652 s'appliquent aussi aux fibres G.654.

2.1.1.2.7 Détecteur

On utilisera un détecteur approprié. Les caractéristiques de sensibilité de ce détecteur doivent être linéaires.

2.1.1.2.8 Amplificateur

Il convient d'employer un amplificateur afin d'augmenter le niveau du signal.

2.1.1.2.9 Acquisition des données

Le niveau du signal mesuré doit être enregistré et traité de façon appropriée.

2.1.1.3 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.

On utilisera la procédure suivante: en explorant le détecteur par échelons fixes inférieurs ou égaux à $0,5^\circ$, on mesure la distribution d'intensité du champ lointain, $F^2(\theta)$, et on calcule le diamètre du champ de mode à partir de l'équation 1-1.

2.1.1.4 Présentation des résultats

- a) Le montage de mesure, la dynamique du système de mesure, les algorithmes de traitement ainsi qu'une description des appareils destinés à l'exploration (y compris l'angle d'exploration).
- b) Les conditions d'injection.
- c) La longueur d'onde et la largeur spectrale totale 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) Le diamètre du champ de mode.

2.1.2 Autre méthode possible (n° 1): technique de l'ouverture variable

2.1.2.1 Généralités

On détermine le diamètre de champ de mode d'après la fonction de transmission d'ouverture complémentaire, $a(x)$, ($x = D \cdot \text{tg } \theta$ étant le rayon de l'ouverture et D la distance entre l'ouverture et la fibre):

$$2w = (\lambda / \pi D) \left[\int_0^{\infty} a(x) \frac{x}{(x^2 + D^2)^2} dx \right]^{-1/2} \quad (2-1)$$

L'équivalence mathématique des équations 1-1 et 2-1 est valable dans l'approximation de petits angles θ . Dans le cas de cette approximation, l'équation 2-1 peut être obtenue à partir de l'équation 1-1 par intégration.

2.1.2.2 Montage de mesure

2.1.2.2.1 **Source lumineuse** (comme au 2.1.1.2.1)

2.1.2.2.2 **Modulation** (comme au 2.1.1.2.2)

2.1.2.2.3 **Conditions d'injection** (comme au 2.1.1.2.3)

2.1.2.2.4 **Suppresseur de mode de gaine** (comme au 2.1.1.2.4)

2.1.2.2.5 **Echantillon** (comme au 2.1.1.2.5)

2.1.2.2.6 **Appareil de réglage de l'ouverture**

On utilisera 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 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.

2.1.2.2.7 **Détecteur** (comme au 2.1.1.2.7)

2.1.2.2.8 **Amplificateur** (comme au 2.1.1.2.8)

2.1.2.2.9 **Acquisition des données** (comme au 2.1.1.2.9)

2.1.2.3 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 procédure est la suivante: on mesure la puissance $P(x)$ transmise par chaque ouverture et on calcule la fonction complémentaire de transmission d'ouverture, $a(x)$, à l'aide de la formule:

$$a(x) = 1 - \frac{P(x)}{P_{\max}} \quad (2-2)$$

où P_{\max} désigne la puissance transmise par la plus grande ouverture et x , le rayon de l'ouverture. Le diamètre du champ de mode se calcule à l'aide de l'équation 2-1.

2.1.2.4 Présentation des résultats

Les résultats comporteront les précisions suivantes:

- a) Le montage de mesure, la dynamique du système de mesure, les algorithmes de traitement, ainsi qu'une description de l'appareil de réglage de l'ouverture (y compris l'ouverture NA).
- b) Les conditions d'injection.
- c) La longueur d'onde et la largeur spectrale totale 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) Le diamètre du champ de mode.

2.1.3 Autre méthode possible de test (n° 2): exploration du champ proche

2.1.3.1 Généralités

On détermine le diamètre du champ de mode à partir de la distribution de l'intensité du champ proche, $f^2(r)$, (r étant la coordonnée radiale):

$$2w = 2 \left[\frac{\int_0^{\infty} r f^2(r) dr}{\int_0^{\infty} r \left[\frac{df(r)}{dr} \right]^2 dr} \right]^{1/2} \quad (2-3)$$

L'équivalence mathématique des équations 1-1 et 2-3 est valable dans l'approximation de petits angles θ . Dans ce cas, le champ proche $f(r)$ et le champ lointain $F(\theta)$ forment une paire de Hankel. Au moyen de la transformée de Hankel, on peut passer de l'équation 1-1 à l'équation 2-3 et inversement.

2.1.3.2 Montage de mesure

2.1.3.2.1 Source lumineuse (comme au 2.1.1.2.1)

2.1.3.2.2 Modulation (comme au 2.1.1.2.2)

2.1.3.2.3 Conditions d'injection (comme au 2.1.1.2.3)

2.1.3.2.4 Supprimeur de mode de gaine (comme au 2.1.1.2.4)

2.1.3.2.5 Echantillon (comme au 2.1.1.2.5)

2.1.3.2.6 Appareil d'exploration

On emploiera un système optique grossissant (par exemple un objectif de microscope) pour projeter une image agrandie du champ proche de la fibre sur le plan d'un détecteur à balayage (par exemple, un photodétecteur à balayage comportant une ouverture des dimensions d'un trou d'aiguille ou un photodétecteur à balayage muni d'une amorce). On choisira une ouverture numérique et un grossissement compatibles avec la résolution spatiale souhaitée. Pour l'étalonnage, il faudra que le

grossissement du système optique ait été mesuré au préalable lors de l'exploration d'un échantillon dont les dimensions sont connues indépendamment avec une précision suffisante.

2.1.3.2.7 Détecteur (comme au 2.1.1.2.7)

2.1.3.2.8 Amplificateur (comme au 2.1.1.2.8)

2.1.3.2.9 Acquisition des données (comme au 2.1.1.2.9)

2.1.3.3 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 procédure est la suivante: le champ proche de la fibre est agrandi par le système optique grossissant et mis au point sur le plan du détecteur. La mise au point sera accomplie avec la précision maximale en vue de réduire les erreurs dimensionnelles dues à l'exploration d'une image floue. La distribution d'intensité du champ proche, $f^2(r)$, est explorée et le diamètre du champ de mode est calculé à partir de l'équation 2-3. On pourra aussi transformer la distribution d'intensité du champ proche $f^2(r)$ dans le domaine du champ lointain en utilisant une transformée de Hankel et utiliser le champ éloigné transformé résultant, $F^2(\theta)$, pour calculer le diamètre du champ de mode à partir de l'équation 1-1.

NOTE – Faire la distinction entre la coordonnée radiale r dans la face d'extrémité de la fibre et la coordonnée radiale M_r du détecteur à balayage dans le plan de l'image, dans laquelle M est le grossissement.

2.1.3.4 Présentation des résultats

- a) Le montage de mesure, la dynamique du système de mesure, les algorithmes de traitement ainsi qu'une description des dispositifs d'imagerie et d'exploitation utilisés.
- b) Les conditions d'injection.
- c) La longueur d'onde et la largeur spectrale totale 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 grossissement de l'appareil.
- g) Le type et les dimensions du détecteur.
- h) La température de l'échantillon et les conditions ambiantes (lorsque cela est nécessaire).
- i) L'indication de la précision et de la reproductibilité des mesures.
- j) Le diamètre du champ de mode.

2.2 Méthodes de test du diamètre de la gaine, de l'erreur de concentricité du champ de mode et de la non-circularité de la gaine

2.2.1 Méthode de test de référence: technique du champ proche émis

2.2.1.1 Généralités

Les caractéristiques géométriques sont déterminées à partir de la distribution d'intensité du champ proche, selon les définitions données aux 1.3.4, 1.4.3 et 1.4.6.

2.2.1.2 Montage de mesure

Un schéma du montage de mesure est représenté à la Figure 2.

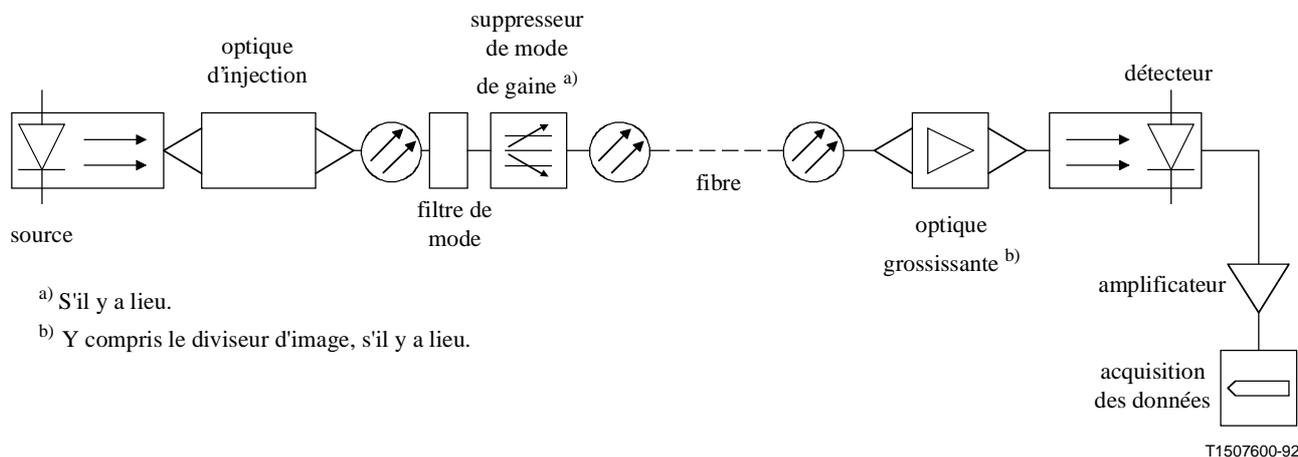


Figure 2/G.650 – Montage type de mesure du champ proche émis

2.2.1.2.1 Source lumineuse

Pour éclairer le cœur, on utilisera une source lumineuse dont la longueur d'onde normalisera de 1310 nm ou 1550 nm, d'intensité réglable, respectivement pour les fibres G.652 ou G.653 et G.654. Son assise, son intensité et sa longueur d'onde doivent être stables pendant une durée assez longue pour que l'on puisse mener à bien la mesure. On doit choisir les caractéristiques spectrales de manière à empêcher tout fonctionnement multimode. Une deuxième source lumineuse ayant des caractéristiques similaires peut être utilisée, si nécessaire, pour éclairer la gaine. Les caractéristiques spectrales de la deuxième source lumineuse ne doivent pas dérégler l'image.

2.2.1.2.2 Conditions d'injection

L'optique d'injection qui sera utilisée pour la surinjection de la fibre donnera un faisceau de lumière focalisé sur l'extrémité d'entrée plate de la fibre.

2.2.1.2.3 Filtre de mode

Au cours de la mesure, il est nécessaire d'assurer un fonctionnement monomode à la longueur d'onde de mesure. A cette fin, il faudra peut être courber la fibre en amont pour éliminer le mode LP_{11} .

2.2.1.2.4 Suppresseur de mode de gaine

Un suppresseur de mode de gaine approprié sera utilisé pour interrompre la propagation du rayonnement optique dans la gaine. Ce suppresseur ne doit pas être en fonction si l'on mesure les caractéristiques géométriques de la seule gaine.

2.2.1.2.5 Echantillon

L'échantillon doit être un court segment de la fibre optique à mesurer. Les extrémités de la fibre doivent être propres, lisses et perpendiculaires à l'axe.

2.2.1.2.6 Optique de grossissement

L'équipement optique de grossissement sera composé d'un système optique (par exemple un objectif de microscope) qui agrandit le champ proche à la sortie de l'échantillon en le focalisant dans le plan du détecteur d'exploration. L'ouverture numérique, et par conséquent le pouvoir de résolution de l'optique, doit être compatible avec la précision de mesure requise et ne pas être inférieure à 0,3. Le grossissement doit être choisi de façon à être compatible avec la résolution spatiale souhaitée et doit être consigné.

2.2.1.2.7 Détecteur

Il faut employer un détecteur approprié qui fournit l'intensité point à point du ou des diagrammes du champ proche émis. Par exemple, l'un des moyens suivants peut être utilisé:

- a) photodétecteur d'exploration avec ouverture en trou d'épingle;
- b) miroir d'exploration avec ouverture en trou d'épingle et photodétecteur fixes;
- c) tube vidicon d'exploration, dispositifs CCD ou autres dispositifs de reconnaissance des formes/intensités.

Le détecteur doit avoir un fonctionnement linéaire (ou devra être linéarisé) pour toute la gamme des intensités rencontrées.

2.2.1.2.8 Amplificateur

Un amplificateur peut être employé pour augmenter le niveau du signal. La largeur de bande de l'amplificateur sera choisie en fonction du type d'exploration utilisé. Lorsqu'on explore l'extrémité de sortie de la fibre avec des systèmes mécaniques ou optiques, on module généralement la source optique. Si cette procédure est adoptée, l'amplificateur doit être calé sur la fréquence de modulation de la source.

2.2.1.2.9 Acquisition des données

On peut enregistrer la distribution d'intensité mesurée, la traiter et la présenter sous une forme appropriée, conformément à la technique d'exploration et aux spécifications.

2.2.1.3 Procédure de mesure

2.2.1.3.1 Etalonnage de l'équipement

Pour l'étalonnage de l'équipement, il faut mesurer le grossissement du système optique en explorant l'image d'un échantillon dont les dimensions sont déjà connues avec une bonne précision.

Cet agrandissement doit être consigné.

2.2.1.3.2 Mesure

L'extrémité d'injection de la fibre doit être alignée sur le faisceau d'injection et l'extrémité de sortie de la fibre sur l'axe de l'équipement optique de grossissement. Pour la mesure du champ proche émis, la ou les images focalisées de l'extrémité de sortie de la fibre doivent être analysées par le détecteur, conformément aux spécifications. La mise au point doit être faite avec une précision maximale afin de réduire les erreurs de dimensions dues à l'analyse d'une image floue. Les paramètres géométriques souhaités sont alors calculés conformément aux définitions.

Les algorithmes pour la définition des arêtes et le calcul des paramètres géométriques sont à l'étude.

2.2.1.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure, avec indication de la technique d'exploration utilisée.
- b) Conditions d'injection.
- c) Caractéristiques spectrales de la ou des sources.
- d) Identification et longueur de la fibre.
- e) Type de filtre de mode (le cas échéant).
- f) Grossissement de l'optique utilisée.
- g) Type et dimensions du détecteur d'exploration.
- h) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

- i) Indication de la précision et de la reproductibilité des mesures.
- j) Paramètres dimensionnels qui en résultent tels que le diamètre de la gaine, la non-circularité de la gaine, l'erreur de concentricité du champ de mode, etc.

2.2.2 Autre méthode de test possible (n° 1): technique du champ proche réfracté

2.2.2.1 Généralités

La mesure du champ proche réfracté donne directement la distribution de l'indice de réfraction dans toute la fibre (cœur et gaine). On peut obtenir les caractéristiques géométriques de la fibre à partir de la distribution de l'indice de réfraction en utilisant des algorithmes appropriés.

2.2.2.2 Montage de mesure

Un diagramme schématique de la méthode de mesure est représenté à la Figure 3. Cette technique consiste à faire balayer un point lumineux focalisé sur l'extrémité de la fibre. L'équipement optique est disposé de manière à couvrir largement l'ouverture numérique de la fibre tout en la débordant. L'extrémité de la fibre est plongée dans un liquide dont l'indice est légèrement supérieur à celui de la gaine. Une partie de la lumière est piégée dans la fibre et l'autre partie apparaît sous la forme d'un cône creux à l'extérieur de la fibre. Un disque opaque est placé sur l'axe optique du cœur, de sorte que seule la lumière réfractée atteigne le détecteur.

La résolution optique et, par conséquent, l'aptitude à distinguer les détails géométriques de la fibre dépendent des dimensions du point lumineux focalisé. Cette résolution dépend de l'ouverture numérique de la lentille de focalisation et des dimensions du disque. Toutefois, on peut repérer de très petits détails avec bien plus de précision selon le pas des systèmes à moteur pas-à-pas ou de la précision de commande de la position des commandes analogiques.

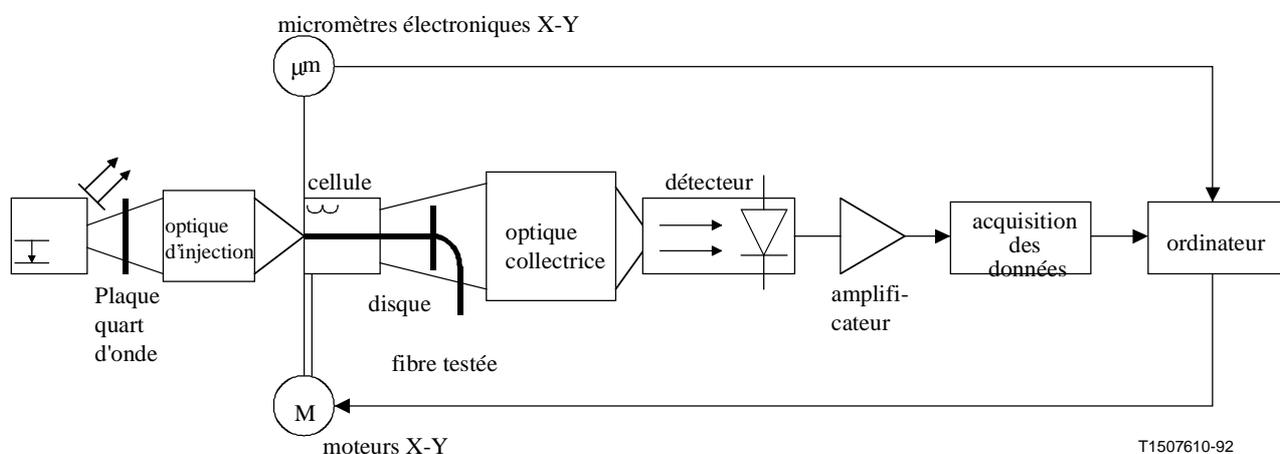


Figure 3/G.650 – Configuration type du montage de mesure du champ proche réfracté

2.2.2.2.1 Source

Il faut un laser stable, de type HeNe par exemple, fournissant une puissance d'environ 1 mW dans le mode TEM₀₀.

Une lame quart-d'onde est introduite pour transformer la polarisation rectiligne en polarisation circulaire car la réflexion de la lumière à l'interface air-verre dépend fortement de l'angle et de la polarisation.

2.2.2.2.2 Conditions d'injection

L'optique d'injection, conçue de manière à couvrir largement l'ouverture numérique de la fibre, focalise le faisceau de lumière sur l'extrémité plate de la fibre. L'axe optique du faisceau de lumière doit être situé à moins d'un degré de l'axe de la fibre. La résolution de l'équipement est déterminée par la dimension du point focalisé, qui doit être la plus petite possible pour maximiser la résolution, c'est-à-dire inférieure à 1,0 μm . L'équipement permet d'explorer par balayage le point lumineux sur tout le diamètre de la fibre.

2.2.2.2.3 Cellule

La cellule doit contenir un liquide ayant un indice de réfraction légèrement plus élevé que celui de la gaine. La position de la cellule sera réglée par des moteurs X-Y pilotés par l'ordinateur et détectée par des micromètres X-Y.

2.2.2.2.4 Détection

La lumière réfractée est recueillie par une optique collectrice appropriée et envoyée sur le détecteur, à condition que toute la lumière réfractée y soit rassemblée. Les dimensions requises du disque et sa position le long de l'axe central peuvent être déterminées par calcul.

2.2.2.2.5 Acquisition des données

La distribution d'intensité mesurée peut être enregistrée, traitée et présentée sous une forme adéquate, en fonction de la technique d'exploration et des spécifications. On utilisera un ordinateur pour piloter les moteurs X-Y, enregistrer la position X-Y de la cellule ainsi que les niveaux de puissance correspondants et traiter les données mesurées.

2.2.2.3 Procédure

Il faut se reporter au schéma du montage de mesure (Figure 3).

2.2.2.3.1 Préparation de la fibre à mesurer

Il faut une fibre de longueur inférieure à 2 m.

Le revêtement primaire est retiré sur la longueur de fibre plongeant dans la cellule contenant le liquide.

Les extrémités de la fibre doivent être propres, lisses et perpendiculaires à l'axe.

2.2.2.3.2 Etalonnage de l'équipement

L'équipement est étalonné avec la fibre retirée de la cellule contenant le liquide. Au cours des mesures, l'angle du cône de lumière varie selon l'indice de réfraction vu au point d'entrée de la fibre (d'où le changement de puissance passant par le disque). Lorsque la fibre a été retirée de la cellule contenant le liquide et que l'on connaît l'indice du liquide et l'épaisseur de la cellule, on peut simuler cette variation d'angle en translatant le disque le long de l'axe optique. En déplaçant le disque sur un certain nombre de positions prédéterminées, on peut mesurer la variation de la puissance et tracer le profil d'indice relatif. L'indice absolu ne peut être déterminé que si l'indice de la gaine ou celui du liquide est connu de manière précise, à la longueur d'onde et à la température de la mesure.

Des méthodes d'étalonnage plus commodes peuvent être mises en œuvre à l'aide d'une tige mince dont on connaît l'indice de réfraction constant ou d'une fibre multimode à plusieurs échelons d'indice dont les diverses valeurs d'indice de réfraction sont connues avec une grande précision. Cette dernière technique peut être également utile pour vérifier la linéarité des appareils. Il peut être également utile, à cet égard, de vérifier la température du liquide placé dans la cellule.

2.2.2.3.3 Balayage récurrent

L'extrémité d'injection de la fibre à mesurer est plongée dans la cellule contenant le liquide et le faisceau laser est simultanément centré et focalisé sur l'extrémité de la fibre.

Le disque est centré sur le cône de sortie. Les modes réfractés passant par le disque sont recueillis et focalisés sur le détecteur.

A l'aide du faisceau laser focalisé, on explore la section de l'extrémité de la fibre et on obtient directement une distribution bidimensionnelle de l'indice de réfraction de la fibre. A partir de cette distribution, on calcule les caractéristiques géométriques de la fibre.

2.2.2.3.4 Caractéristiques géométriques

Une fois que l'exploration récurrente de l'indice de réfraction a été effectuée, on obtient le contour du cœur en prenant les points à l'interface gaine-cœur de l'indice de réfraction qui coïncident avec la valeur médiane entre les indices de réfraction moyens du cœur, d'une part, et de la gaine, d'autre part. Le contour de la gaine est déterminé d'une manière similaire mais à l'interface gaine-liquide adaptateur d'indice. On effectuera, à partir des données relatives aux contours du cœur et de la gaine, des analyses de géométrie conformément aux dispositions du paragraphe 1. L'erreur de concentricité du champ de mode sera évaluée sur la base de l'erreur de concentricité cœur-gaine.

2.2.2.4 Présentation des résultats

- a) Dispositif de mesure avec indication de la technique d'exploration utilisée.
- b) Identification de la fibre.
- c) Diamètre de la gaine.
- d) Erreur de concentricité du champ de mode.
- e) Non-circularité de la gaine.
- f) Diamètre du cœur (le cas échéant).
- g) Exploration récurrente de la section complète de la fibre (le cas échéant).
- h) Indication de la précision et de la reproductibilité des mesures.
- i) Température de la cellule et conditions d'environnement (le cas échéant).

2.2.3 Autre méthode test possible (n° 2): technique de la visée latérale

2.2.3.1 Généralités

La méthode de la visée latérale est appliquée aux fibres monomodes afin de déterminer les paramètres géométriques [l'erreur de concentricité du champ de mode (MFCE, *mode field concentricity error*), le diamètre de la gaine optique et la non-circularité de la gaine optique] en mesurant la distribution d'intensité de la lumière réfractée à l'intérieur de la fibre. Cette méthode permet de mesurer en réalité l'erreur de concentricité du cœur, qui est en général une bonne approximation de l'erreur de concentricité du champ de mode.

2.2.3.2 Montage de mesure

Un schéma du montage de mesure est représenté à la Figure 4.

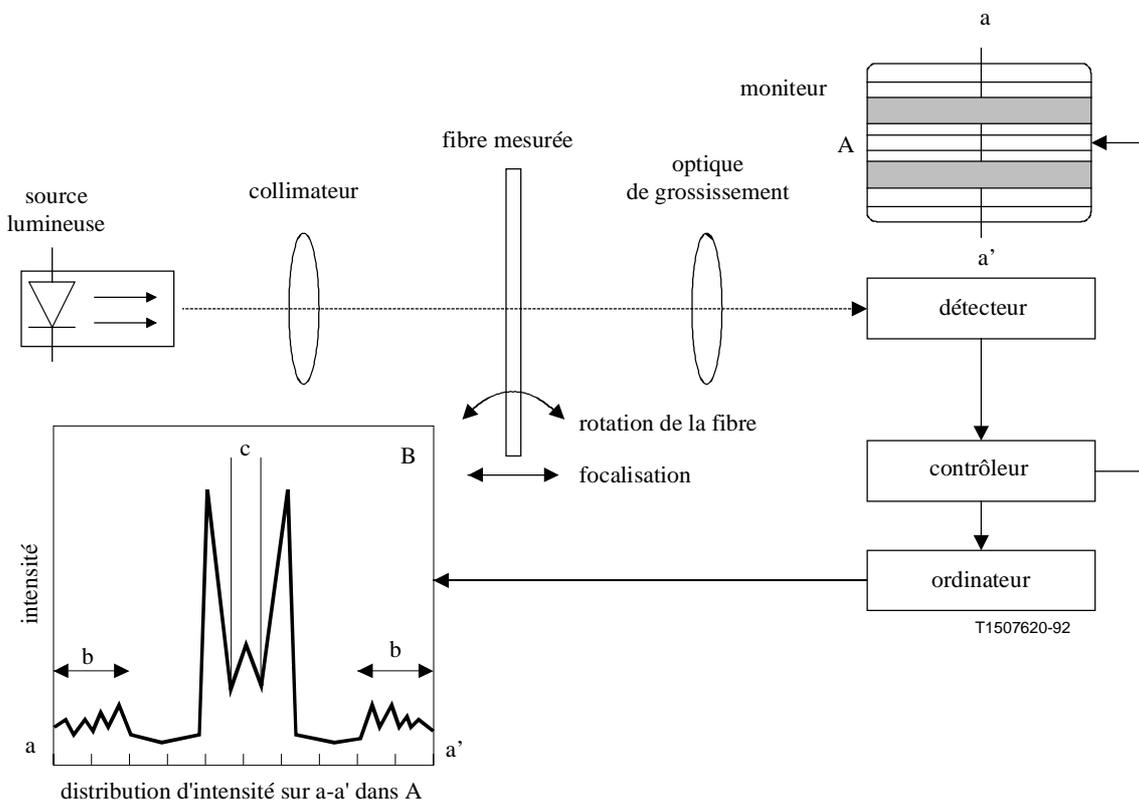


Figure 4/G.650 – Schéma du montage de mesure en visée latérale

2.2.3.2.1 Source lumineuse

La lumière émise doit être collimatée et réglable en intensité; sa position, son intensité et sa longueur d'onde doivent être stables sur une période assez longue pour que l'on puisse mener à bien la procédure de mesure. Une source lumineuse stable et de forte intensité telle qu'une diode électroluminescente (LED, *light emitting diode*) peut être utilisée.

2.2.3.2.2 Echantillon

L'échantillon à mesurer doit être une fibre monomode de faible longueur. Le revêtement primaire sera éliminé de la section observée. La surface de la fibre doit être maintenue propre pendant les mesures.

2.2.3.2.3 Optique de grossissement

L'optique de grossissement doit se composer d'un système optique (par exemple, un objectif de microscope) qui agrandit la distribution d'intensité de la lumière réfractée à l'intérieur de la fibre dans le plan du détecteur d'exploration. Le plan d'observation doit être fixé à une distance déterminée en avant de l'axe de la fibre. Le grossissement doit être choisi de manière à être compatible avec la résolution spatiale désirée et doit être consigné.

2.2.3.2.4 Détecteur

Un détecteur approprié sera utilisé afin de déterminer la distribution d'intensité agrandie dans le plan d'observation sur une ligne perpendiculaire à l'axe de la fibre. On utilisera un tube vidicon ou un dispositif CCD. Le détecteur doit avoir des caractéristiques linéaires dans la gamme de mesures requise. La résolution du détecteur doit être compatible avec la résolution spatiale désirée.

2.2.3.2.5 Traitement des données

On utilisera un ordinateur et le logiciel approprié pour analyser les distributions d'intensité.

2.2.3.3 Procédure de mesure

2.2.3.3.1 Etalonnage de l'équipement

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

2.2.3.3.2 Mesure

La fibre à mesurer est fixée dans le porte-échantillon et placée dans le système de mesure. Elle est positionnée de telle sorte que son axe soit perpendiculaire à l'axe optique du système de mesure.

Les distributions d'intensité dans le plan d'observation sur la ligne perpendiculaire à l'axe de la fibre (a-a' dans A de la Figure 4) sont enregistrées (indiquées comme B) pour différentes directions de visée, en faisant pivoter la fibre autour de son axe, la distance entre l'axe de la fibre et le plan d'observation demeurant constante. Le diamètre de la gaine optique et la position centrale de la fibre sont déterminés par analyse de la symétrie de la distribution radiale de l'intensité dans l'image agrandie (indiqué par b dans B). La position centrale du cœur est déterminée par analyse de la distribution d'intensité de la lumière après convergence (indiquée par c). La distance entre la position centrale de la fibre et celle du cœur correspond à la valeur nominale observée de l'erreur de concentricité du champ de mode (MFCE).

Comme le montre la Figure 5, en ajustant la courbe de la fonction sinusoïdale aux valeurs de MFCE obtenues expérimentalement en fonction de l'angle de rotation, on peut calculer la MFCE effective en faisant le produit de l'amplitude maximale de la fonction sinusoïdale et du facteur d'agrandissement par rapport à l'effet de lentille dû à la structure cylindrique de la fibre. Le diamètre de la gaine optique est évalué sous la forme d'une valeur moyenne de diamètres de fibre mesurés à chaque angle de rotation, ce qui donne des valeurs maximales et minimales du diamètre permettant d'établir la valeur de la non-circularité de la gaine conformément à la définition.

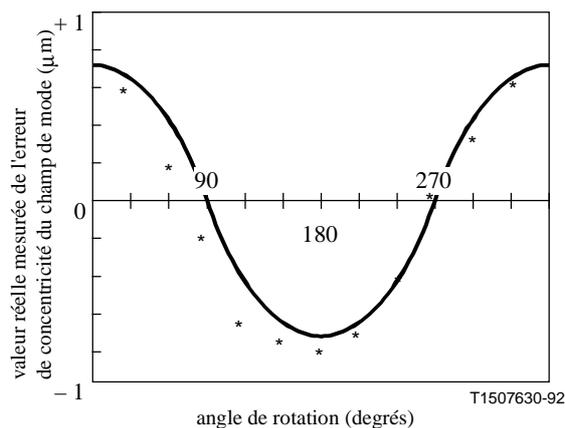


Figure 5/G.650 – Valeur mesurée de l'erreur de concentricité du champ de mode en fonction de l'angle de rotation

2.2.3.4 Présentation des résultats

- Montage de mesure.

- b) Identification de la fibre.
- c) Caractéristiques spectrales de la source.
- d) Indication de la précision et de la reproductibilité des mesures.
- e) Courbe de l'erreur de concentricité du champ de mode en fonction de l'angle de rotation.
- f) Erreur de concentricité du champ de mode, diamètre de la gaine optique et non-circularité de la gaine optique.
- g) Température de l'échantillon et conditions ambiantes (si nécessaire).

2.2.4 Autre méthode de test possible (n° 3): technique de l'image du champ proche transmis

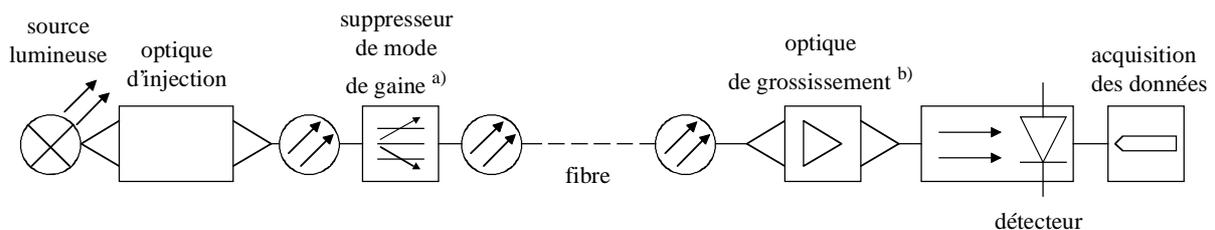
2.2.4.1 Généralités

On utilisera la technique de l'image du champ proche transmis pour la mesure des caractéristiques géométriques des fibres optiques monomodes. Ces mesures sont effectuées en conformité avec les définitions correspondantes.

La mesure est fondée sur l'analyse de la ou des images agrandies de l'extrémité de sortie de la fibre étudiée.

2.2.4.2 Montage de mesure

Un schéma du montage de mesure est représenté à la Figure 6.



a) S'il y a lieu.

b) Y compris le diviseur d'image, s'il y a lieu.

T1507640-92

Figure 6/G.650 – Montage type pour la mesure du champ proche transmis

2.2.4.2.1 Source lumineuse

Pour éclairer le cœur, on utilisera une source lumineuse d'intensité réglable, dont l'assise et l'intensité sont stables pendant une durée assez longue pour que l'on puisse mener à bien la procédure de mesure. Une deuxième source lumineuse ayant des caractéristiques similaires peut être utilisée, si nécessaire, pour éclairer la gaine. Les caractéristiques spectrales de la deuxième source lumineuse ne doivent pas dérégler l'image.

2.2.4.2.2 Conditions d'injection

L'optique d'injection, qui sera utilisée pour couvrir largement la fibre, donnera un faisceau de lumière focalisé sur l'extrémité d'entrée plate de la fibre.

2.2.4.2.3 Supprimeur de mode de gaine

Un supprimeur de mode de gaine approprié peut être utilisé pour supprimer toute propagation du rayonnement optique dans la gaine. Si l'on mesure seulement les caractéristiques géométriques de la gaine, il ne faudra pas utiliser de supprimeur de mode de gaine.

2.2.4.2.4 Echantillon

L'échantillon doit être un court segment de la fibre optique à mesurer. Les extrémités de la fibre doivent être propres, lisses et perpendiculaires à l'axe.

2.2.4.2.5 Optique de grossissement

L'optique de grossissement sera composée d'un système optique (par exemple, un objectif de microscope) qui agrandit le champ proche à la sortie de l'échantillon. L'ouverture numérique, et par conséquent le pouvoir de résolution de l'optique, doit être compatible avec la précision de mesure requise et ne pas être inférieure à 0,3. Le grossissement sera choisi de façon à être compatible avec la résolution spatiale souhaitée, et sera consigné.

Un diviseur d'image peut compléter l'optique de grossissement pour améliorer la précision des mesures.

2.2.4.2.6 Détection

L'image de la fibre sera examinée et/ou analysée. On peut, par exemple, appliquer l'une des techniques suivantes:

- a) division d'image;
- b) analyse de l'échelle des gris d'une image enregistrée électroniquement.

2.2.4.2.7 Acquisition des données

Les données peuvent être enregistrées, traitées et présentées sous une forme appropriée, en fonction de la technique utilisée et des besoins.

2.2.4.3 Procédure de mesure

2.2.4.3.1 Etalonnage de l'équipement

Pour l'étalonnage de l'équipement, il faut mesurer le grossissement du système optique en explorant l'image d'un échantillon dont les dimensions sont déjà connues avec une bonne précision. Cet agrandissement doit être consigné.

2.2.4.3.2 Mesure

L'extrémité d'injection de la fibre doit être alignée avec le faisceau d'injection et l'extrémité de sortie de la fibre avec l'axe de l'optique de grossissement. Pour la mesure de champ proche émis, la ou les images focalisées de l'extrémité de sortie de la fibre doivent être examinées, conformément aux spécifications. Les erreurs dues à une défocalisation devraient être minimisées afin de réduire les erreurs sur la mesure des dimensions. Les paramètres géométriques souhaités sont alors calculés.

2.2.4.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure, avec indication de la technique utilisée.
- b) Conditions d'injection.
- c) Caractéristiques spectrales de la source.
- d) Identification et longueur de la fibre.
- e) Agrandissement de l'optique.
- f) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).
- g) Indication de la précision et de la reproductibilité des mesures.
- h) Paramètres dimensionnels qui en résultent, tels que le diamètre de la gaine, la non-circularité de la gaine, l'erreur de concentricité du champ de mode, etc.

2.3 Méthodes de test de la longueur d'onde de coupure

2.3.1 Méthode de test de référence de la longueur d'onde de coupure (λ_c) d'une fibre sous revêtement primaire et de celle des câbles de jarretière (λ_{c_j}): technique de la puissance émise

2.3.1.1 Généralités

La mesure de la longueur d'onde de coupure des fibres monomodes a pour but de garantir leur fonctionnement monomodal effectif au-dessus d'une longueur d'onde spécifiée.

Cette méthode utilise la variation en fonction de la longueur d'onde de la puissance émise sur un court segment de la fibre à étudier et ce, dans des conditions définies, par rapport à une puissance de référence émise. Il existe deux façons d'obtenir cette puissance de référence:

- a) la fibre à mesurer est dotée d'une boucle de rayon plus faible; ou
- b) on prend un court segment (1 à 2 m) d'une fibre multimode.

NOTE – En général, la présence d'un revêtement primaire sur la fibre n'influe pas sur la longueur d'onde de coupure. En revanche, la présence d'un revêtement secondaire peut donner une longueur d'onde de coupure nettement plus petite que celle d'une fibre avec son revêtement primaire.

La mesure peut être effectuée sur une fibre dotée d'un revêtement secondaire si l'examen de type de ce revêtement confirme que le revêtement en question n'influence pas de façon significative la longueur d'onde de coupure, à condition que le revêtement secondaire ait été convenablement déposé.

2.3.1.2 Montage de mesure

2.3.1.2.1 Source lumineuse

On utilisera une source lumineuse dont la largeur (spectrale à mi-hauteur) de la raie ne dépasse pas 10 nm; elle doit avoir une assise, une intensité et une longueur d'onde stables pendant une durée assez longue pour qu'on puisse mener à bien la procédure de mesure. Elle doit également être capable de fonctionner dans une plage de longueurs d'onde suffisante.

2.3.1.2.2 Modulation

Il est courant de moduler la source lumineuse pour améliorer le rapport signal/bruit dans le récepteur. Si cette procédure est adoptée, le détecteur doit être relié à un système de traitement du signal, synchronisé avec la fréquence de modulation de la source. Le système de détection doit être très sensiblement linéaire.

2.3.1.2.3 Conditions d'injection

Les conditions d'injection utilisées doivent être telles que les deux modes LP_{01} et LP_{11} soient excités de façon pratiquement uniforme. Par exemple, on pourrait utiliser comme techniques d'injection:

- a) le raccordement avec une fibre multimode; ou
- b) l'injection avec un système optique approprié, à gros point lumineux et grande ouverture numérique.

2.3.1.2.4 Suppresseur de mode de gaine

Le supprimeur de mode de gaine est un dispositif qui facilite la conversion des modes de gaine en modes de rayonnement; en conséquence, les modes de gaine sont supprimés de la fibre. Des précautions devront être prises afin d'éviter de perturber la propagation du mode LP_{11} .

2.3.1.2.5 Détecteur optique

On utilisera un détecteur approprié afin d'intercepter tous les rayonnements émergeant de la fibre. La réponse spectrale doit être compatible avec les caractéristiques spectrales de la source. Le détecteur doit être uniforme et avoir une sensibilité linéaire.

2.3.1.3 Procédure de mesure

2.3.1.3.1 Echantillon de mesure standard

On procède à la mesure sur une longueur de fibre de 2 mètres. On insère cet échantillon dans l'appareil de mesure en le recourbant de manière qu'il forme une boucle unique lâche faisant un tour circulaire complet de 140 mm de rayon. Le reste de la fibre doit être essentiellement libre de toute contrainte extérieure. Bien que quelques courbures accidentelles de plus grand rayon soient admissibles, elles ne doivent pas entraîner de changement significatif du résultat de la mesure. On enregistre la puissance de sortie $P_1(\lambda)$ en fonction de λ , dans une gamme suffisamment large de part et d'autre de la longueur d'onde de coupure attendue.

2.3.1.3.2 Transmission à travers l'échantillon de référence

On peut utiliser soit la méthode a), soit la méthode b).

- a) En utilisant l'échantillon de mesure et en maintenant les conditions d'injection fixes, on mesure une puissance de sortie $P_2(\lambda)$ sur la même gamme de longueurs d'onde avec, dans l'échantillon de mesure, au moins une boucle de rayon suffisamment petit pour filtrer le mode LP_{11} . Une valeur type pour ce rayon est de 30 mm.
- b) Avec une courte longueur (1 à 2 m) de fibre multimode, on mesure une puissance de sortie $P_3(\lambda)$ sur la même gamme de longueurs d'onde.

NOTE – La présence de modes de fuite peut causer une ondulation dans le spectre de transmission de la fibre multimode de référence et affecter le résultat. Pour atténuer ce problème, les conditions d'injection de la lumière peuvent être restreintes de façon à ne remplir que 70% du cœur de la fibre multimode et on peut utiliser une ouverture numérique ou un filtre de mode approprié.

2.3.1.3.3 Calculs

L'affaiblissement spectral de l'échantillon par rapport à la puissance de référence est:

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_c(\lambda)} \quad (2-4)$$

où $i = 2$ ou 3 , respectivement pour la méthode a) ou pour la méthode b).

En partant de l'hypothèse que la région des longueurs d'onde supérieures est représentée par une droite, l'écart des modes d'ordre élevé par rapport au mode fondamental est:

$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - (A_u + B_u \lambda) \quad (2-5)$$

A_u et B_u sont déterminés de telle manière que $(A_u + B_u \lambda)$ représente la partie de la courbe d'affaiblissement spectral aux longueurs d'onde situées au-dessus de la région où l'affaiblissement des modes d'ordre élevé est accéléré (région de transition). Pour la méthode a), A_u et B_u peuvent tous deux être fixés à zéro. Voir les Figures 7a et 8a.

NOTE – Dans le cas de la méthode a), la petite boucle de fibre de filtrage de mode élimine tous les modes sauf le mode fondamental pour les longueurs d'onde plus grandes que quelques dizaines de nm au-dessus de la longueur d'onde de coupure λ_c . Pour les longueurs d'onde de plusieurs centaines de nm au-dessus de λ_c , même le mode fondamental peut être fortement affaibli par la boucle. L'affaiblissement $a(\lambda)$ est égal au rapport logarithmique entre la puissance totale sortant de l'échantillon, y compris la puissance en mode LP_{11}

et la puissance en mode fondamental. Quand les modes sont uniformément excités conformément au 2.3.1.2.3, l'affaiblissement $a(\lambda)$ permet de déterminer également l'affaiblissement $A(\lambda)$, en dB en mode LP_{11} dans l'échantillon:

$$A(\lambda) = 10 \log \left[\left(\frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - 1 \right) / 2 \right] \quad (2-6)$$

2.3.1.3.4 Détermination de la longueur d'onde de coupure

Dans la région de transition, la puissance en mode d'ordre élevé diminue avec la longueur d'onde. La longueur d'onde de coupure de la fibre, λ_c , est définie comme étant la longueur d'onde à laquelle la puissance en mode d'ordre élevé par rapport à la puissance en mode fondamental, $\Delta a(\lambda)$, a été abaissée à 0,1 dB.

Les Figures 7b et 8b montrent les "bosses" qui apparaissent parfois près de la longueur d'onde de coupure. Si ces bosses sont absentes (voir les Figures 7a et 8a), on peut déterminer λ_c avec précision sans algorithme. Facultativement on peut, en présence de bosses, améliorer la précision en utilisant des algorithmes d'ajustement fondés sur les équations ci-après. L'Appendice I contient des exemples d'algorithmes de ce type.

$$\gamma(\lambda) = 10 \log \left[- \frac{10}{A} \log \left(\frac{10^{\Delta a(\lambda)/10} - 1}{\rho} \right) \right] \quad (2-7)$$

$$A = 10 \log \left[\rho / (10^{0.01} - 1) \right] \quad (2-8)$$

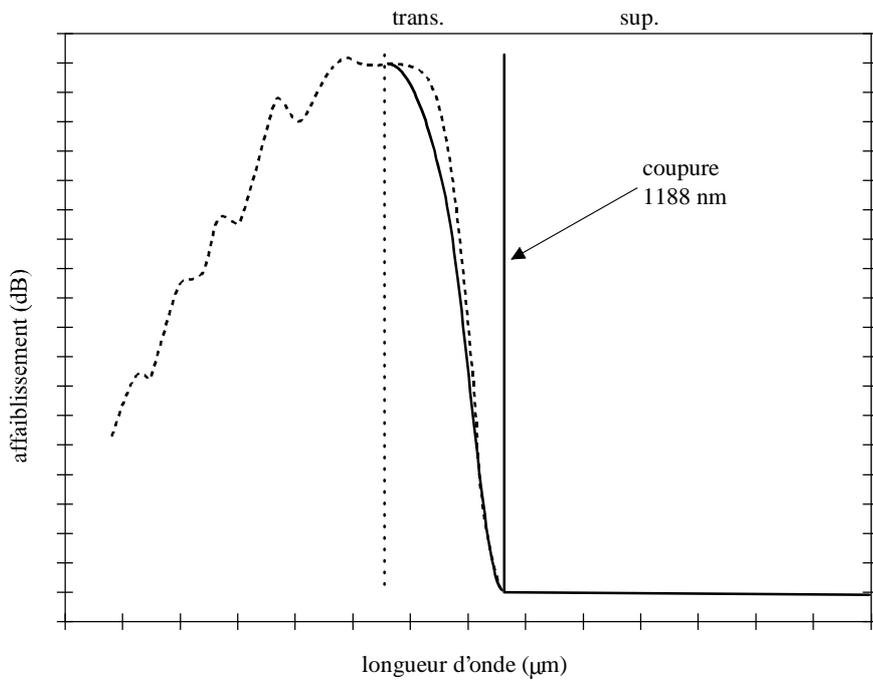
Sauf indication contraire, $\rho = 2$.

Quand les coefficients de:

$$A_t + B_t \lambda = -Y(\lambda) \quad (2-10)$$

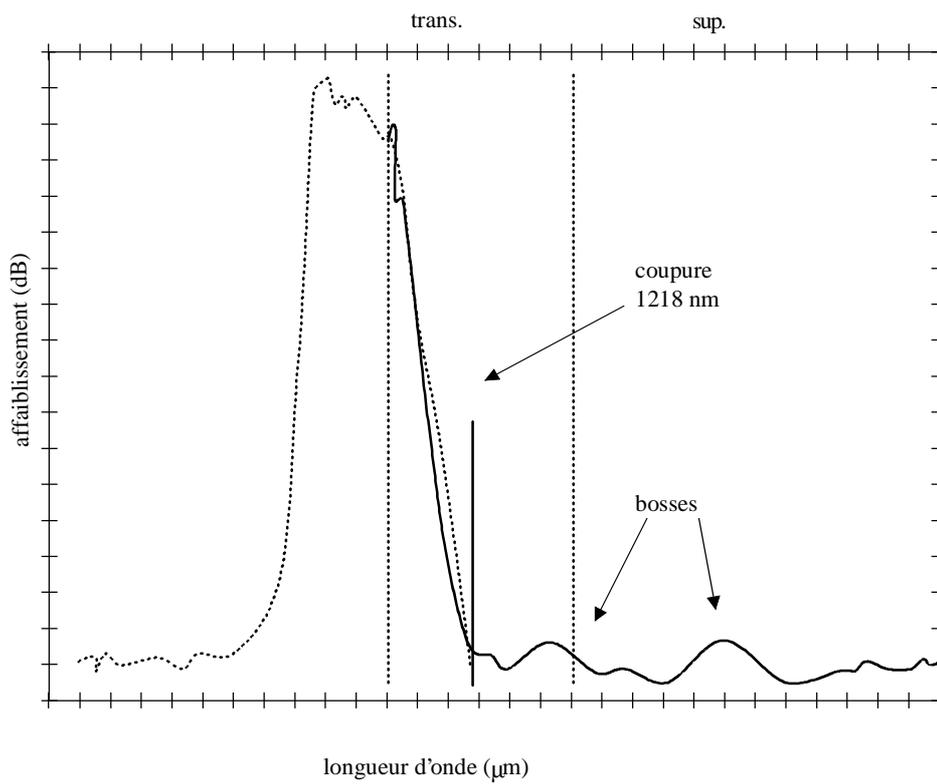
sont déterminés pour les longueurs d'onde dans la région de transition, alors:

$$\lambda_c = - \frac{A_t}{B_t} \quad (2-11)$$



T1524540-96

Figure 7a/G.650 – Fréquence de coupure de référence monomode



T1524550-96

Figure 7b/G.650 – Fréquence de coupure de référence monomode avec bosses

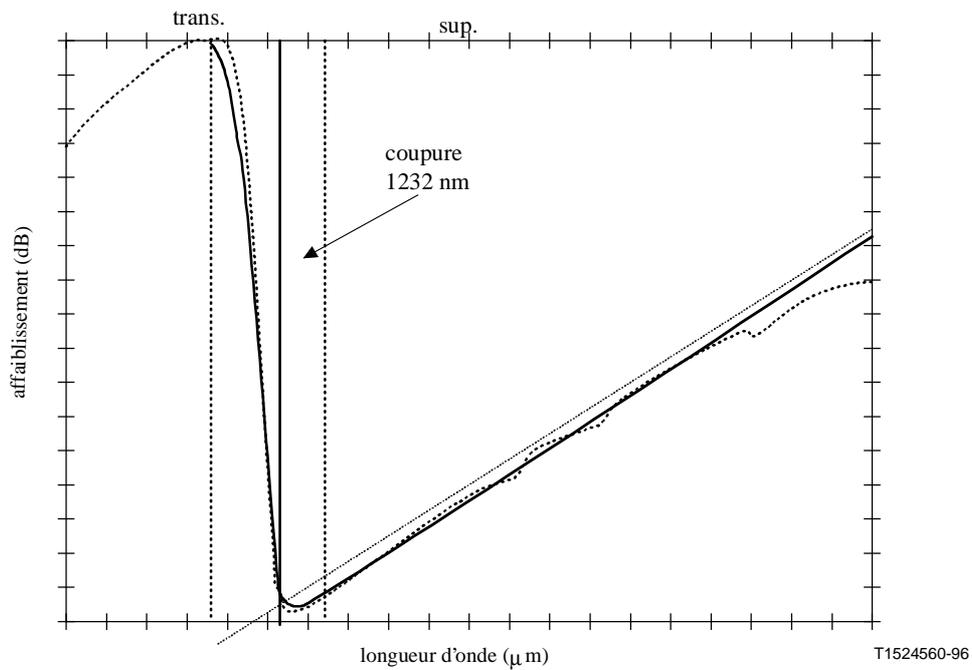


Figure 8a/G.650 – Fréquence de coupure de référence multimode

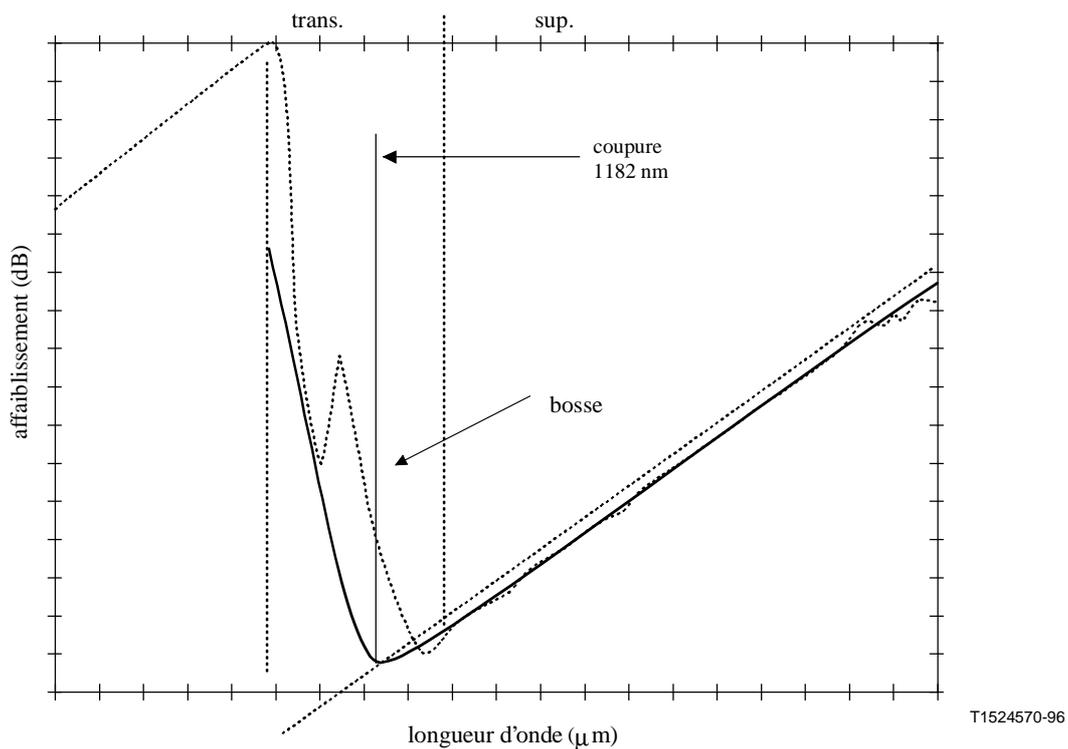


Figure 8b/G.650 – Fréquence de coupure de référence multimode avec bosse

NOTE – D'après la définition, l'affaiblissement en mode LP_{11} dans l'échantillon est de 19,3 dB à la longueur d'onde de coupure.

2.3.1.4 Longueur d'onde de coupure du câble de jarretière

La longueur d'onde de coupure du câble de jarretière est mesurée avec les mêmes appareils, procédures et calculs que la longueur d'onde de coupure de la fibre, avec les exceptions suivantes:

- 1) le câble de jarretière étudié comporte les revêtements secondaires utilisés en conditions réelles;
- 2) le rayon de courbure est de X mm.

NOTE – Certaines Administrations attribuent à X la valeur 76 mm.

2.3.1.5 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure.
- b) Conditions d'injection.
- c) Type d'échantillon de référence.
- d) Température de l'échantillon et conditions ambiantes (si nécessaire).
- e) Identification de la fibre.
- f) Gamme de longueurs d'onde de mesure.
- g) Longueur d'onde de coupure.
- h) Courbe de $a(\lambda)$ (si nécessaire).
- i) Type de mesure, à savoir longueur d'onde de coupure ou longueur d'onde de coupure du câble de jarretière.
- j) Rayon de courbure (pour longueur d'onde de coupure de jarretière seulement).
- k) Méthode d'interpolation (si utilisée).

2.3.2 Autre méthode de test possible: technique du mandrin λ_c

2.3.2.1 Généralités (comme au 2.3.1.1)

2.3.2.2 Montage de mesure

2.3.2.2.1 Source lumineuse (comme au 2.3.1.2.1)

2.3.2.2.2 Modulation (comme au 2.3.1.2.2)

2.3.2.2.3 Conditions d'injection (comme au 2.3.1.2.3)

2.3.2.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme au 2.3.1.2.4)

2.3.2.2.5 Détecteur optique (comme au 2.3.1.2.5)

2.3.2.3 Procédure de mesure

2.3.2.3.1 Echantillon de mesure standard

On procède à la mesure sur une longueur de fibre de 2 m. On insère cet échantillon dans l'appareil de mesure en le recourbant de manière à former une boucle unique lâche faisant un tour circulaire complet (360 degrés) composé de deux demi-cercles, d'un rayon de 140 mm, reliés par des tangentes. Le reste de la fibre doit être essentiellement libre de toute contrainte extérieure. Bien que quelques courbures accidentelles de plus grand rayon soient admissibles, elles ne doivent pas entraîner de changement significatif du résultat de la mesure. On enregistre la puissance de sortie $P_1(\lambda)$ dans une gamme suffisamment large de part et d'autre de la longueur d'onde de coupure attendue.

Comme indiqué dans la Figure 9, le demi-mandrin inférieur se déplace pour éliminer le mou de la boucle, sans qu'il soit nécessaire de déplacer l'optique d'injection ou de réception ou d'appliquer une tension importante à l'échantillon.

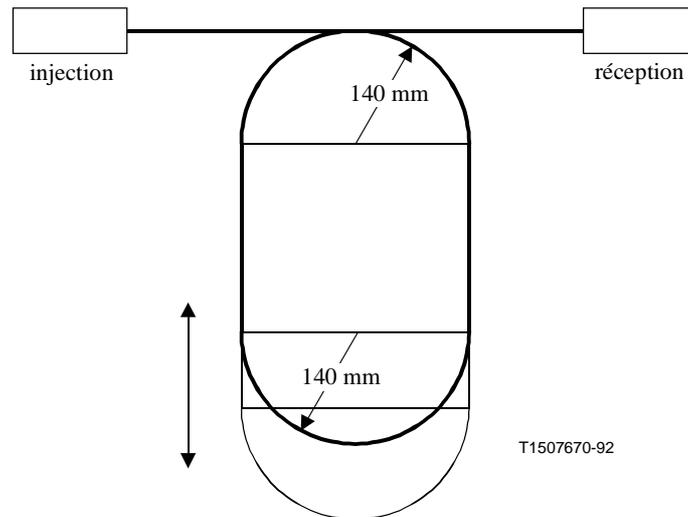


Figure 9/G.650 – Mise en place de la fibre: détermination de la longueur d'onde de coupure par la technique du mandrin

2.3.2.3.2 Transmission à travers l'échantillon de référence (comme au 2.3.1.3.2)

2.3.2.3.3 Calculs (comme au 2.3.1.3.3)

2.3.2.3.4 Détermination de la longueur d'onde de coupure (comme au 2.3.1.3.4)

2.3.2.4 Présentation des résultats (comme au 2.3.1.5)

2.3.3 Méthode de mesure de référence de la longueur d'onde de coupure (λ_{cc}) de la fibre câblée: technique de la puissance émise

2.3.3.1 Généralités

Cette mesure de la longueur d'onde de coupure, effectuée sur des fibres monomodes câblées dans des conditions de déploiement qui simulent les longueurs de câble minimales des installations extérieures, a pour objet de garantir un fonctionnement monomode réel au-dessus d'une certaine longueur d'onde.

Cette méthode utilise la variation, en fonction de la longueur d'onde, de la puissance émise sur un court segment de fibre à étudier, dans des conditions définies, par rapport à une puissance émise de référence. Il existe deux façons d'obtenir celle-ci:

- a) la fibre câblée à mesurer est dotée d'une boucle de rayon plus petit; ou
- b) on prend un court segment (1 à 2 m) d'une fibre multimode.

2.3.3.2 Montage de mesure

2.3.3.2.1 Source lumineuse (comme au 2.3.1.2.1)

2.3.3.2.2 Modulation (comme au 2.3.1.2.2)

2.3.3.2.3 Conditions d'injection (comme au 2.3.1.2.3)

2.3.3.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme au 2.3.1.2.4)

2.3.3.2.5 Détecteur optique (comme au 2.3.1.2.5)

2.3.3.3 Procédure de mesure

2.3.3.3.1 Echantillon de mesure standard

La mesure est effectuée sur une fibre monomode dans un câble. Une longueur de câble de 22 m sera préparée en exposant 1 mètre de fibre non câblée à chaque extrémité; la portion câblée de 20 m ainsi obtenue sera installée en évitant les petits rayons de courbure ou pliures qui pourraient affecter la valeur de la mesure. Pour simuler les effets d'un module d'agencement des épissures, une boucle de 40 mm de rayon sera formée à chaque extrémité de la fibre décordée (voir la Figure 10). La fibre sera dégagée de la gaine extérieure en préservant (s'il y a lieu) ses revêtements secondaires de protection. Bien que certaines courbures accidentelles de plus grand rayon soient admissibles dans la fibre ou le câble, elles ne doivent pas apporter de changement important aux mesures. On enregistre la puissance de sortie $P_1(\lambda)$ en fonction de λ dans une bande de longueurs d'onde suffisamment large de part et d'autre de la longueur d'onde de coupure probable.

NOTE – Les boucles sont prévues pour simuler les conditions d'installation.

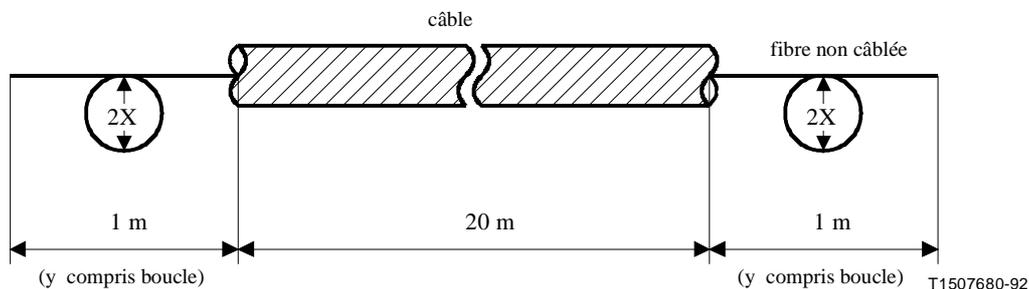


Figure 10/G.650 – Condition de déploiement utilisée pour la mesure de la longueur d'onde de coupure de la fibre câblée

2.3.3.3.2 Transmission à travers l'échantillon de référence (comme au 2.3.1.3.2)

2.3.3.3.3 Calculs

Le rapport logarithmique entre les puissances émises $P_1(\lambda)$ et $P_i(\lambda)$, est calculé comme suit:

$$R(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (2-11 \text{ bis})$$

où $i = 2$ ou 3 , respectivement, pour les méthodes a) ou b).

2.3.3.3.4 Détermination de la longueur d'onde de coupure de la fibre câblée

Les calculs et la méthode pour déterminer la longueur d'onde de coupure (λ_{cc}) du câble sont les mêmes que pour celle de la fibre. Voir 2.3.1.3.3 et 2.3.1.3.4.

2.3.3.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure.
- b) Conditions d'injection.
- c) Type d'échantillon de référence.
- d) Température de l'échantillon et conditions ambiantes (si nécessaire).
- e) Identification de la fibre et du câble.
- f) Gamme de longueurs d'onde de mesure.
- g) Longueur d'onde de coupure de la fibre câblée (si nécessaire).
- h) Courbe de $R(\lambda)$ (si nécessaire).

2.3.4 Autre méthode de test possible pour mesurer la longueur d'onde de coupure (λ_{cc}) de la fibre câblée

2.3.4.1 Généralités

Cette mesure de la longueur d'onde de coupure est effectuée sur des fibres monomodes non câblées dans des conditions de déploiement qui garantissent que les résultats obtenus pour λ_{cc} concordent bien avec les résultats fournis des mesures effectuées sur des fibres câblées.

Cette méthode utilise la variation, en fonction de la longueur d'onde, de la puissance émise sur un court segment de fibre à mesurer, dans des conditions définies, par rapport à une puissance émise de référence. Il existe deux façons d'obtenir cette puissance de référence:

- a) la fibre câblée à mesurer est dotée d'une boucle de rayon plus petit; ou
- b) on prend un court segment (1 à 2 m) d'une fibre multimode.

2.3.4.2 Montage de mesure

2.3.4.2.1 Source lumineuse (comme au 2.3.1.2.1)

2.3.4.2.2 Modulation (comme au 2.3.1.2.2)

2.3.4.2.3 Conditions d'injection (comme au 2.3.1.2.3)

2.3.4.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme au 2.3.1.2.4)

2.3.4.2.5 Détecteur optique (comme au 2.3.1.2.5)

2.3.4.3 Procédure de mesure

2.3.4.3.1 Echantillon de mesure standard

On procède à la mesure sur une fibre monomode non câblée. La fibre sera décâblée en préservant (s'ils existent) ses revêtements secondaires de protection. Une longueur de fibre de 22 m est introduite dans l'appareil de mesure; on love les 20 m intérieurs de manière à former des boucles lâches ayant un rayon $r \geq 140$ mm.

Une boucle de 40 mm de rayon est formée à chaque extrémité de la fibre (voir la Figure 11). On enregistre la puissance de sortie $P_1(\lambda)$ en fonction de λ , sur une bande de longueur d'onde suffisamment large de part et d'autre de la longueur d'onde de coupure probable λ_{cc} .

NOTE – Les boucles sont prévues pour simuler les conditions d'installation.

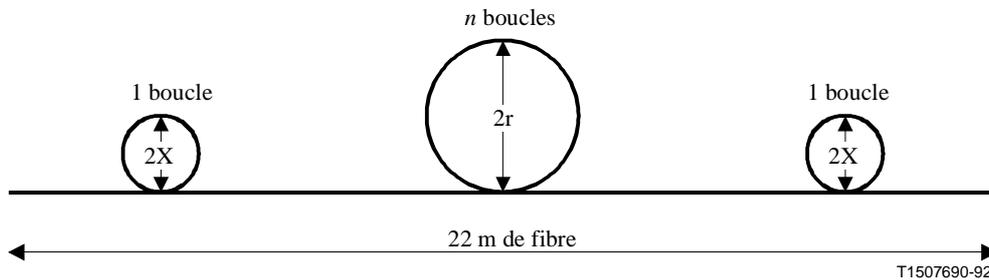


Figure 11/G.650 – Conditions de déploiement pour mesurer la longueur λ_{cc} d'onde de coupure d'une fibre non câblée

2.3.4.3.2 Transmission à travers l'échantillon de référence (comme au 2.3.1.3.2)

2.3.4.3.3 Calculs (comme au 2.3.1.3.3)

2.3.4.3.4 Détermination de la longueur d'onde de coupure de la fibre câblée
(comme au 2.3.3.3.4)

2.3.4.4 Présentation des résultats

Comme au 2.3.3.4, avec en plus:

i) valeur de r .

2.4 Méthodes de test de l'affaiblissement

Le but des mesures d'affaiblissement est le suivant: attribuer à une longueur de fibre une valeur d'affaiblissement telle que l'on puisse additionner les valeurs individuelles d'affaiblissement pour calculer l'affaiblissement total d'une longueur composée de plusieurs segments.

NOTE – Les valeurs d'affaiblissement spécifiées pour les longueurs de fabrication doivent être mesurées à la température ambiante (une seule valeur comprise entre 10° C et 35° C).

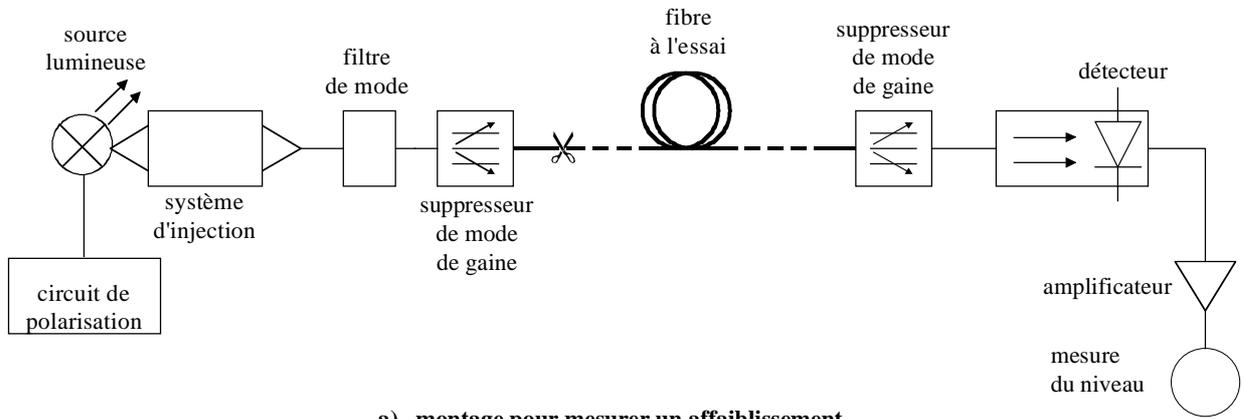
2.4.1 Méthode de test de référence: technique de la fibre coupée

2.4.1.1 Généralités

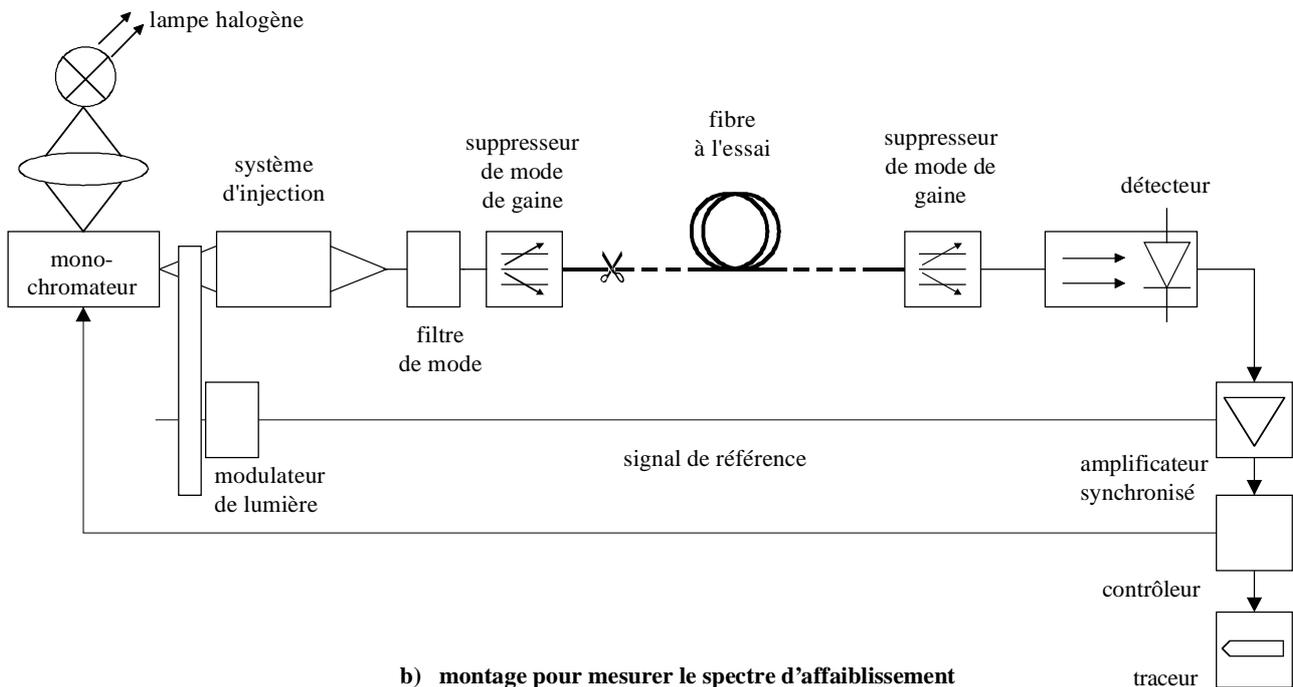
La méthode de la fibre coupée est une application directe de la définition, dans laquelle on mesure les puissances P_1 et P_2 en deux points de la fibre sans changer les conditions d'entrée. P_2 est la puissance de sortie à l'extrémité de la fibre et P_1 la puissance de sortie en un point situé près de l'entrée après coupure de la fibre.

2.4.1.2 Montage de mesure

Les mesures peuvent être faites à une ou plusieurs longueurs d'onde ponctuelles, à moins qu'une réponse spectrale soit exigée sur une série de longueurs d'onde. La Figure 12 montre des schémas d'équipements permettant de mesurer un affaiblissement ou un spectre d'affaiblissement.



a) montage pour mesurer un affaiblissement



b) montage pour mesurer le spectre d'affaiblissement

T1507700-92

Figure 12/G.650 – Technique de la fibre coupée

2.4.1.2.1 Source optique

On utilisera une source de rayonnement appropriée telle que lampe, laser ou diode électroluminescente. Le choix de la source dépend du type de mesure à effectuer. La source doit avoir une assise, une intensité et une longueur d'onde stables, pendant une durée assez longue pour qu'on puisse mener à bien la procédure de mesure. La largeur spectrale de raie à mi-hauteur pour la source doit être telle que la largeur de raie soit étroite par rapport à toute caractéristique de l'affaiblissement spectral de la fibre.

2.4.1.2.2 Modulation

En général on module la source lumineuse pour améliorer le rapport signal/bruit au récepteur. Si cette procédure est adoptée, le détecteur devra être relié à un système de traitement du signal

synchronisé avec la fréquence de modulation de la source. Le système de détection doit avoir une sensibilité très sensiblement linéaire.

2.4.1.2.3 Conditions d'injection

Les conditions d'injection doivent être suffisantes pour exciter le mode fondamental. Exemples de techniques d'injection appropriées:

- a) le raccordement avec une fibre;
- b) l'injection avec un système optique approprié.

2.4.1.2.4 Filtre de mode

Il faut veiller à ce que les modes d'ordre élevé ne se propagent pas dans la longueur de fibre coupée. A cette fin, il peut être nécessaire d'ajouter en amont une courbure pour éliminer les modes d'ordre supérieur.

2.4.1.2.5 Suppresseur de mode de gaine

Un suppresseur de mode de gaine favorise la conversion des modes de gaine en modes de rayonnement; il permet ainsi d'éliminer les modes de gaine de la fibre.

2.4.1.2.6 Détecteur optique

On utilisera un détecteur approprié afin d'intercepter tous les rayonnements qui émergent de la fibre. La réponse spectrale doit être compatible avec les caractéristiques spectrales de la source. La détection doit être uniforme et avoir une caractéristique de sensibilité linéaire.

2.4.1.3 Procédure de mesure

2.4.1.3.1 Préparation de la fibre à mesurer

Les extrémités de la fibre doivent être suffisamment propres, lisses et perpendiculaires à l'axe de la fibre. En ce qui concerne les mesures faites sur des fibres non câblées, il faut que la fibre soit lâche sur le touret, c'est-à-dire que la surface du touret n'introduise pas d'effets de microcourbure.

2.4.1.3.2 Procédure

- 1) La fibre à mesurer est placée dans l'appareil de mesure; on enregistre la puissance de sortie P_2 .
- 2) En maintenant les conditions d'injection fixes, on coupe la fibre à la longueur voulue (par exemple, à 2 m du point d'injection). On insère le suppresseur de mode de gaine lorsque cela est nécessaire, et on enregistre ensuite la puissance P_1 à la sortie du segment coupé.
- 3) On peut alors calculer l'affaiblissement entre les points où l'on a mesuré P_1 et P_2 , d'après les équations 1-4 et 1-5.

2.4.1.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure, y compris le type de source, la longueur d'onde de la source et la largeur spectrale de la raie à mi-hauteur.
- b) Identification de la fibre.
- c) Longueur de l'échantillon.
- d) Affaiblissement de l'échantillon exprimé en dB.
- e) Affaiblissement linéique exprimé en dB/km.
- f) Indication de la précision et de la reproductibilité des mesures.

g) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

2.4.2 Autre méthode possible (n° 1): technique de la rétrodiffusion

2.4.2.1 Généralités

Il s'agit d'une méthode de test pour mesurer l'affaiblissement linéique des fibres optiques monomodes basée sur des mesures de la rétrodiffusion. La technique peut aussi être utilisée pour vérifier l'uniformité de l'affaiblissement, la continuité optique, les discontinuités physiques, les pertes d'épissure et la longueur de la fibre.

Dans certains cas particuliers, par exemple la vérification de la variation de la pente de rétrodiffusion dans les fibres câblées, on peut utiliser des mesures unidirectionnelles de la rétrodiffusion.

Les procédures d'étalonnage des équipements de mesure de la rétrodiffusion figurent dans le document XXXX de la CEI.

2.4.2.2 Montage de mesure

2.4.2.2.1 Généralités

Le niveau du signal optique rétrodiffusé est normalement faible et proche du niveau de bruit. Afin d'améliorer le rapport signal/bruit et la portée dynamique de la mesure, il est donc courant d'employer une source lumineuse de forte puissance pour le traitement du signal détecté. De plus, il sera peut-être nécessaire de régler la largeur des impulsions pour obtenir un compromis entre résolution et gamme dynamique.

Il faudra veiller à empêcher la propagation des modes d'ordre élevé.

Un exemple de montage est représenté à la Figure 13 a).

2.4.2.2.2 Source optique

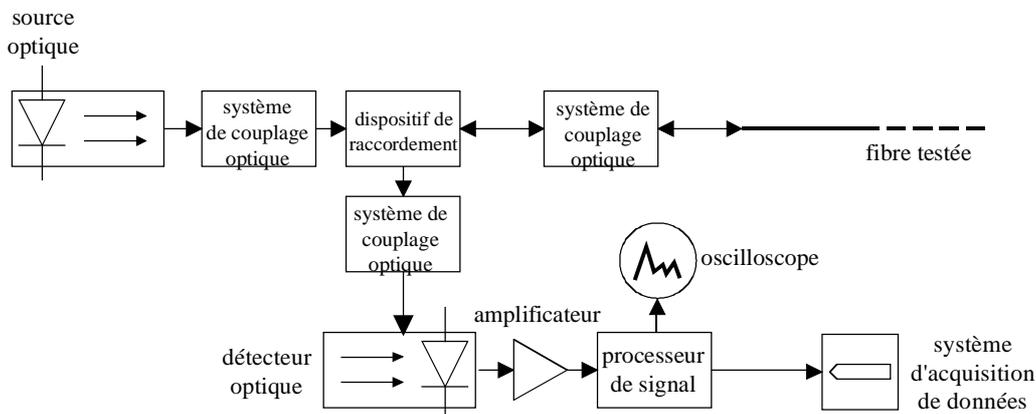
Il convient d'utiliser une source optique stable ayant des longueurs d'onde appropriées qui seront enregistrées. La largeur et la fréquence de répétition des impulsions doivent être compatibles avec la résolution voulue et la longueur de la fibre.

2.4.2.2.3 Système de couplage optique

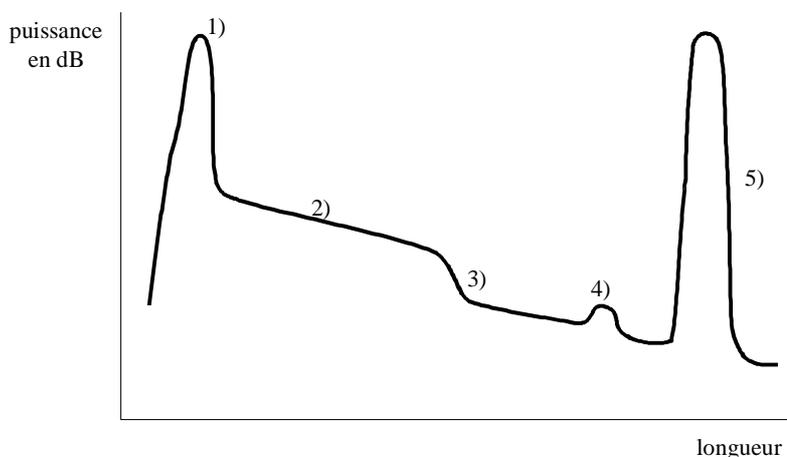
On utilisera un système optique assurant le passage efficace du faisceau dans la fibre testée, le dispositif de raccordement ou le détecteur optique. On peut utiliser en outre plusieurs moyens, tels que les matériaux adaptateurs d'indice, pour réduire les réflexions de Fresnel.

2.4.2.2.4 Dispositif de raccordement

Un dispositif de raccordement est nécessaire pour coupler le rayonnement source à la fibre et le rayonnement rétrodiffusé au détecteur, tout en évitant un couplage direct entre la source et le détecteur. On évitera d'utiliser les dispositifs ayant des propriétés dépendantes de la polarisation.



a) schéma de l'appareil



b) exemple de courbe de perte par réflexion unidirectionnelle

T1524580-96

Figure 13/G.650 – La technique de mesure par réflexion

2.4.2.2.5 Détecteur optique

On utilisera un détecteur pour intercepter la plus grande partie du rayonnement rétrodiffusé. La réponse du détecteur doit être compatible avec les niveaux et les longueurs d'onde du signal détecté. Pour la mesure de l'affaiblissement, la réponse du détecteur doit être essentiellement linéaire.

2.4.2.2.6 Amplificateur

Le détecteur optique sera suivi d'un amplificateur afin d'amener le signal à un niveau approprié pour son traitement. La bande passante de l'amplificateur doit être un compromis entre la résolution temporelle et la réduction de bruit.

2.4.2.2.7 Processeur de signal

Il faudra utiliser un processeur de signal capable d'améliorer le rapport signal/bruit, de calculer la courbe d'affaiblissement à partir des deux courbes de perte par réflexion unidirectionnelle et, au besoin, de fournir une réponse logarithmique dans le système de détection. En outre, un oscilloscope permettant de suivre directement la trace de la réflexion ainsi qu'un système d'acquisition de données pour enregistrer les résultats des mesures peuvent être connectés au processeur de signal.

2.4.2.2.8 Suppresseur du mode de gaine

Voir 2.4.1.2.5.

2.4.2.2.9 Configuration de l'échantillon de fibre

Les mesures peuvent être faites sur diverses configurations de la fibre (par exemple, la fibre câblée, enroulée sur un touret utilisé pour le transport ou conformément aux conditions de la méthode de test de référence).

2.4.2.3 Procédure de mesure

- a) Aligner la fibre sur le système de couplage optique.
- b) Mesurer deux courbes de perte par rétrodiffusion unidirectionnelle, une depuis chaque extrémité de la fibre. La Figure 13 b) est un exemple de courbe de ce type. Chaque courbe est analysée par le processeur de signal et présentée avec une échelle logarithmique en évitant les extrémités des courbes en raison des réflexions au niveau des dispositifs de couplage et de branchement et des extrémités de la fibre [voir les parties 1) et 5) de la Figure 13 b)].
- c) Calculer la longueur L_f de la fibre à partir d'un intervalle temporel entre les deux extrémités de la courbe de perte par rétrodiffusion (T_f) et l'indice de temps de propagation de groupe (N) de la fibre telle que: $L_f = c \cdot T_f / N$ (c étant la vitesse de la lumière en espace libre).
- d) Etablir la courbe de perte par rétrodiffusion bidirectionnelle à partir des deux courbes de perte par rétrodiffusion unidirectionnelle mesurée et enregistrée en utilisant la procédure ci-après:

soient $a(x)$ et $b(z)$ les fonctions décrivant les deux courbes de perte par rétrodiffusion unidirectionnelle, exprimées en dB, x et z étant les distances à partir des extrémités de la fibre aux sites d'injection respectifs les plus proches. La courbe de perte par rétrodiffusion bidirectionnelle est donnée par:

$$y(x) = \frac{a(x) - b(L_f - x)}{2} \quad (2-12)$$

- e) Déterminer l'affaiblissement linéique de la fibre de bout en bout au moyen de la procédure ci-après:

l'affaiblissement linéique, $A(x_0, x_1)$, pour un segment de fibre défini par les positions d'extrémité x_0 et x_1 (où $x_0 < x_1$) est donné par:

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0} \quad (2-13)$$

Cette expression peut être évaluée par la méthode d'approximation linéaire des moindres carrés appliquée aux données comprises entre x_0 et x_1 .

L'affaiblissement linéique de bout en bout de la fibre est déterminé de la même manière que l'équation 2-13 avec les points correspondant aux données aussi proches que possible des positions d'extrémité. Toutefois, ces points doivent être à l'extérieur de la zone neutre et de la zone de réflexion à l'extrémité de la fibre [les zones 1) et 5) de la Figure 13 b)].

2.4.2.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure.
- b) Type de traitement de signal.

- c) Date de la mesure.
- d) Identification et longueur de l'échantillon testé.
- e) Largeur d'impulsion.
- f) Longueur(s) d'onde de mesure.
- g) Affaiblissement linéique de bout en bout de la fibre en dB/km.
- h) Courbe de perte par rétrodiffusion bidirectionnelle.

NOTE – Les mesures de rétrodiffusion unidirectionnelle sont obtenues avec la fonction $a(x)$ seule. L'analyse complète des courbes de perte par rétrodiffusion unidirectionnelle qui ont été enregistrées [Figure 13 b)] montre qu'indépendamment des mesures de l'affaiblissement, de nombreux phénomènes peuvent être observés par la technique de rétrodiffusion, notamment:

- 1) la réflexion due aux dispositifs de couplage et de branchement à l'extrémité d'entrée de la fibre;
- 2) la zone de pente constante de rétrodiffusion;
- 3) les discontinuités dues à des défauts locaux, aux épissures et au couplage;
- 4) la variation de la pente de rétrodiffusion en fonction de la longueur;
- 5) les fluctuations à l'extrémité de sortie de la fibre;
- 6) les variations de l'affaiblissement, par exemple en fonction de la température.

2.4.3 Autre méthode de test possible (n° 2): technique de l'affaiblissement d'insertion

2.4.3.1 Généralités

La technique de l'affaiblissement d'insertion consiste à évaluer l'affaiblissement de puissance dû à l'insertion de la fibre étudiée entre un système d'injection et un système de réception qui étaient auparavant directement reliés (conditions de référence). Les puissances P_1 et P_2 sont alors évaluées d'une manière moins directe que par la méthode de la fibre coupée. Cette méthode n'est donc pas destinée à être utilisée sur les tronçons de fibres ou de câbles à la longueur de fabrication.

La technique de l'affaiblissement d'insertion est moins précise que celle de la fibre coupée, mais a l'avantage de ne pas détruire la fibre étudiée et les demi-connecteurs éventuellement fixés à ses deux extrémités. Cette technique est donc particulièrement adaptée aux tests sur le terrain, et elle est d'abord destinée à être appliquée aux tronçons de câbles munis de connecteurs.

Dans ce qui suit, on a envisagé deux formes possibles d'application de cette technique (voir la Figure 14); elles diffèrent par la nature des systèmes d'injection et de réception, comme cela est expliqué dans la suite. Des conditions de mesure hybrides tenant à la fois de l'option a) et de l'option b) sont possibles et sont examinées dans la Note 2 du 2.4.3.3.2.

Dans l'option a), la qualité des demi-connecteurs fixés à la fibre mesurée (et plus généralement la qualité des dispositifs d'interconnexion utilisés) a une incidence sur les résultats. Dans l'option b), cette incidence est quasiment nulle.

En conséquence, l'option b) est généralement plus précise, et convient donc mieux lorsqu'on désire obtenir l'affaiblissement effectif de la fibre seule. A l'inverse, lorsque le tronçon de fibre mesuré est équipé de demi-connecteurs et qu'il doit être raccordé sous cette forme à la suite d'autres éléments, les résultats de l'option a) sont plus significatifs puisqu'ils prennent en compte le biais introduit par les demi-connecteurs par rapport à l'affaiblissement nominal de la fibre seule.

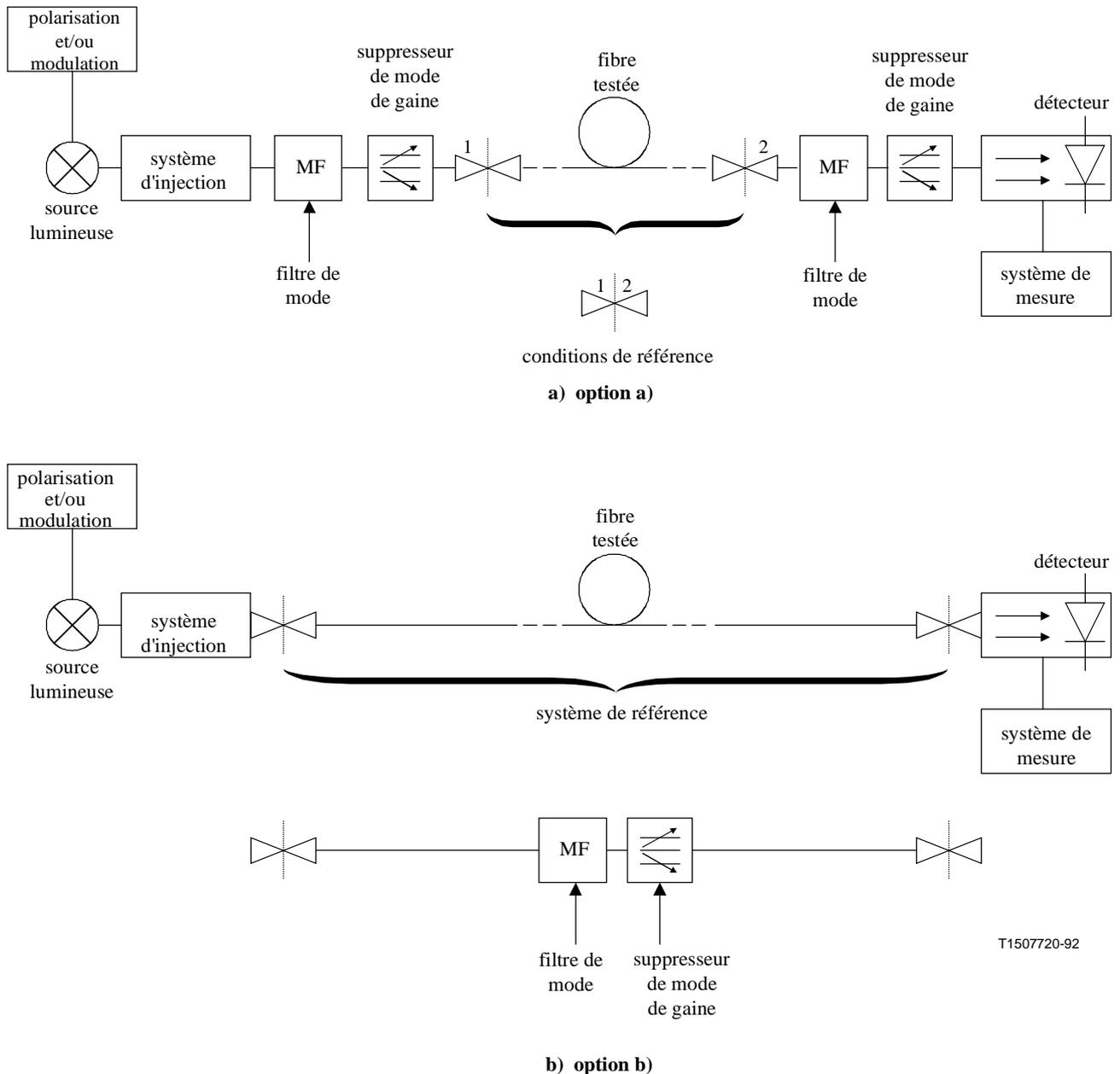


Figure 14/G.650 – Configurations types de la technique de mesure de l'affaiblissement d'insertion

2.4.3.2 Montage de mesure

La Figure 14 montre le schéma de l'équipement de mesure. Les mesures sont réalisées sur une ou plusieurs longueurs d'ondes; on peut également mesurer la réponse spectrale pour un intervalle donné de longueurs d'onde.

2.4.3.2.1 Source optique

On utilisera une source d'émission convenable d'intensité stable, tels une lampe, un laser ou une diode électroluminescente. Si on utilise une source à large spectre, il faudra la faire suivre d'un filtre de longueur d'onde qu'il est également possible d'installer avant le détecteur. Dans tous les cas, il faudra connaître la longueur d'onde nominale de la source, en tenant compte s'il y a lieu du filtre.

La largeur spectrale de la raie à mi-hauteur doit être étroite par rapport aux caractéristiques d'affaiblissement spectral de la fibre.

2.4.3.2.2 Modulation

Voir 2.4.1.2.2.

2.4.3.2.3 Conditions d'injection

Pour l'option a)

La source est raccordée à une courte longueur de fibre monomode ayant les mêmes caractéristiques nominales que la fibre étudiée, cette fibre étant elle-même équipée d'un filtre de mode et d'un supprimeur de mode de gaine (voir ci-dessous).

Ce bout de fibre est raccordé à la fibre mesurée à l'aide d'un dispositif de raccordement à haute précision afin de minimiser les pertes de raccordement et d'obtenir des résultats significatifs. Si la fibre mesurée est équipée d'un demi-connecteur, il faudra un demi-connecteur compatible de haute qualité à l'extrémité de l'amorce d'injection.

Pour l'option b)

La source d'injection est reliée à la fibre étudiée par un dispositif optique approprié de telle manière que le faisceau injecté à l'interface d'entrée de la fibre étudiée ait des intensités de champ proche et de champ lointain à peu près uniformes sur l'ensemble du diamètre du champ de mode et de l'intensité de champ lointain de la fibre.

Le système peut utiliser des lentilles et un positionneur de fibre; il est possible également d'injecter la lumière par une fibre multimode à saut d'indice connectée à la fibre étudiée.

Ceci est réalisé grâce à un système de raccordement quelconque ou à un demi-connecteur compatible avec ceux qui équipent les extrémités de la fibre.

2.4.3.2.4 Système de référence [option b) seulement]

Ce système est composé d'une courte longueur de fibre monomode ayant les mêmes caractéristiques nominales que la fibre étudiée. Ce bout de fibre est équipé d'un filtre de mode et d'un supprimeur de mode de gaine; les deux dispositifs ne provoqueront aucun affaiblissement au mode fondamental.

2.4.3.2.5 Filtre de mode

Le filtre de mode n'autorisera la propagation que du mode fondamental. A titre d'exemple, il peut être réalisé par courbure appropriée de la fibre.

2.4.3.2.6 Supprimeur de mode de gaine

Il faut utiliser un supprimeur de mode de gaine qui favorise la conversion des modes de gaine en modes radiatifs. Un tel système n'est pas nécessaire si la fibre empêche par elle-même la propagation des modes de gaine.

2.4.3.2.7 Détection optique

La réponse spectrale du détecteur optique sera compatible avec les caractéristiques spectrales de la source. Il devra avoir des caractéristiques de sensibilité linéaires.

Pour l'option a)

Le détecteur est relié à une fibre monomode ayant les mêmes caractéristiques nominales que la fibre étudiée. La fibre doit être équipée d'un filtre de mode et d'un supprimeur de mode de gaine.

Les dispositions du 2.4.3.2.3, option a), seront appliquées pour le raccordement avec la fibre étudiée.

Pour l'option b)

L'extrémité de la fibre étudiée est positionnée face au détecteur.

On utilisera un détecteur approprié de manière à intercepter tous les rayonnements sortant de la fibre. Le détecteur sera spatialement uniforme.

Il est possible également de connecter le détecteur à une fibre multimode à saut d'indice. Cette amorce sera reliée à la fibre étudiée par un dispositif de couplage quelconque ou par un connecteur compatible avec ceux montés à l'extrémité de la fibre étudiée.

2.4.3.3 Procédure de mesure

2.4.3.3.1 Préparation de la fibre étudiée

Voir 2.4.1.3.1.

Si la fibre est équipée de connecteurs, il faut suivre une procédure de nettoyage appropriée.

2.4.3.3.2 Procédure

- 1) Une fois choisie la longueur d'onde de mesure, la puissance P_1 est d'abord mesurée de la manière suivante:

Pour l'option a)

La fibre amorce du système d'injection est connectée à la fibre du système de réception. On note alors la puissance reçue P_1 .

Pour l'option b)

Le système de référence est connecté entre l'amorce d'injection et le système de réception. On note alors la puissance reçue P_1 .

- 2) La fibre étudiée est ensuite connectée entre l'amorce d'injection et le système de réception. On note alors la puissance reçue P_2 .
- 3) On calcule enfin l'atténuation A du tronçon de fibre de la manière suivante:

Pour l'option a)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} + C_r - C_1 - C_2 \text{ (dB)} \quad (2-14a)$$

où C_r , C_1 et C_2 sont respectivement les affaiblissements moyens nominaux (en dB) des connexions dans les conditions de référence, à l'entrée de la fibre étudiée, et à sa sortie.

Pour l'option b)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (dB)} \quad (2-14b)$$

NOTE 1 – L'utilisation de l'option b) suppose que la fibre étudiée empêche la propagation des modes autres que le mode fondamental vers l'extrémité de réception.

NOTE 2 – Il est également possible de mesurer l'affaiblissement de la fibre à l'aide d'un dispositif de mesure hybride en utilisant le système d'injection de l'option a) et le système de réception de l'option b), ou l'inverse.

La procédure de mesure de la puissance P_1 est dans les deux cas similaire à celle décrite pour l'option a); il n'est pas nécessaire d'utiliser un système de référence et le système d'injection est directement relié au système de réception.

Dans les deux cas, l'affaiblissement du tronçon de fibre est calculé d'après la formule suivante:

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - C_a \quad (\text{dB}) \quad (2-15)$$

où C_a est l'atténuation moyenne nominale (en dB) de la connexion entre la fibre mesurée et l'élément de l'installation de mesure (injection ou réception) relevant de l'option a).

NOTE 3 – La capacité intrinsèque de l'option a) à évaluer le comportement des demi-connecteurs n'impose pas nécessairement son adoption chaque fois que cette évaluation est demandée.

En effet, et même à une extrémité où la mesure du connecteur est demandée, il est tout aussi possible d'utiliser une installation du type de l'option b), après avoir préalablement connecté un cordon de fibre monomode à la fibre mesurée. L'affaiblissement nominal du connecteur fibre-cordon est à soustraire de l'affaiblissement mesuré.

Dans la pratique, on choisit les appareils de mesure de façon à minimiser les sources d'erreurs, en tenant compte des appareils et des dispositifs de raccordement disponibles. L'adoption d'une installation hybride (injection "a", réception "b") plus un cordon à l'extrémité de réception constitue d'habitude la meilleure solution lorsqu'il faut évaluer les deux demi-connecteurs.

2.4.3.4 Présentation des résultats

- a) Installation de mesure, y compris le type de la source, sa longueur d'onde, la largeur spectrale de raie à mi-hauteur utilisée pour la mesure et le type d'option [a) ou b)].
- b) Identification de la fibre.
- c) Longueur de la section de fibre et conditions aux extrémités (présence de demi-connecteurs).
- d) Atténuation de la section en dB.
- e) Coefficient d'atténuation en dB/km.
- f) Indication de la précision et de la reproductibilité (en particulier, la reproductibilité de l'atténuation de la connexion sera correctement prise en compte).
- g) Température de l'échantillon et conditions ambiantes (si nécessaire).

2.5 Méthodes de test de la dispersion chromatique

2.5.1 Méthode de test de référence: la technique du déphasage

2.5.1.1 Généralités

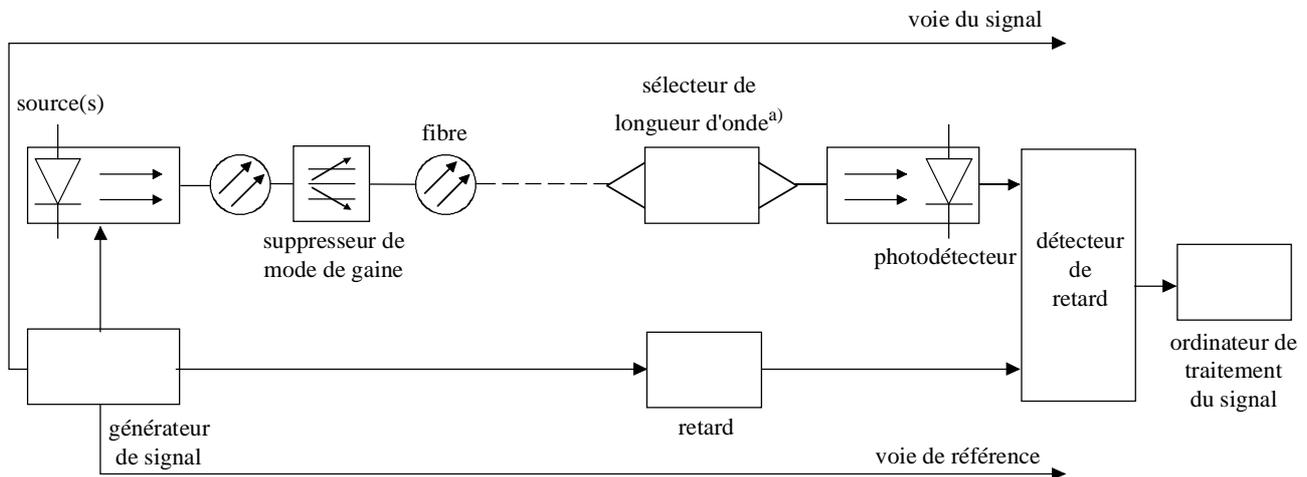
Le coefficient de dispersion chromatique de la fibre est obtenu à partir de la mesure du temps de propagation de groupe relatif enregistré aux diverses longueurs d'onde au cours de la propagation sur une longueur de fibre connue.

Le temps de propagation de groupe est mesuré dans le domaine fréquences par détection, enregistrement et traitement du déphasage d'un signal de modulation sinusoïdal.

La dispersion chromatique peut être mesurée à une longueur d'onde donnée ou sur toute une gamme de longueurs d'onde.

2.5.1.2 Montage de mesure

La Figure 15 représente un schéma du montage de mesure.



T1524590-96

a) Si besoin est.

Figure 15/G.650 – Configuration type du montage de test

2.5.1.2.1 Source optique

On utilisera une source optique dont l'assise, l'intensité et la longueur d'onde resteront stables pendant une durée suffisamment longue pour pouvoir mener à bien la procédure de mesure. Selon la gamme de longueurs d'onde explorée, il est possible d'utiliser des diodes laser {barrette de diodes laser (*LD-array*)}, des diodes laser à longueur d'onde réglable (*WTL, wavelength tunable laser*) {par exemple un laser à cavité externe (*ECL, external cavity laser*)}, des diodes électroluminescentes ou des sources à large bande (par exemple un laser Nd:YAG avec fibre de Raman).

Dans tous les cas, le signal de modulation sera tel qu'il garantisse une résolution temporelle suffisante pour la mesure du temps de propagation de groupe.

2.5.1.2.2 Sélection et contrôle de la longueur d'onde

Le système de sélection et de contrôle de la longueur d'onde sert à choisir et à contrôler la longueur d'onde pour laquelle le temps de propagation de groupe sera mesuré. Comme système de sélection de longueur d'onde, et suivant le type de source optique et de dispositif de mesure installés, il est possible d'utiliser un commutateur optique, un monochromateur, des dispositifs à dispersion, des filtres optiques, des coupleurs optiques ou des connecteurs. La sélection peut être réalisée en commutant les signaux de commande électriques de sources lumineuses fonctionnant à différentes longueurs d'onde.

Le contrôle de la longueur d'onde peut être réalisé à l'aide d'un coupleur de fibres optiques et d'un ondemètre optique. Le système de sélection et de contrôle de la longueur d'onde peut être installé soit à l'entrée soit à la sortie de la fibre sous test.

Si l'on ajuste mathématiquement les données (voir les équations 2-16, 2-18 ou 2-20), un point de données au moins doit être à moins de 100 nm de λ_0 .

2.5.1.2.3 Détecteur

La lumière émergeant de la fibre à mesurer, de la fibre de référence ou du diviseur optique, etc., est couplée à un photodétecteur dont le rapport signal/bruit et la résolution temporelle sont appropriés à la mesure. Si nécessaire, le détecteur est suivi d'un amplificateur à faible bruit.

2.5.1.2.4 Canal de référence

Le canal de référence peut être soit une ligne de signalisation électrique, soit une ligne de signalisation optique. Un générateur de temps de propagation approprié peut être placé sur ce canal. Dans certains cas, la fibre à mesurer elle-même peut servir de canal de référence.

2.5.1.2.5 Détecteur du temps de propagation

Le détecteur du temps de propagation mesure le déphasage entre le signal de référence et le signal de canal. Un voltmètre vectoriel peut être utilisé.

2.5.1.2.6 Traitement des signaux

On peut adjoindre un dispositif de traitement des signaux afin de réduire le bruit et/ou la gigue dans la forme d'onde mesurée. Si nécessaire, on peut utiliser un ordinateur numérique pour procéder à la commande de l'équipement, au stockage des données et à l'évaluation numérique des données.

2.5.1.3 Procédure de mesure

La fibre de mesure est couplée de façon appropriée à la source et au détecteur au moyen du sélecteur de longueur d'onde ou du diviseur optique, par exemple. Si nécessaire, on peut étalonner le temps de propagation chromatique de la source. Il faut arriver à un compromis adéquat entre la résolution de longueur d'onde et le niveau du signal. A moins que la fibre à mesurer soit également utilisée comme la ligne de canal de référence, la température de la fibre doit être suffisamment stable pendant la mesure.

Le déphasage entre le signal de référence et le signal de canal à la longueur d'onde de fonctionnement doit être mesuré par le détecteur du temps de propagation. On procède à un traitement des données approprié au type de modulation afin d'obtenir le coefficient de dispersion chromatique correspondant à la longueur d'onde de fonctionnement. Si nécessaire, une analyse spectrale du temps de propagation de groupe en fonction de la longueur d'onde peut être exécutée; on peut obtenir une courbe d'ajustement à partir des valeurs mesurées.

Le temps de propagation de groupe sera déduit du déphasage correspondant ϕ au moyen de la relation $\tau = \phi / (2\pi f)$, f étant la fréquence de modulation.

2.5.1.3.1 Fibres G.652

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par l'équation à trois termes de Sellmeier:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 \quad (2-16)$$

Dans cette relation, τ_0 est le temps de propagation relatif minimal à la longueur d'onde de dispersion nulle, λ_0 . Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé à partir de l'équation de Sellmeier différenciée:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right) \quad (2-17)$$

S_0 est la pente de dispersion nulle, c'est-à-dire la valeur de la pente de dispersion $S(\lambda) = dD/d\lambda$ pour λ_0 .

NOTE 1 – Les équations donnant $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont assez précises entre 1270 et 1340 nm; elles le sont moins dans la région des 1550 nm. La dispersion étant forte dans ce dernier cas, cette précision réduite peut être

acceptable. Dans le cas contraire, on peut l'améliorer en incluant des données de la région des 1550 nm lors de l'ajustement. A noter cependant que cela peut réduire la précision autour de 1310 nm.

NOTE 2 – A titre de variante, le coefficient de dispersion chromatique peut être mesuré directement, par exemple par une méthode de décalage de phase différentielle. Dans ce cas, on ajustera l'équation Sellmeier différenciée 2-17 directement au coefficient de dispersion pour déterminer λ_0 et S_0 .

2.5.1.3.2 Fibres G.653

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par l'équation quadratique:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{2} (\lambda - \lambda_0)^2 \quad (2-18)$$

où τ_0 est le temps de propagation relatif minimal à la longueur d'onde de dispersion nulle, λ_0 . Le coefficient de dispersion chromatique, $D\lambda = d\tau/d\lambda$, peut être déterminé à partir de l'équation quadratique différenciée:

$$D(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)S_0 \quad (2-19)$$

où S_0 est la pente de dispersion nulle (uniforme), c'est-à-dire la valeur de la pente de dispersion $S(\lambda) = dD/d\lambda$ à λ_0 .

NOTE 1 – Les équations donnant $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont suffisamment précises entre 1500 et 1600 nm. Elles ne peuvent pas être utilisées dans la région des 1310 nm.

NOTE 2 – A titre de variante, le coefficient de dispersion chromatique peut être mesuré directement (voir l'équation 2-19), par exemple par une méthode de décalage de phase différentielle. Dans ce cas, on ajustera une ligne droite directement au coefficient de dispersion pour déterminer λ_0 et S_0 .

2.5.1.3.3 Fibres G.654

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre en fonction de la longueur d'onde sera ajusté par l'équation quadratique suivante:

$$\tau(\lambda) = \tau_{1550} + (S_{1550} / 2)(\lambda - 1550)^2 + D_{1550}(\lambda - 1550) \quad (2-20)$$

Dans cette équation, τ_{1550} représente le temps de propagation de groupe pour $\lambda = 1550$ nm. Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé par la dérivation de l'équation quadratique:

$$D(\lambda) = S_{1550}(\lambda - 1550) + D_{1550} \quad (2-21)$$

Dans cette relation, S_{1550} représente la pente (uniforme) de la dispersion à 1550 nm, c'est-à-dire aussi la valeur de la dérivée de la dispersion $S_{1550}(\lambda) = dD/d\lambda$ pour $\lambda = 1550$ nm. D_{1550} représente la valeur de la dispersion pour $\lambda = 1550$ nm.

NOTE 1 – Les équations de $\tau(\lambda)$ et de $D(\lambda)$ sont suffisamment précises dans l'intervalle de 1500 à 1600 nm. Elles ne sont pas destinées à être utilisées dans la région des 1310 nm.

NOTE 2 – Il est aussi possible de mesurer directement le coefficient de dispersion chromatique, par exemple par la méthode du déphasage différentiel. Dans ce cas, on ajustera le coefficient de dispersion par une droite (voir l'équation 2-21) pour déterminer S_{1550} et D_{1550} .

2.5.1.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure.
- b) Type de modulation utilisé.
- c) Caractéristiques de la source.

- d) Identification et longueur de la fibre.
- e) Caractéristiques du sélecteur de longueur d'onde (s'il en existe un).
- f) Type de photodétecteur.
- g) Caractéristiques du détecteur de temps de propagation.
- h) Valeurs de la longueur d'onde de dispersion nulle et de la pente de dispersion nulle pour les fibres visées par les Recommandations G.652 et G.653 ou valeurs du coefficient de dispersion chromatique et pente à $\lambda = 1550$ nm pour les fibres G.654.
- i) Procédure d'ajustement des données de temps de propagation relatif à la gamme de longueurs d'onde d'ajustement utilisée.
- j) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

2.5.2 Autre méthode possible (n° 1): la technique interférométrique

2.5.2.1 Généralités

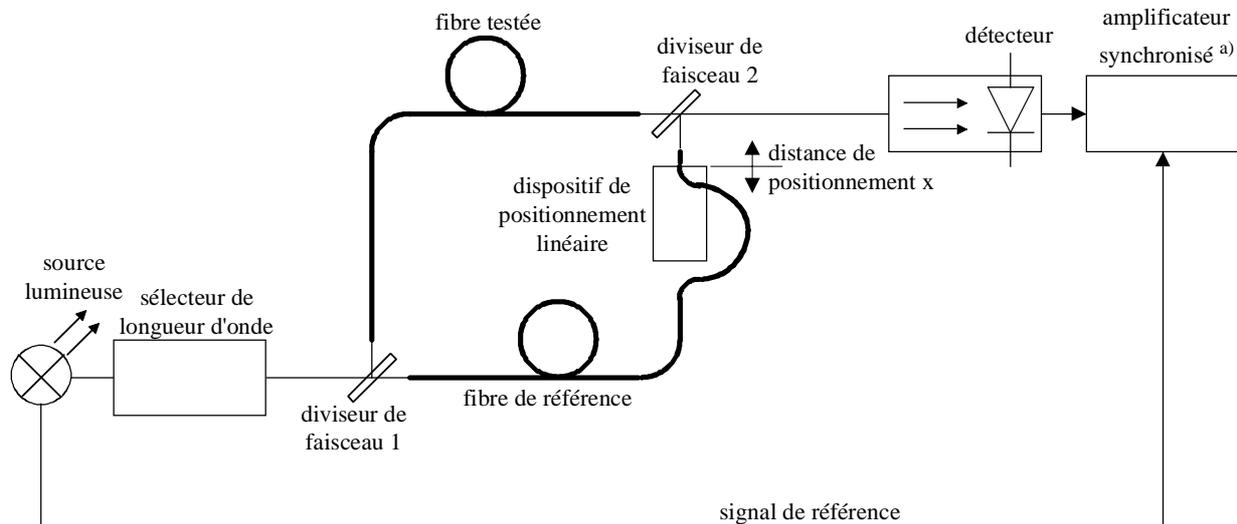
La méthode de mesure interférométrique permet de mesurer la dispersion chromatique en utilisant une courte longueur de fibre (quelques mètres). On peut ainsi mesurer l'homogénéité longitudinale de la dispersion chromatique des fibres optiques. On peut en outre mesurer l'effet de conditions générales ou locales, telles que les affaiblissements dus aux changements de température et aux macrocourbures, sur la dispersion chromatique.

Conformément au principe de la mesure interférométrique, un interféromètre Mach-Zehnder mesure la différence de temps de propagation – dépendant de la longueur d'onde – entre l'échantillon mesuré et le trajet de référence. Ce trajet de référence peut être un trajet aérien ou une fibre monomode dont on connaît le temps de propagation de groupe spectral.

Il est à noter qu'extrapoler les valeurs de dispersion chromatique déduites de mesures interférométriques sur fibres de quelques mètres de longueur à des sections de fibre de grande longueur, suppose l'homogénéité longitudinale de la fibre. Cette hypothèse peut ne pas être pas applicable dans tous les cas.

2.5.2.2 Montage de mesure

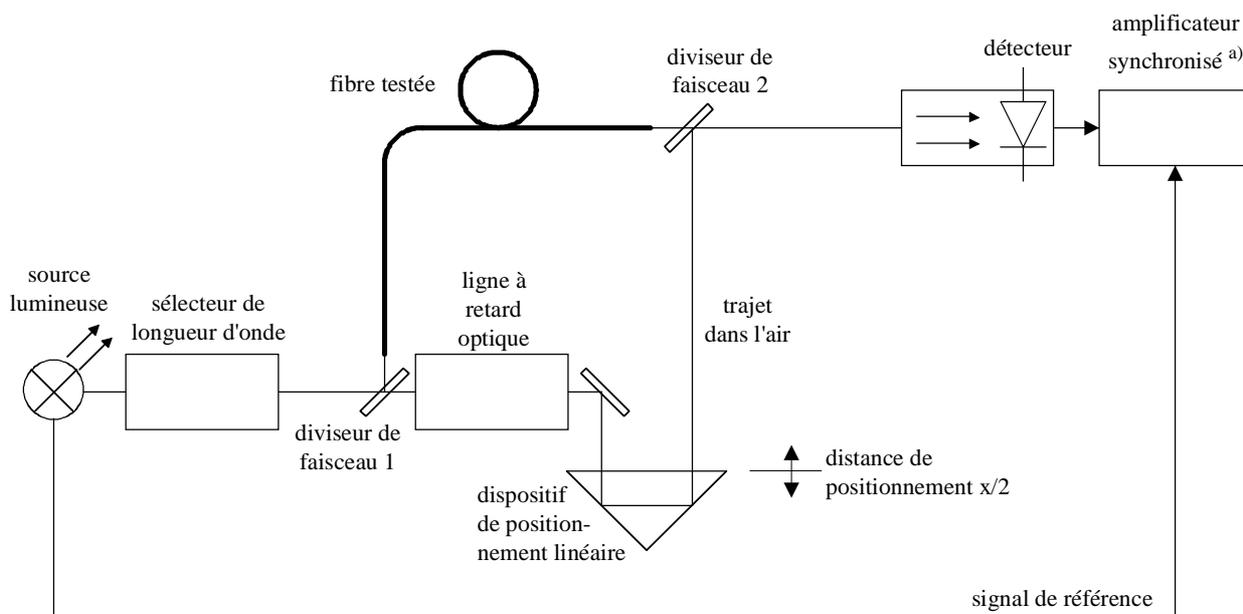
Les Figures 16 et 17 représentent le schéma du montage de mesure utilisé avec une fibre de référence et avec, comme référence, un trajet aérien.



a) Si nécessaire.

T1507740-92

Figure 16/G.650 – Schéma du montage de mesure avec fibre de référence



a) Si nécessaire.

T1507750-92

Figure 17/G.650 – Schéma du montage de mesure avec référence de trajet dans l'air

2.5.2.2.1 Source optique

La source doit avoir une assise, une intensité et une longueur d'onde stables, pendant une durée assez longue pour qu'on puisse mener à bien la procédure de mesure. La source doit être appropriée, par exemple, une source laser YAG avec une fibre Raman ou une lampe et des sources optiques de diodes électroluminescentes LED, etc. Pour appliquer la technique d'amplification avec synchronisation, une source lumineuse à modulation basse fréquence (de 50 à 500 Hz) suffit.

2.5.2.2.2 Sélecteur de longueur d'onde

On utilise un sélecteur de longueur d'onde pour sélectionner la longueur d'onde à laquelle le temps de propagation de groupe est mesuré. Un monochromateur, un filtre à interférences optiques, ou tout autre sélecteur de longueur d'onde, peuvent être utilisés selon le type des sources optiques et des systèmes de mesure. Le sélecteur de longueur d'onde peut être utilisé soit à l'extrémité d'entrée, soit à l'extrémité de sortie de la fibre à mesurer.

La largeur spectrale des sources optiques doit être limitée par la précision de la mesure de dispersion; elle est d'environ 2 à 10 nm.

Si l'on ajuste mathématiquement les données (au moyen des équations 2-16, 2-18 ou 2-20), un point de données ou moins doit être à moins de 100 nm du λ_0 .

2.5.2.2.3 Détecteur optique

Le détecteur optique doit présenter une sensibilité suffisante dans la gamme de longueurs d'onde où la dispersion chromatique est à déterminer. Au besoin, on peut transposer vers le haut le signal reçu, par exemple, au moyen d'un circuit de transimpédance.

2.5.2.2.4 Montage de mesure

Pour enregistrer les diagrammes d'interférence, on peut utiliser un amplificateur synchronisé. L'équilibrage de la longueur optique des deux voies de l'interféromètre s'effectue à l'aide d'un dispositif de positionnement linéaire placé dans le trajet de référence. En ce qui concerne le dispositif de positionnement, on prêtera attention à la précision, à l'uniformité et à la stabilité du mouvement linéaire. La variation de longueur doit couvrir la gamme comprise entre 20 et 100 mm, la tolérance étant d'environ 2 μm .

2.5.2.2.5 Echantillon

L'échantillon à tester peut être une fibre monomode non câblée ou câblée. Sa longueur doit être de 1 m à 10 m, la tolérance étant d'environ ± 1 mm. Les faces d'extrémité de la fibre seront soigneusement préparées.

2.5.2.2.6 Traitement des données

Pour analyser les diagrammes d'interférence, on utilisera un ordinateur et un logiciel approprié.

2.5.2.3 Procédure de mesure

- 1) La fibre soumise à essai est placée dans l'équipement de mesure (Figures 16 et 17). Le positionnement des faces d'extrémité s'effectue au moyen de dispositifs micrométriques à trois dimensions, en optimisant la puissance optique reçue par le détecteur. Il est impossible que les modes de gaine introduisent des erreurs.
- 2) La détermination du temps de propagation de groupe s'effectue en équilibrant les longueurs optiques des deux voies de l'interféromètre au moyen d'un dispositif de positionnement linéaire placé dans le trajet de référence pour différentes longueurs d'onde. La différence entre la position x_i du maximum du diagramme d'interférence pour la longueur d'onde λ_i et la position x_0 pour la longueur d'onde λ_0 (Figure 18) détermine la différence de temps de propagation de groupe $\Delta\tau_g(\lambda_i)$ entre le trajet de référence et le trajet de mesure. Cette différence se calcule en appliquant la formule:

$$\Delta\tau_g(\lambda_i) = \frac{x_0 - x_i}{c_0} \quad (2-22)$$

où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide. On calcule le temps de propagation de groupe de l'échantillon de test en ajoutant la valeur $\Delta\tau_g(\lambda_i)$ et le temps de propagation de groupe spectral du trajet de référence. La division de cette somme par la longueur de la fibre testée donne la mesure du temps de propagation de groupe par unité de longueur $\tau(\lambda)$ de la fibre soumise aux tests.

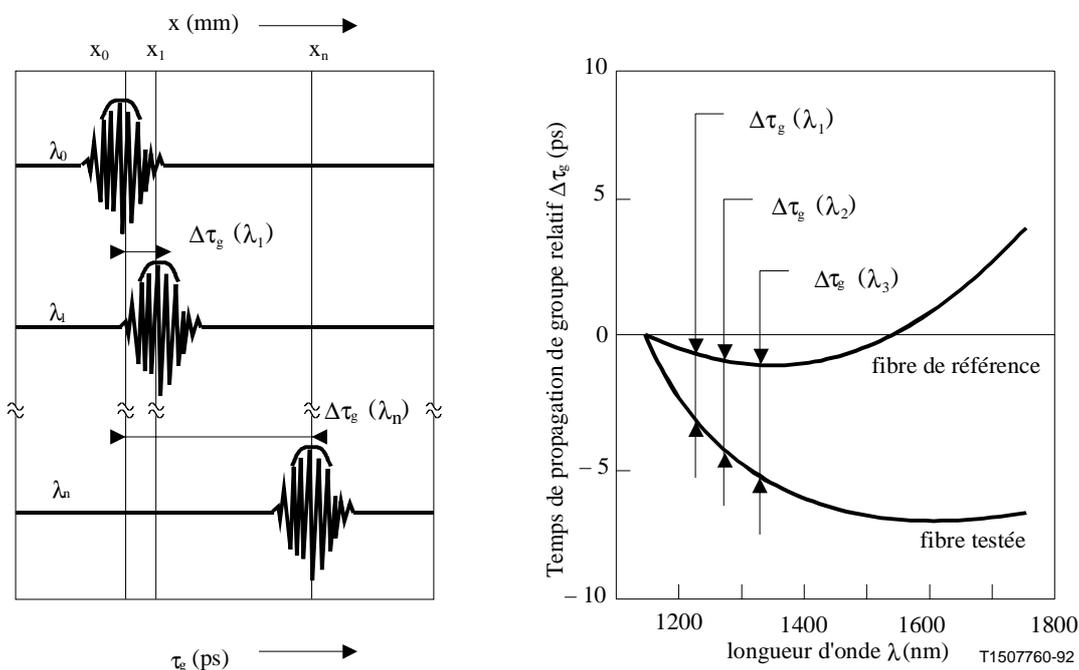


Figure 18/G.650 – Détermination du temps de propagation de groupe spectral

2.5.2.3.1 Fibres de type G.652

A partir des valeurs du temps de propagation de groupe propres de la fibre à mesurer, on peut trouver une courbe d'interpolation. Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par l'équation de Sellmeier à trois termes 2-16.

Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé à partir de l'équation de Sellmeier différenciée 2-17.

NOTE – Les équations 2-16 et 2-17 donnant respectivement $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont assez précises entre 1270 et 1340 nm; elles le sont moins dans la région des 1550 nm. La dispersion étant forte dans ce dernier cas, cette baisse de précision peut être acceptable. Dans le cas contraire, on peut l'améliorer en incluant des données de la région des 1550 nm lors de l'ajustement. A noter cependant que cela peut réduire la précision dans la région des 1310 nm.

2.5.2.3.2 Fibres de type G.653

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par l'expression quadratique 2-18. Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé à partir de l'équation quadratique de Sellmeier différenciée 2-19.

NOTE – Les équations 2-18 et 2-19 donnant respectivement $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont suffisamment précises entre 1500 et 1600 nm. Elles ne sont pas destinées à être utilisées dans la région des 1310 nm.

2.5.2.3.3 Fibres de type G.654

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre en fonction de la longueur d'onde sera ajusté par l'équation quadratique 2-20. Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé par la dérivation de l'équation quadratique différenciée 2-21.

NOTE – Les équations 2-20 et 2-21 donnant respectivement $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont suffisamment précises dans l'intervalle de 1500 à 1600 nm. Elles ne sont pas destinées à être utilisées dans la région des 1310 nm.

2.5.2.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure.
- b) Caractéristiques de la source.
- c) Identification et longueur de la fibre.
- d) Caractéristiques du sélecteur de longueur d'onde (s'il en existe un).
- e) Type de photodétecteur.
- f) Valeur de la longueur d'onde de dispersion nulle et de la pente de dispersion nulle pour les fibres visées par les Recommandations G.652 et G.653 ou valeurs du coefficient de dispersion chromatique et pente de dispersion à $\lambda = 1550$ nm pour les fibres G.654.
- g) Procédure d'ajustement du temps de propagation relatif à la gamme de longueurs d'onde d'ajustement utilisée.
- h) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

2.5.3 Autre méthode possible (n° 2): la technique du temps de propagation d'impulsions

2.5.3.1 Généralités

Le coefficient de dispersion chromatique de la fibre est obtenu à partir de la mesure du temps de propagation de groupe relatif enregistré aux diverses longueurs d'onde au cours de la propagation sur une longueur de fibre connue.

Le temps de propagation de groupe est mesuré dans le domaine temporel par détection, enregistrement et traitement du temps de propagation d'impulsions à plusieurs longueurs d'onde.

La dispersion chromatique peut être mesurée à une longueur d'onde donnée ou sur toute une gamme de longueurs d'onde.

2.5.3.2 Montage de mesure

Un schéma du montage de mesure est représenté à la Figure 15.

2.5.3.2.1 Source optique

On utilisera une source optique dont l'assise, l'intensité et la longueur d'onde resteront stables pendant une durée suffisamment longue pour pouvoir mener à bien la procédure de mesure. Selon la gamme de longueurs d'ondes explorée, il est possible d'utiliser des diodes laser {barrette de diodes laser (*LD-array*)}, des diodes laser à longueur d'onde réglable (WTL, *wavelength tunable laser*) {par exemple un laser à cavité externe (ECL, *external cavity laser*)}, des sources à large bande (par exemple un laser Nd:YAG avec fibre de Raman).

Dans tous les cas, le signal de modulation sera tel qu'il garantisse une résolution temporelle suffisante pour la mesure du temps de propagation de groupe.

2.5.3.2.2 Sélection et contrôle de la longueur d'onde

Le système de sélection et de contrôle de la longueur d'onde sert à choisir et à contrôler la longueur d'onde pour laquelle le temps de propagation de groupe sera mesuré. Comme système de sélection de longueur d'onde, et suivant le type de source optique et de dispositif de mesure installés, il est possible d'utiliser un commutateur optique, un monochromateur, des dispositifs à dispersion, des filtres optiques, des coupleurs optiques ou des connecteurs. La sélection peut être réalisée en commutant les signaux de commande électriques de sources lumineuses fonctionnant à différentes longueurs d'onde.

Le contrôle de la longueur d'onde peut être réalisé à l'aide d'un coupleur de fibres optiques et d'un ondémètre optique. Le système de sélection et de contrôle de la longueur d'onde peut être installé soit à l'entrée soit à la sortie de la fibre sous test.

Si l'on ajuste mathématiquement (au moyen des équations 2-16, 2-18 ou 2-20) les données, un point de données ou moins doit se trouver au plus à 100 nm de λ_0 .

2.5.3.2.3 Détecteur

La lumière émergeant de la fibre à mesurer, de la fibre de référence ou du diviseur optique, etc., est couplée à un photodétecteur dont le rapport signal/bruit et la résolution temporelle sont appropriés à la mesure. Si nécessaire, le détecteur est suivi d'un amplificateur à faible bruit.

2.5.3.2.4 Canal de référence

Le canal de référence peut être soit une ligne de signalisation électrique, soit une ligne de signalisation optique. Un générateur de temps de propagation approprié peut être placé sur ce canal. Dans certains cas, la fibre à mesurer elle-même peut servir de canal de référence.

2.5.3.2.5 Détecteur du temps de propagation

Le détecteur du temps de propagation mesure le déphasage entre le signal de référence et le signal de canal. Un oscilloscope à grande vitesse ou un oscilloscope à échantillonnage peut être utilisé.

2.5.3.2.6 Traitement des signaux

On peut adjoindre un dispositif de traitement des signaux afin de réduire le bruit et/ou la gigue dans la forme d'onde mesurée. Si nécessaire, on peut utiliser un calculateur numérique pour procéder à la commande de l'équipement, au stockage des données et à l'évaluation numérique des données.

2.5.3.3 Procédure de mesure

La fibre à mesurer est couplée de façon appropriée à la source et au détecteur au moyen du sélecteur de longueur d'onde ou du diviseur optique, par exemple. Si nécessaire, on peut étalonner le temps de propagation chromatique de la source. Il faut arriver à un compromis adéquat entre la résolution de longueur d'onde et le niveau du signal. A moins que la fibre à mesurer soit également utilisée comme la ligne de canal de référence, la température de la fibre doit être suffisamment stable pendant la mesure.

Le temps de propagation entre le signal de référence et le signal de canal à la longueur d'onde de fonctionnement doit être mesuré par le détecteur du temps de propagation. On procède à un traitement des données approprié au type de modulation afin d'obtenir le coefficient de dispersion chromatique correspondant à la longueur d'onde de fonctionnement. Si nécessaire, une analyse spectrale du temps de propagation de groupe en fonction de la longueur d'onde peut être exécutée; on peut obtenir une courbe d'ajustement à partir des valeurs mesurées.

2.5.3.3.1 Fibres de type G.652

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par la formule de Sellmeier à trois termes 2-16.

Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé à partir de l'équation de Sellmeier différenciée 2-17.

NOTE – Les formules 2-16 et 2-17 donnant respectivement $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont assez précises entre 1270 et 1340 nm; elles le sont moins dans la région des 1550 nm. La dispersion étant forte dans ce dernier cas, cette précision réduite peut être acceptable. Dans le cas contraire, on peut l'améliorer en incluant des données de la région des 1550 nm lors de l'ajustement. A noter cependant que cela peut réduire la précision dans la région des 1310 nm.

2.5.3.3.2 Fibres de type G.653

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par l'expression quadratique 2-18. Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé à partir de l'équation quadratique différenciée 2-19.

NOTE – Les formules 2-18 et 2-19 donnant respectivement $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont suffisamment précises entre 1500 et 1600 nm. Elles ne sont pas destinées à être utilisées dans la région des 1310 nm.

2.5.3.3.3 Fibres de type G.654

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par l'équation quadratique 2-20. Le coefficient de dispersion chromatique $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$ peut être déterminé par la dérivation de l'équation quadratique différenciée 2-21.

NOTE – Les équations 2-20 et 2-21 donnant respectivement $\tau(\lambda)$ et $D(\lambda)$ sont suffisamment précises dans l'intervalle de 1500 à 1600 nm. Elles ne sont pas destinées à être utilisées dans la région des 1310 nm.

2.5.3.4 Présentation des résultats

- a) Montage de mesure.
- b) Type de modulation utilisé.
- c) Caractéristiques de la source.
- d) Identification et longueur de la fibre.
- e) Caractéristiques du sélecteur de longueur d'onde (s'il en existe un).
- f) Type de photodétecteur.
- g) Caractéristiques du détecteur du temps de propagation.
- h) Valeurs de la longueur d'onde de dispersion nulle et de la pente de dispersion nulle pour les fibres visées par les Recommandations G.652 et G.653 ou valeurs du coefficient de dispersion chromatique et pente de dispersion à $\lambda = 1550$ nm pour les fibres G.654.
- i) Procédure d'ajustement du temps de propagation relatif à la gamme de longueurs d'onde d'ajustement utilisée.
- j) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

2.6 Méthodes de test d'épreuve

2.6.1 Méthode de test de référence: traction longitudinale

2.6.1.1 Généralités

- a) Cette méthode de test décrit des procédures consistant à appliquer brièvement des charges de traction à une longueur de fibre totale continue. La longueur initiale peut se rompre et se

diviser en plusieurs sections plus courtes; on considère alors que chacune de ces sections a subi l'essai de contrôle avec succès.

- b) Des conditions ambiantes normales doivent être appliquées pour le stockage et les tests de contrôle: température de 23 ± 5 °C et humidité relative de $50 \pm 20\%$. La durée de stockage avant les tests de contrôle doit faire l'objet d'un complément d'étude.
- c) On peut utiliser l'effort de traction σ ou la contrainte de déformation ε pour la mesure. Ces deux valeurs sont liées par la formule suivante:

$$\sigma = E(1 + c\varepsilon)\varepsilon \quad (2-23)$$

où E est le module de Young à une contrainte nulle et où c est un paramètre (généralement compris entre 3 et 6). La détermination des paramètres E et c doit, si elle est nécessaire, faire l'objet d'un complément d'étude.

- d) La contrainte σ est calculée à partir de la traction T comme suit:

$$\sigma = \frac{(1 - F)T}{\pi a^2} \quad (2-24)$$

où $2a$ est le diamètre de la fibre (125 μm) et F la fraction de la traction supportée par les revêtements. F est obtenu par:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n E_j A_j}{E_g \pi a^2 + \sum_{j=1}^n E_j A_j} \quad (2-25)$$

n est le nombre de couches de revêtement,

E_j est le module de la j^{e} couche de revêtement,

A_j est la surface nominale de section droite de la $j^{\text{ième}}$ couche de revêtement,

E_g est le module de la fibre de verre.

NOTE – Les modules des revêtements sont généralement définis par les fabricants.

2.6.1.1.1 Paramètres du test de contrôle

- a) La contrainte de test σ_p est établie de manière à contrôler la résistance des sections de fibre subsistantes. La contrainte (σ_a) imposée pendant l'essai est illustrée à la Figure 19, où l'on observe les temps de charge et de décharge (t_i et t_o) ainsi que le temps de maintien (t_d). L'effort de traction sera appliqué le plus brièvement possible, mais assez longtemps pour que la fibre soit soumise à la contrainte.
- b) La contrainte imposée sera supérieure à la contrainte de test à tout moment. La durée de décharge sera dirigée de manière à être inférieure à une valeur donnée à fixer conjointement par l'utilisateur et le fabricant, cela pour éviter les dégâts résultant de cette phase de l'essai.

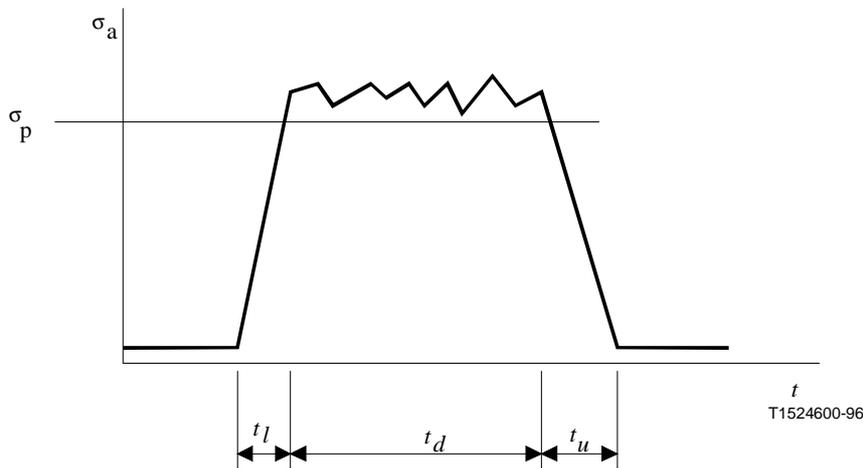


Figure 19/G.650 – Contraintes σ en fonction du temps t pendant l'essai de contrôle

2.6.1.2 Appareil de contrôle

2.6.1.2.1 Mode opératoire

- Dans les zones de déroulement et d'enroulement, la fibre est soumise à une faible contrainte ne dépassant généralement pas 10% de la contrainte de test (voir la Figure 19).
- Dans la zone de charge, la contrainte de la fibre passe de la valeur faible maintenue dans la zone de déroulement à la contrainte de test maximale. La durée de charge est t_l .
- Dans la zone d'épreuve, la contrainte appliquée (σ_a) est maintenue à des valeurs supérieures à la contrainte spécifiée, σ_p .
- Dans la zone de décharge, la contrainte passe de la valeur appliquée à une faible valeur. La durée de la décharge est t_u .
- La durée de décharge est dirigée de manière à être inférieure à une valeur maximale fixée conjointement par le fabricant et l'utilisateur. On peut la modifier en changeant la vitesse de l'essai ou en utilisant des cabestans à serrage.
- Les cabestans et poulies seront conçus et utilisés de manière à ne pas produire de dégâts excessifs. Les cabestans à serrage auront la capacité de maintenir la contrainte appliquée sans risquer d'endommager le câble par glissement.

2.6.1.2.2 Appareils de test

- Machine à cabestan de freinage* (Figure 20)

Au déroulement, la fibre est soumise à une tension réduite, de valeur constante. L'enroulement après le test d'épreuve se fait aussi à tension constante. Les niveaux de tension à l'enroulement et au déroulement sont réglables.

La tension de test est appliquée à la fibre entre les cabestans de freinage et d'entraînement, entre lesquels est créée une différence de vitesse. Deux courroies empêchent la fibre de glisser sur les cabestans. Un tensiomètre de haute précision mesure la charge imposée à la fibre et gère la différence de vitesse de manière à créer la traction voulue. Le niveau de charge et la vitesse de fonctionnement de la machine sont réglables individuellement.

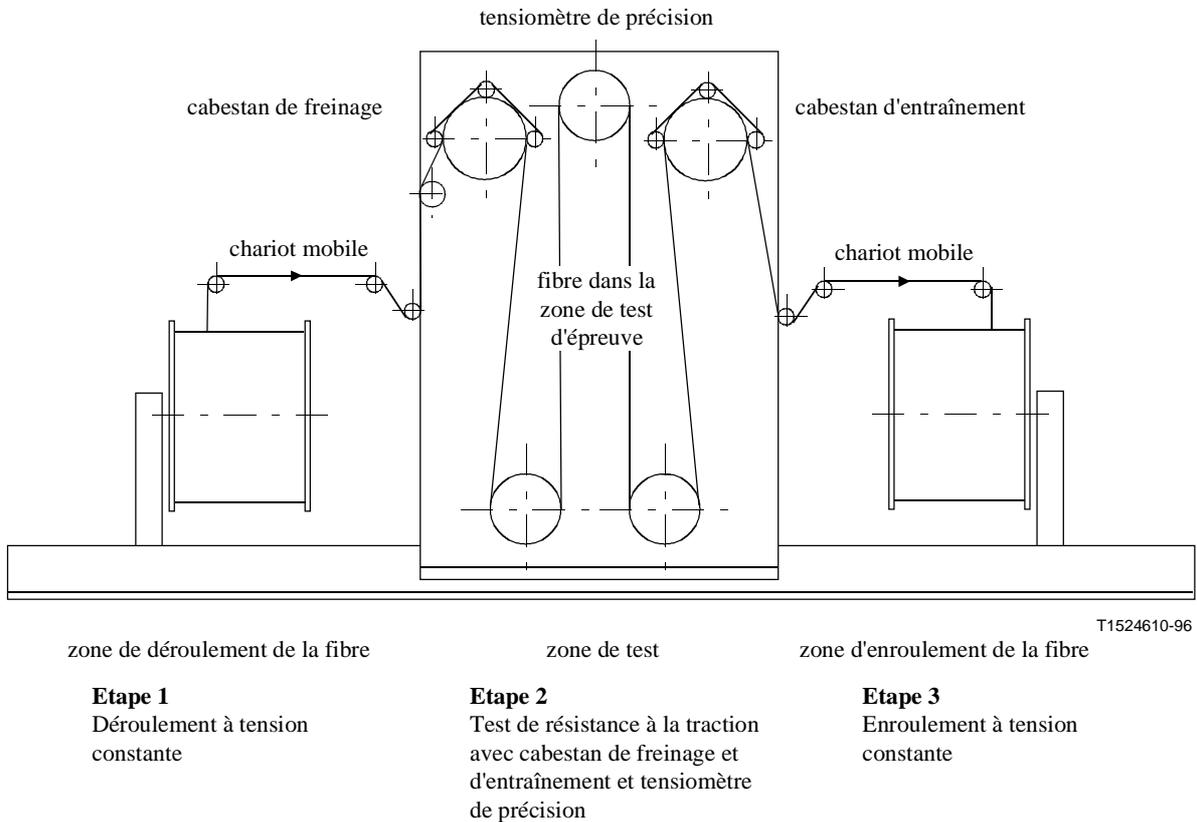
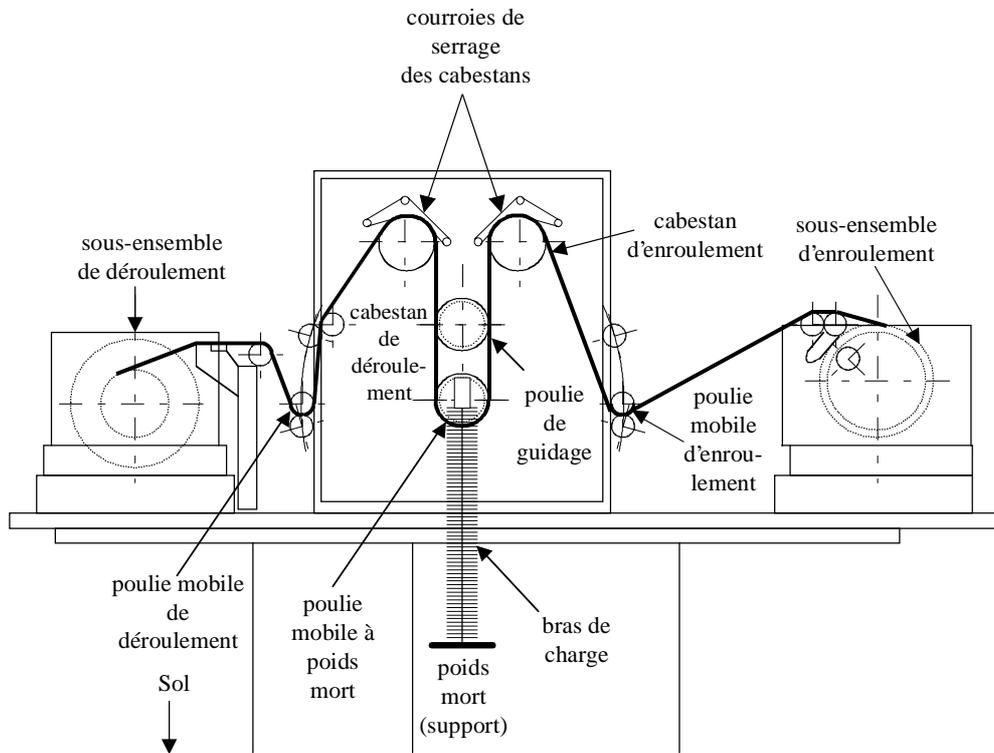


Figure 20/G.650 – Configuration type d'un montage de test à cabestan de freinage

b) *Machine à charge directe* (Figure 21)

La poulie mobile de déroulement et la poulie mobile d'enroulement sont suffisamment légères pour guider la fibre avec une tension minimale. Le cabestan de déroulement et le cabestan d'enroulement sont synchronisés. Les courroies de serrage des cabestans empêchent le glissement sur les cabestans sans toutefois créer de contrainte supplémentaire ou de risque d'endommagement des revêtements de la fibre.

Un bras de charge et un poids mort sur une plaque sont fixés à l'arbre d'une poulie mobile à poids mort afin d'appliquer la contrainte de test à la fibre. En cas de besoin, une poulie de guidage fournit, à titre facultatif, une plus grande longueur de fibre.



T1507790-92

Figure 21/G.650 – Configuration typique d'un appareil de test à charge directe

2.6.1.3 Méthode de test

2.6.1.3.1 Echantillon

- L'échantillon est la longueur totale de fibre optique, moins les courtes sections d'extrémité, qui ne répondent pas nécessairement à tous les critères tels que la durée maximale de décharge. La longueur de ces sections d'extrémité hors test, généralement inférieure à 50 mètres, sera annoncée.
- La non-conformité de la fibre doit être mise en évidence par un test de rupture complète. Les méthodes d'examen comprennent une inspection visuelle et des mesures par réflectométrie optique temporelle. Après retrait des parties brisées ou endommagées, on considère que les longueurs de fibre restantes ont subi l'essai avec succès.

2.6.1.3.2 Calculs

Si la traction appliquée par la machine est étalonnée, on calcule la contrainte à partir de l'équation 2-24. La déformation peut être obtenue à partir de l'équation 2-23.

2.6.1.4 Présentation des résultats

- Description générale de l'appareil.
- Identification de la fibre.
- Tension de test moyenne.
- Durée maximale de décharge.
- Temps de maintien.
- Longueur de section d'extrémité hors test.

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

2.7.1 La technique de l'analyse caractéristique avec matrice de Jones

2.7.1.1 Généralités

La présente méthode de test fait appel à la mesure de la dispersion modale de polarisation (PMD) de fibres optiques monomodes. Le résultat de la mesure est obtenu à partir d'une seule série de mesures avec matrice de Jones effectuées à des intervalles donnés sur une gamme de longueurs d'onde. Elle est utilisable tant sur les fibres courtes ou longues, indépendamment du degré de couplage des modes de polarisation. Dans certaines circonstances, il est nécessaire de répéter les mesures pour obtenir une précision satisfaisante. La méthode est limitée aux longueurs d'onde supérieures ou égales à celle à laquelle la fibre est réellement monomode.

2.7.1.2 Montage de test

Le schéma d'un équipement type de mesure est représenté à la Figure 22.

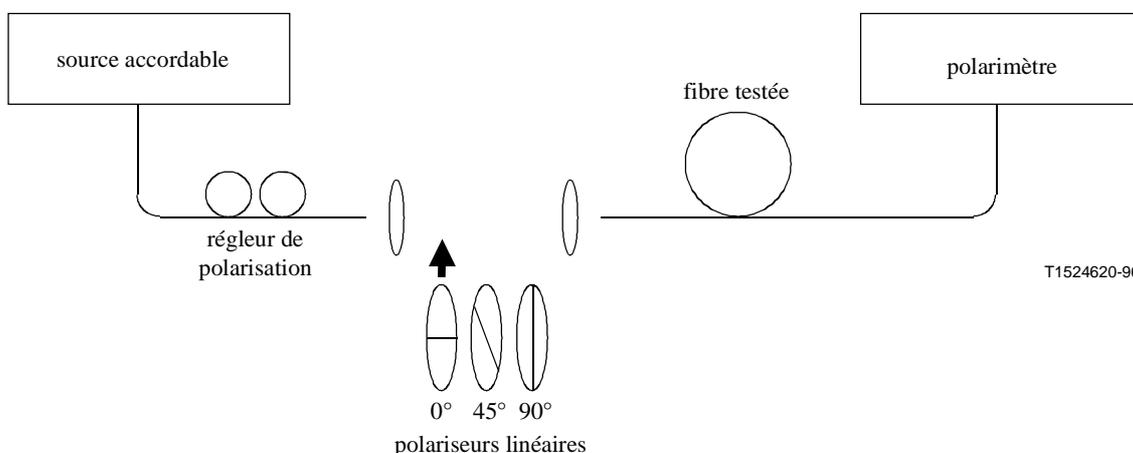


Figure 22/G.650 – Schéma d'un montage type d'essai

2.7.1.2.1 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 émergeant 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:

$$DOP = 100e^{-\frac{1}{4\ln 2} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda_{FWHM}}{\lambda_0^2} \right)^2} \quad (2-26)$$

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.

2.7.1.2.2 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.

2.7.1.2.3 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.

2.7.1.2.4 Optique d'entrée

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

2.7.1.2.5 Amorce de fibre

Lorsque l'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.

2.7.1.2.6 Système optique

Lorsque l'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.

2.7.1.2.7 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.

2.7.1.2.8 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.

2.7.1.2.9 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.

2.7.1.3 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 régulateur de polarisation, puis la sortie des polariseurs à l'entrée de la fibre testée et enfin 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 maximum acceptable de $\Delta\lambda$ (au voisinage de λ_0) est fixée par l'équation:

$$\Delta\tau_{\max} \Delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (2-27)$$

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 3, 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.

2.7.1.4 Calculs et interprétation des résultats

2.7.1.4.1 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:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right| \quad (2-28)$$

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.

2.7.1.4.2 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 23. Elles peuvent également être représentées au moyen d'un histogramme, comme le montre la Figure 24.

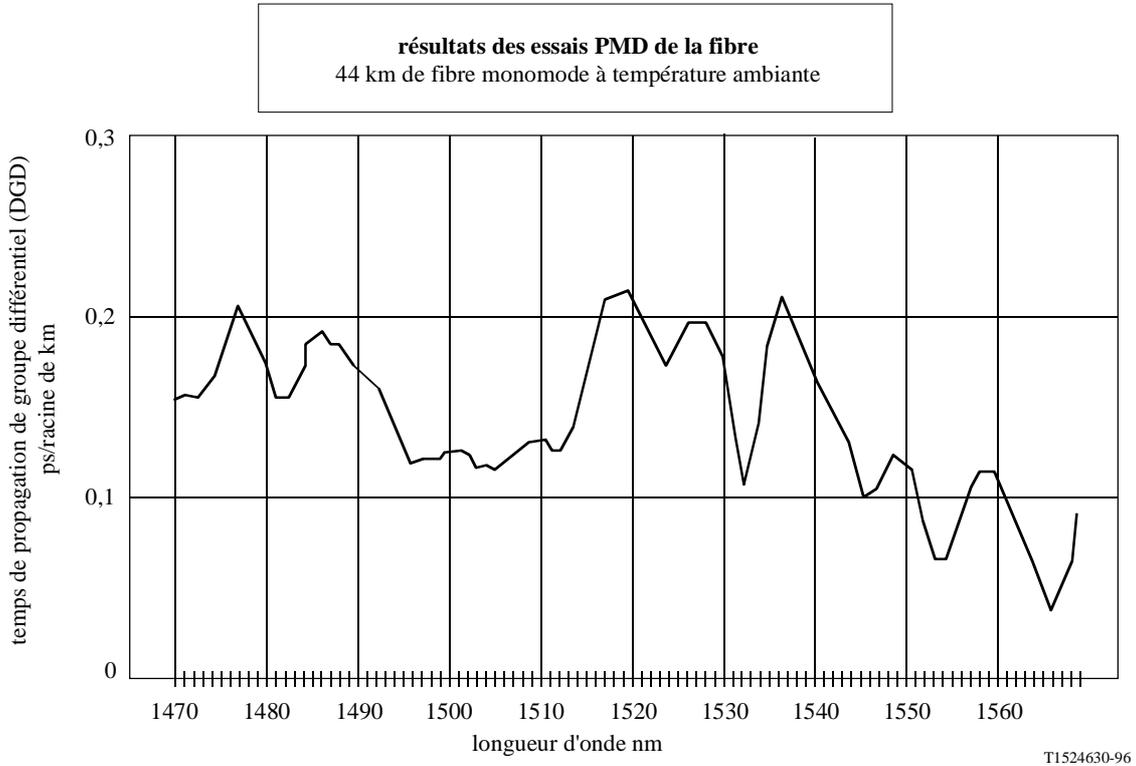
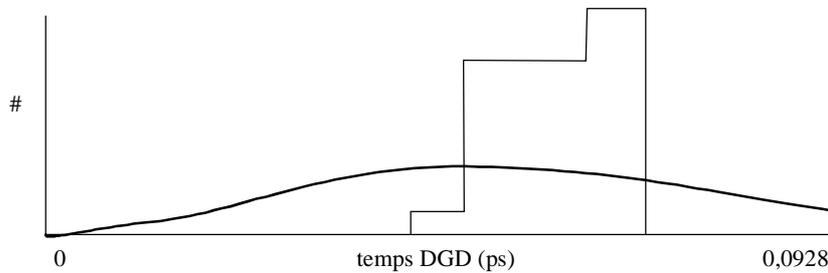
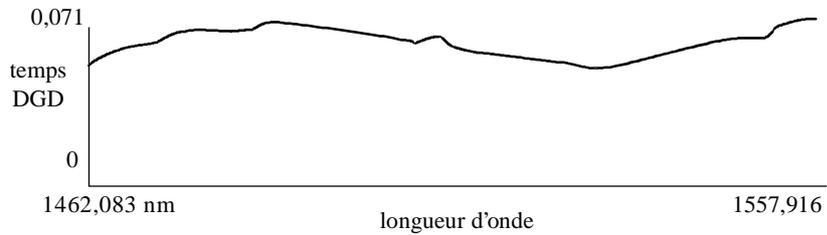
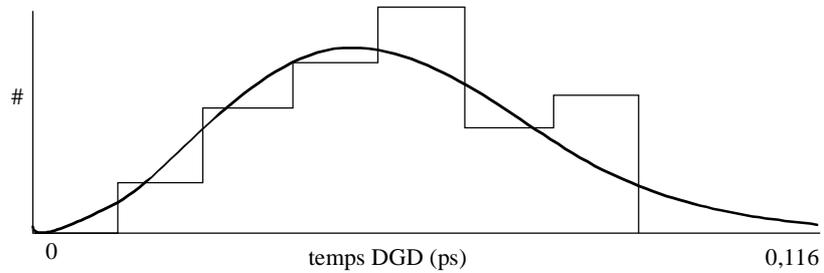
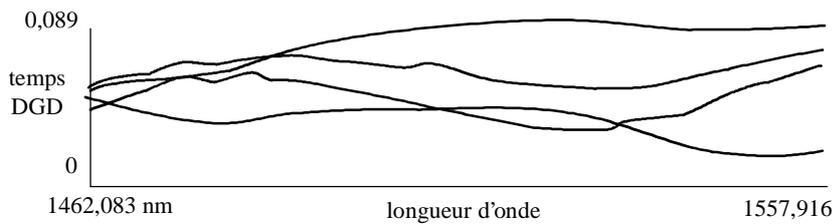


Figure 23/G.650 – Temps de propagation de groupe différentiel (DGD) mesuré sur 44 km de fibre monomode



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



T1524640-96

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

Figure 24/G.650 – Exemples de données de temps DGD présentées sous forme d'histogramme

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.

2.7.1.4.3 Temps DGD moyen

La valeur de temps DGD $\langle \Delta\tau \rangle_\lambda$ 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.

2.7.1.4.4 Coefficient de retard dû à la dispersion modale de polarisation (PMD)

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 1-9. Pour les fibres à couplage de modes aléatoire, on utilisera le coefficient "fibre longue" donné dans l'équation 1-10.

Si l'écart type de $\Delta\tau$ sur la gamme de longueurs d'onde de mesure est inférieur à 1/10ème 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" $\langle\Delta\tau\rangle/L$.

2.7.1.4.5 Présentation des résultats

- a) Identification de la fibre et/ou du câble.
- b) Longueur de test.
- c) Dispersion modale de polarisation, en ps. Si le degré de couplage de modes est connu, le retard dû à la PMD peut être exprimé en ps/km (couplage de modes négligeable) ou en ps/km^{1/2} (couplage de modes aléatoire).
- d) La gamme des longueurs d'onde sur lesquelles les mesures ont été effectuées et la valeur du pas de longueur d'onde.
- e) La configuration physique de l'échantillon de fibre ou de câble.
- f) Type de couplage de modes, c'est-à-dire déterministe, semi-aléatoire ou aléatoire.
- g) Quand on a déterminé un retard dû à la PMD moyen à partir de mesures répétitives sur l'échantillon, consignateur du nombre de mesures effectuées.
- h) Le nombre de valeurs du retard DGD obtenues à partir d'une seule mesure sur la gamme de longueurs d'onde correspondant au nombre d'intervalles de longueur d'onde.

2.7.2 La technique de l'analyseur fixe

2.7.2.1 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.

2.7.2.2 Montage de test

Le schéma du montage de test type est représenté à la Figure 25.

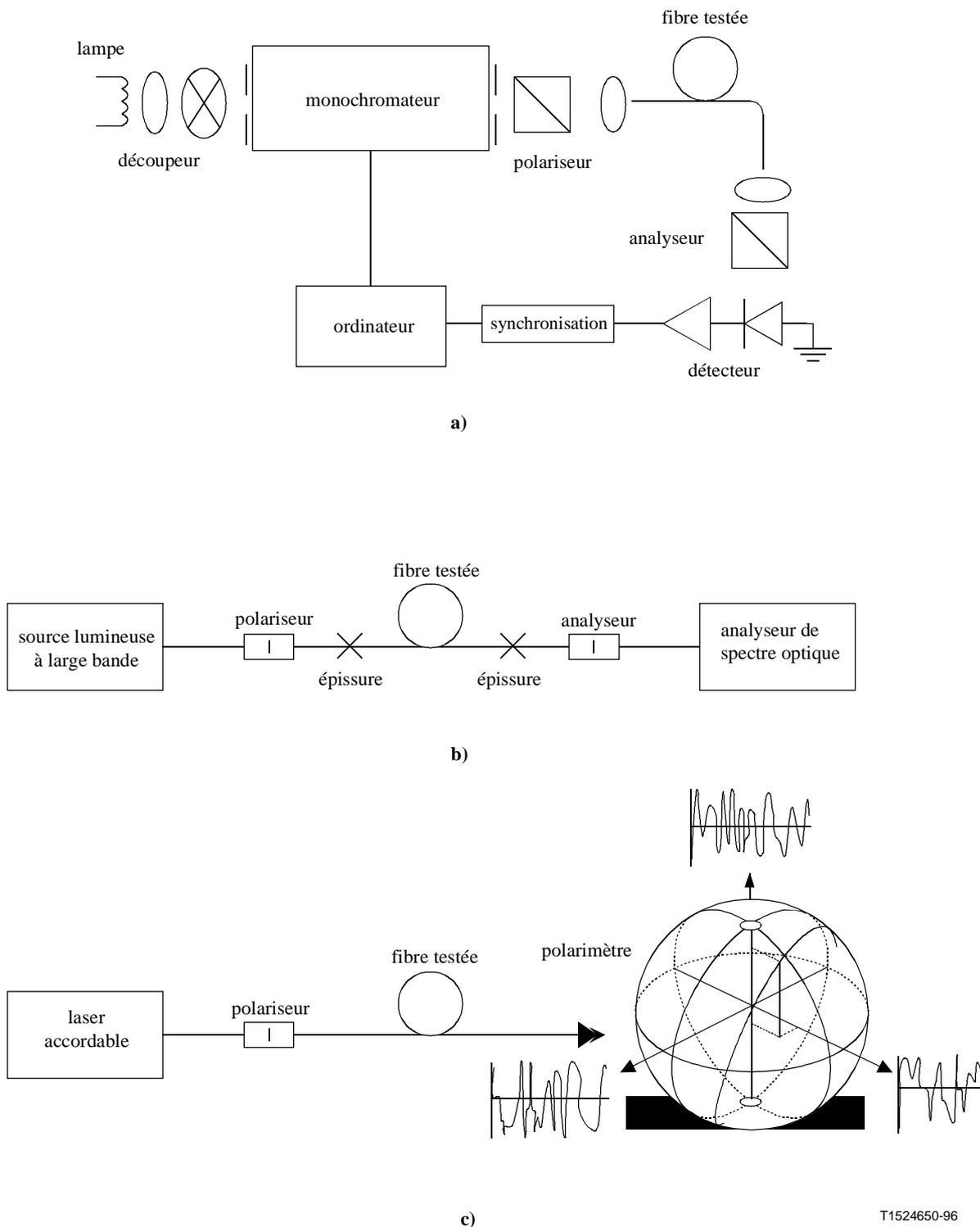


Figure 25/G.650 – Schéma des montages types

2.7.2.2.1 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.

2.7.2.2.2 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 25 a) ou d'un analyseur de spectre optique tel que le détecteur montré à la Figure 25 b). Ce filtrage n'est pas requis lorsqu'on utilise un laser accordable [voir la Figure 25 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 2.7.2.4.1.4 et 2.7.2.4.2.8).

2.7.2.2.3 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.

2.7.2.2.4 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.

2.7.2.2.5 Optique de sortie

Tout le rayonnement émergeant de la fibre doit être couplé à la région active du système de détection (voir la Figure 25). 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.

2.7.2.2.6 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 de 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.

2.7.2.2.7 Polariseur et analyseur

La présence d'un polariseur à l'entrée de la fibre (Figure 25) 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 26 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 25 c)].

2.7.2.3 Procédure de mesure

L'échantillon testé sera une fibre optique monomode de longueur connue, câblée ou non. L'échantillon et les amorces doivent être immobilisées 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 2.7.2.4.1 et 2.7.2.4.2).

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

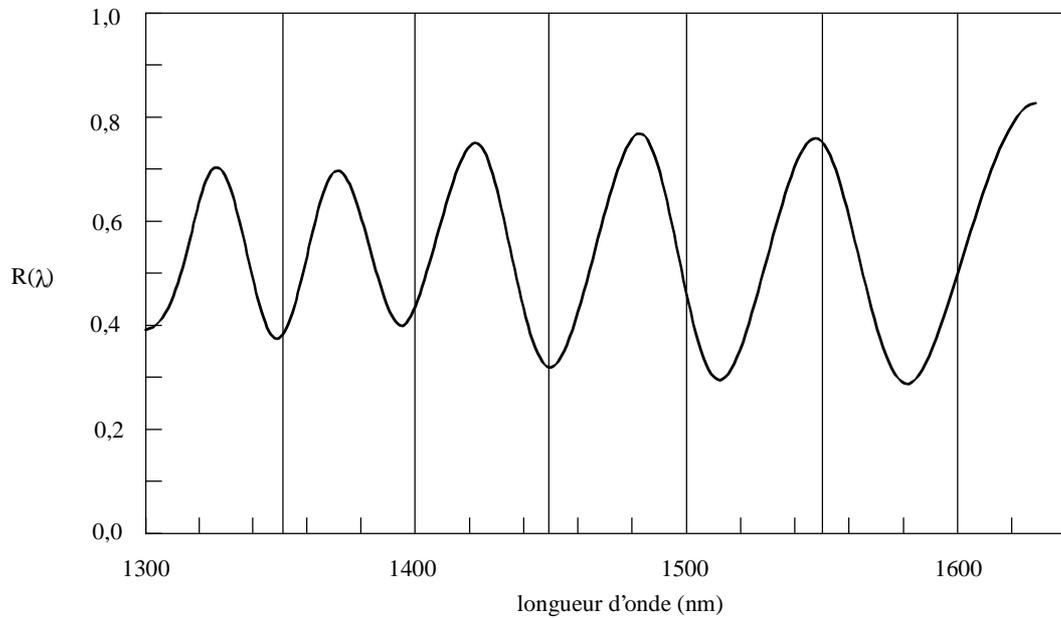
$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{TOT}(\lambda)} \quad (2-29)$$

sont représentées à la Figure 26.

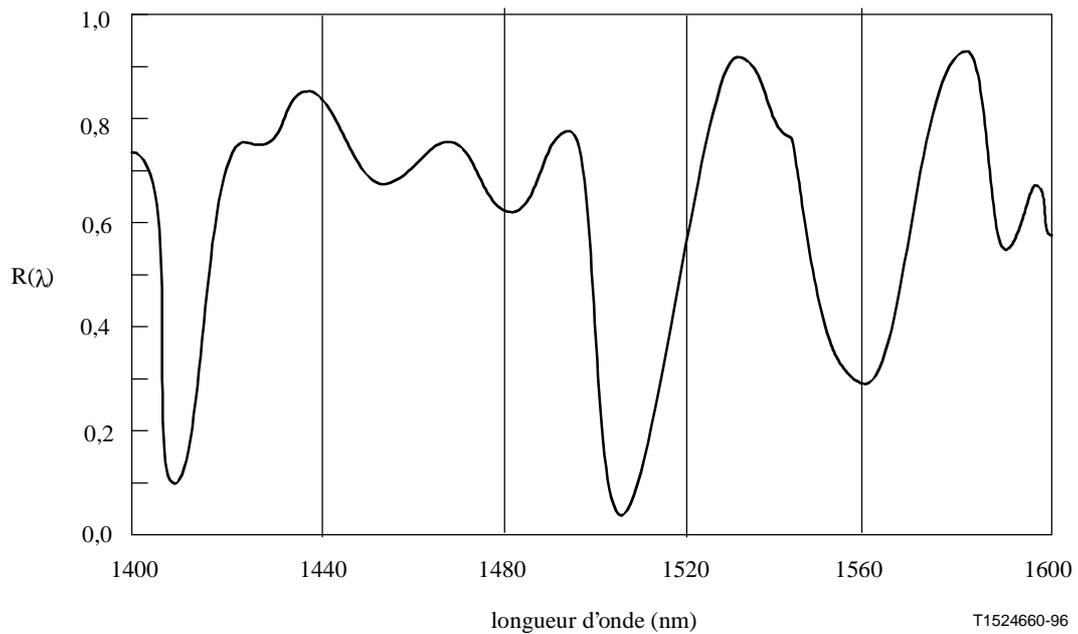
Une autre procédure consiste à laisser l'analyseur en place, mais en le tournant de 90° par rapport à l'orientation utilisée ci-dessus. Dans ce cas, on désignera le rayonnement reçu $P_{ROT}(\lambda)$, où:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_{ROT}(\lambda)} \quad (2-30)$$

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 2.7.2.4.1 et 2.7.2.4.2). 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 26/G.650 – Données types obtenues par mesure de la dispersion modale de polarisation

2.7.2.4 Calculs et interprétation des résultats

On utilisera l'une des deux méthodes suivantes décrites aux 2.7.2.4.1 et 2.7.2.4.2 pour calculer la dispersion modale de polarisation à partir des données mesurées.

2.7.2.4.1 Comptage des valeurs extrêmes

2.7.2.4.1.1 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.

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{k E \lambda_1 \lambda_2}{2 (\lambda_2 - \lambda_1) c} \quad (2-31)$$

où c est la vitesse 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 1-9) et à 0,82 dans la limite d'un couplage de modes fort (régime de l'équation 1-10).

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 2-31 ou la moyenne des trois valeurs de $\langle \Delta\tau \rangle$ obtenues par la détection polarimétrique peuvent s'utiliser dans l'équation 1-9 ou 1-10 (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 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$.

2.7.2.4.1.2 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 26 b)] et moins important dans le cas contraire [Figure 26 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).

2.7.2.4.1.3 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 26 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.

2.7.2.4.1.4 Résolution spectrale

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

$$\Delta\lambda / \lambda < (8v\Delta\tau)^{-1} \quad (2-32)$$

où ν est la fréquence optique et $\Delta\lambda$ 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 (2-32) se ramène à ce que $\Delta\lambda$ (nm) doit être inférieur à l'inverse de $\Delta\tau$ (ps).

2.7.2.4.2 Analyse de Fourier

2.7.2.4.2.1 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 2.7.2.4.2.4 et 2.7.2.4.2.5, respectivement).

2.7.2.4.2.2 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 2.7.2.3) 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 2-29 ou 2-30 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 $\delta\tau$.

2.7.2.4.2.3 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^* (nombre de points de données initiaux) / (longueur totale du réseau après remplissage de zéros); on calcule la dispersion modale de polarisation conformément aux indications du 2.7.2.4.2.4. Si tel n'est pas le cas, on calcule la dispersion modale de polarisation conformément au 2.7.2.4.2.5 ou 2.7.2.4.2.6.

2.7.2.4.2.4 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 26 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 ci-après 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:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)\delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)]} \quad (2-33)$$

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 2-33 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 1-9. 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.

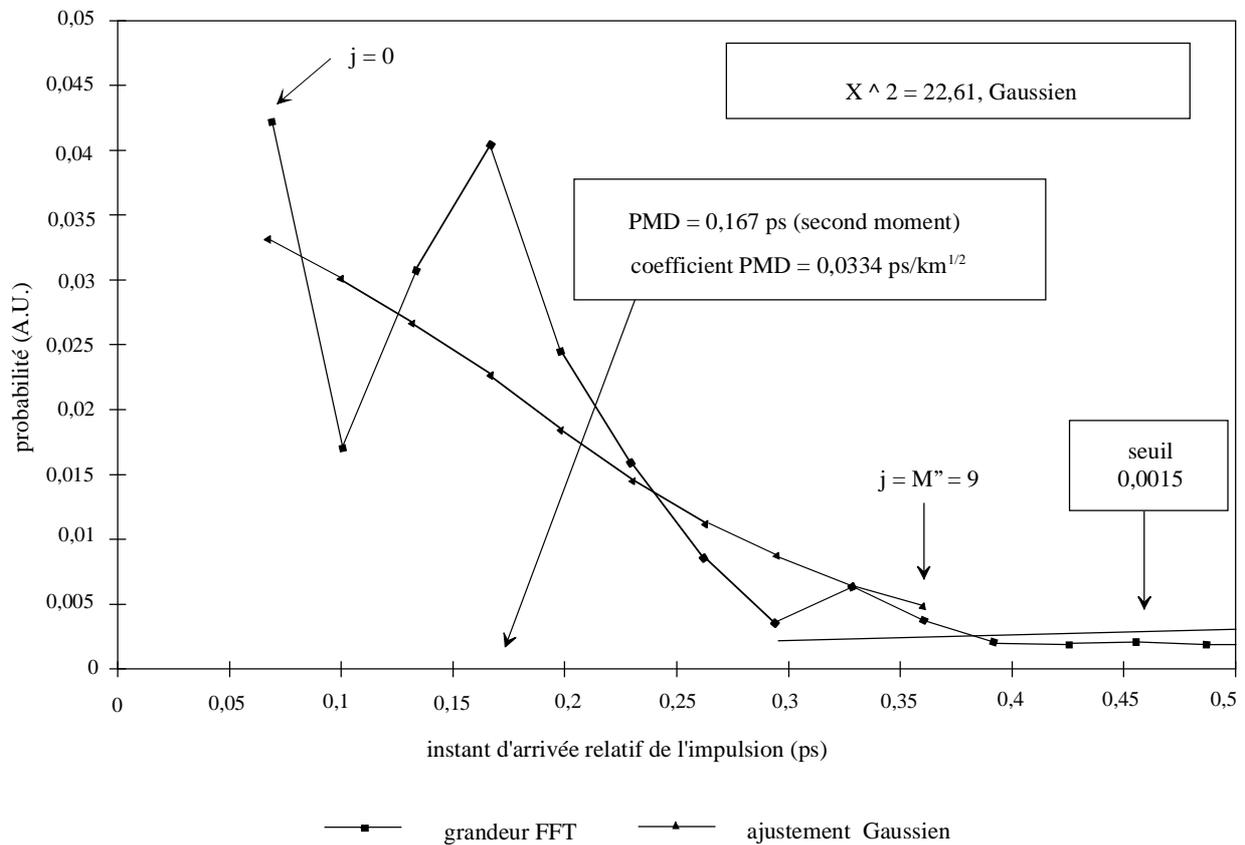
2.7.2.4.2.5 Calcul de la dispersion modale de polarisation dans les fibres à couplage de modes important

En cas de couplage de modes important, $R(\lambda)$ a l'allure d'une onde complexe comme celle de la Figure 26 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:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)\delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{1/2} \quad (2-34)$$

La valeur $\langle \Delta\tau \rangle$ calculée au moyen de l'équation 2-34 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 27.



T1524670-96

Figure 27/G.650 – Mesure de la dispersion modale de polarisation par analyse de Fourier

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

Il peut arriver que des fibres ou des composantes 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 (2.7.2.4.2.4) et la dérivée du second moment (2.7.2.4.2.5). On notera que les pics dans $P(\delta\tau)$ ne peuvent être déterminés qu'au-delà du $\delta\tau_{last}$ calculé.

2.7.2.4.2.7 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 $\delta\tau_{min}$:

$$\delta\tau_{min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (2-35)$$

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 2.7.2.4.2.3). Par exemple, pour $\lambda_1 = 1270$ nm, $\lambda_2 = 1700$ nm et $\delta\tau_{\min} = 0,033$ 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 26 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.

2.7.2.4.2.8 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):

$$\delta\tau_{\max} = 1 / (2 \cdot \Delta\nu) \quad (2-36)$$

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).

2.7.2.5 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.

2.7.3 Méthode de test: technique de l'interféromètre

2.7.3.1 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'intercorrélacion 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.

2.7.3.2 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 28, 29 et 30.

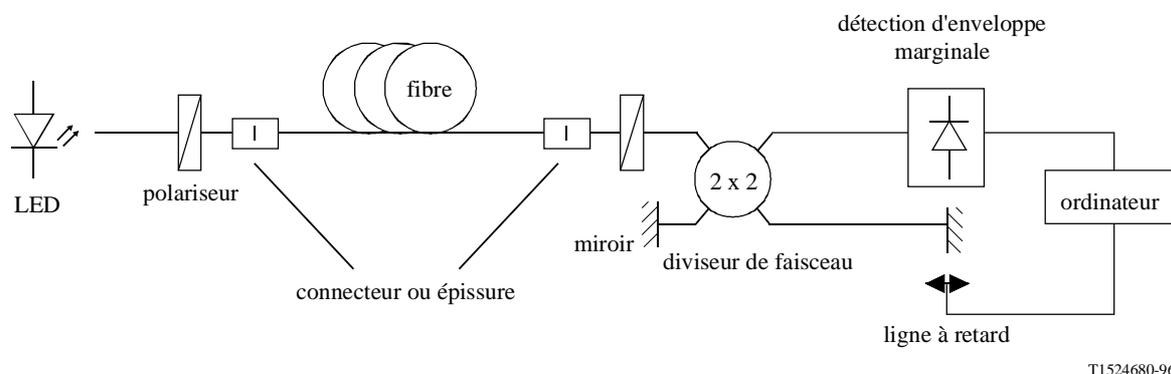


Figure 28/G.650 – Technique utilisant l'interféromètre de Michelson avec coupleur de fibre

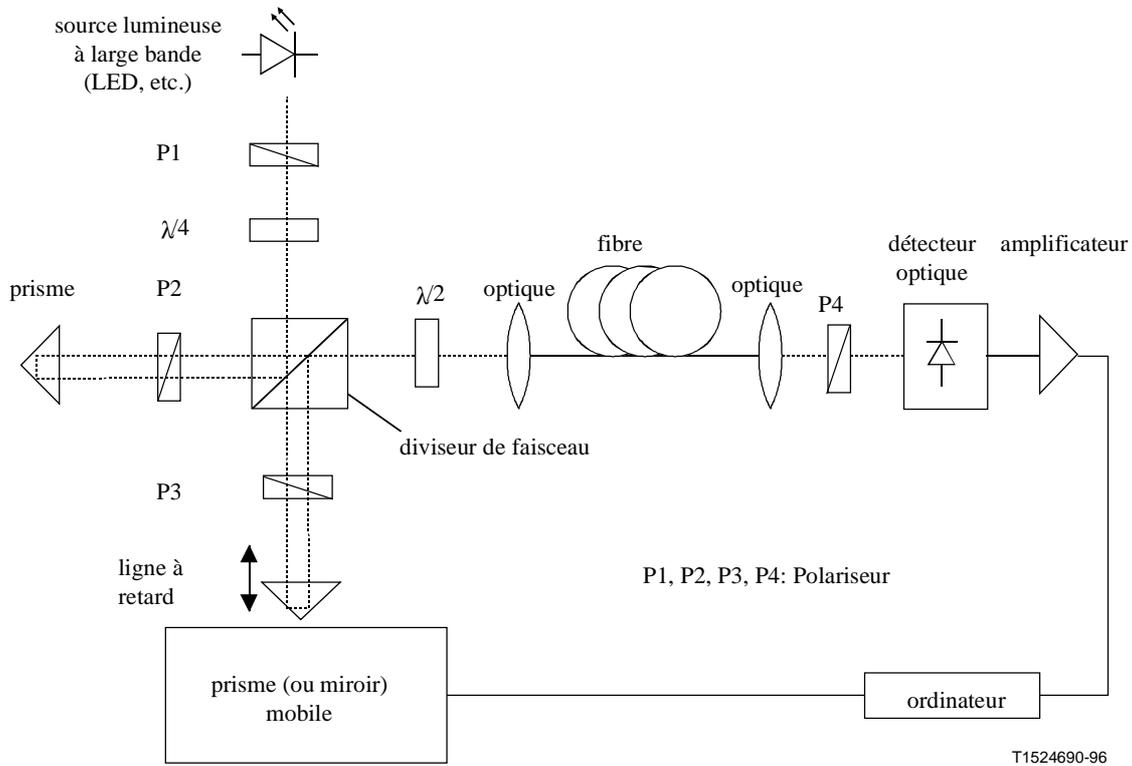


Figure 29/G.650 – Technique utilisant un interféromètre de Michelson avec trajet aérien

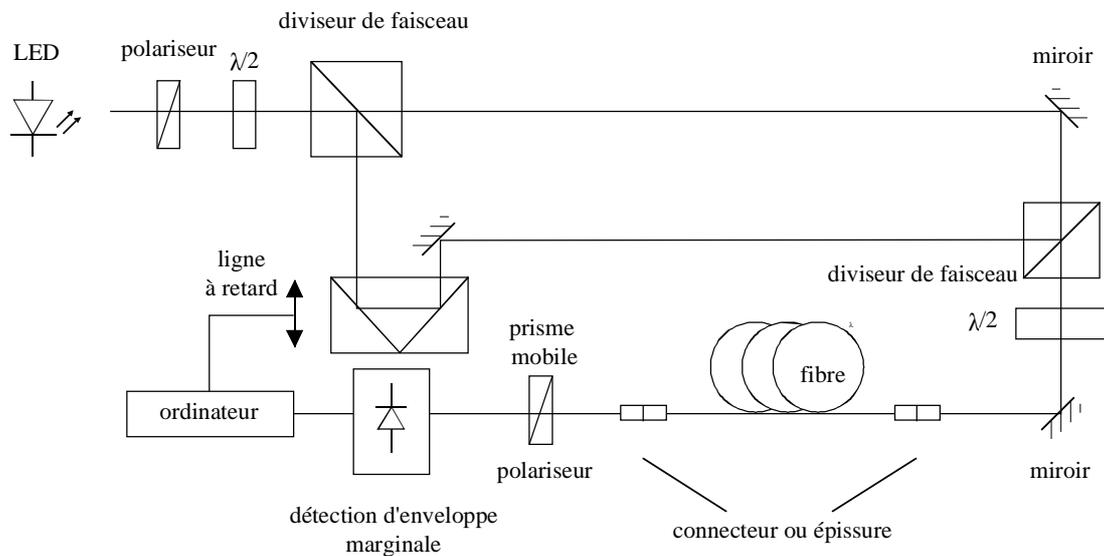
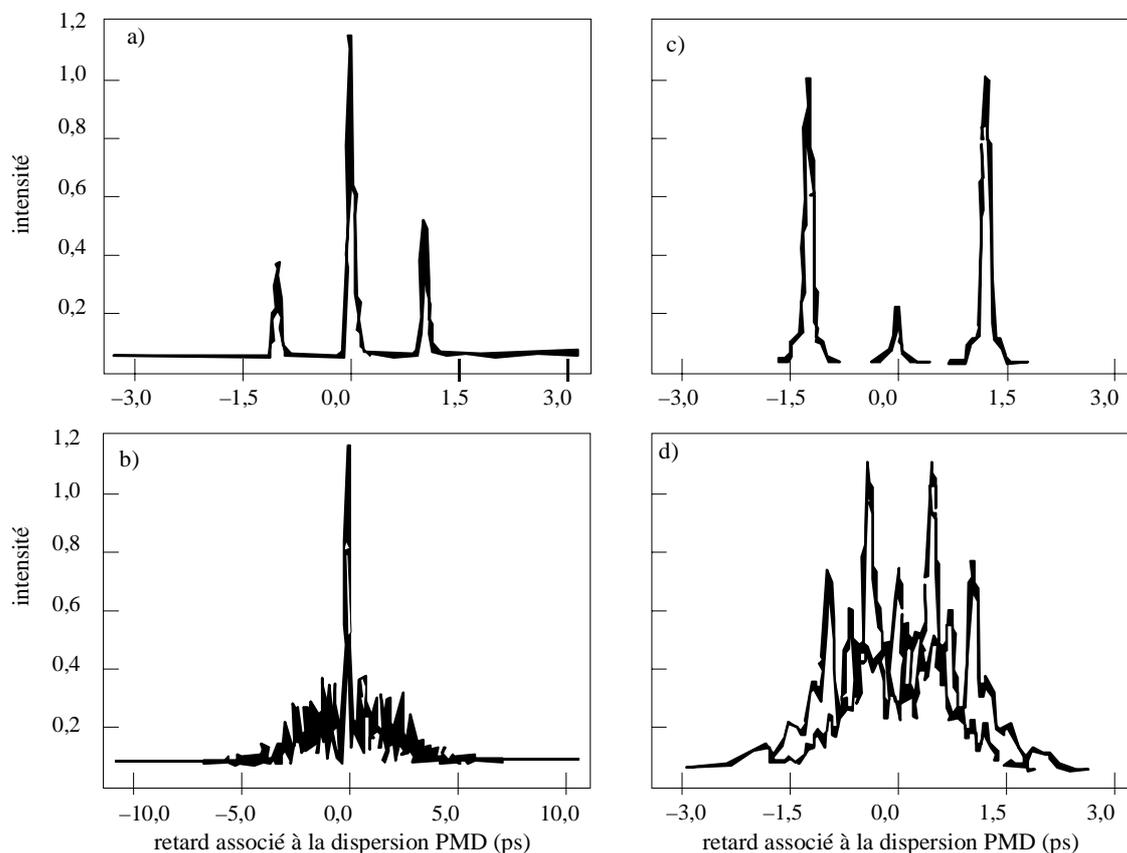


Figure 30/G.650 – Technique utilisant un interféromètre de type Mach-Zehnder avec trajet aérien

NOTE – Dans un interférogramme d'autocorrélation apparaît un pic d'autocorrélation central si l'interféromètre est parfaitement réglé [par exemple Figure 31 a), b)]. Les interférogrammes d'intercorrélations, 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 31 c), d)].



T1524710-96

Figure 31/G.650 – 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)

2.7.3.2.1 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.

2.7.3.2.2 Polariseur

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

2.7.3.2.3 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.

2.7.3.2.4 Détecteur

La lumière émergente 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.

2.7.3.2.5 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. 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.

2.7.3.2.6 Traitement des données

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

2.7.3.3 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 28 ou la Figure 30, ou encore en détecteur à travers la lentille et le polariseur représentés à la Figure 29. 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 31.

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.

2.7.3.4 Détermination de la dispersion modale de polarisation

2.7.3.4.1 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.

$$\Delta\tau = \frac{2\Delta L}{c} \quad (2-37)$$

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

2.7.3.4.2 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:

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}}\sigma \quad (2-38)$$

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

L'Appendice II 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 II, la gamme de mesure type est de 0,1-100 ps. D'autres algorithmes peuvent élargir cette gamme.

2.7.3.5 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.

2.7.3.6 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 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.

2.7.4 Méthodes de l'état principal de polarisation (PSP)

2.7.4.1 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:

$$\delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \right| \quad (2-39)$$

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) entre les principaux états de polarisation de la fibre testée en fonction de la longueur d'onde ou du temps. Le retard PMD est obtenu par moyennage sur des temps ou sur des longueurs d'onde, voire les deux. La méthode permet d'obtenir des renseignements complets sur les statistiques des temps DGD.

2.7.4.2 Montage de test

Le schéma du montage de test est représenté à la Figure 32. 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.

2.7.4.2.1 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.

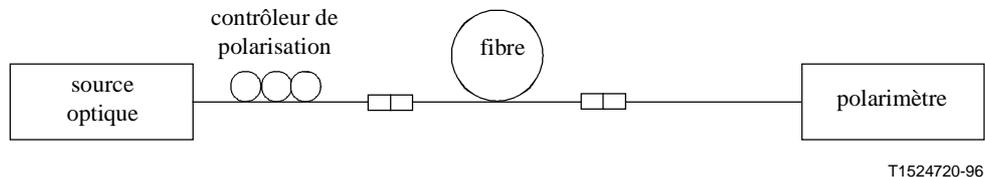


Figure 32/G.650 – Schéma de l'appareil destiné aux mesures de la PMD par analyse de l'état de polarisation

2.7.4.2.2 Contrôleur de polarisation

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

2.7.4.2.3 Polarimètre

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

2.7.4.2.4 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.

2.7.4.3 Procédure de mesure

2.7.4.3.1 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.

2.7.4.3.2 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 33, (o) et (x) 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).

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:

$$\delta\tau = \frac{\Delta\Phi}{2\pi\Delta f} = \frac{\Delta\Phi\lambda_1\lambda_n}{2\pi c\Delta\lambda} \quad (2-40)$$

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). Généralement, en unités $\sqrt{\text{km}}$.

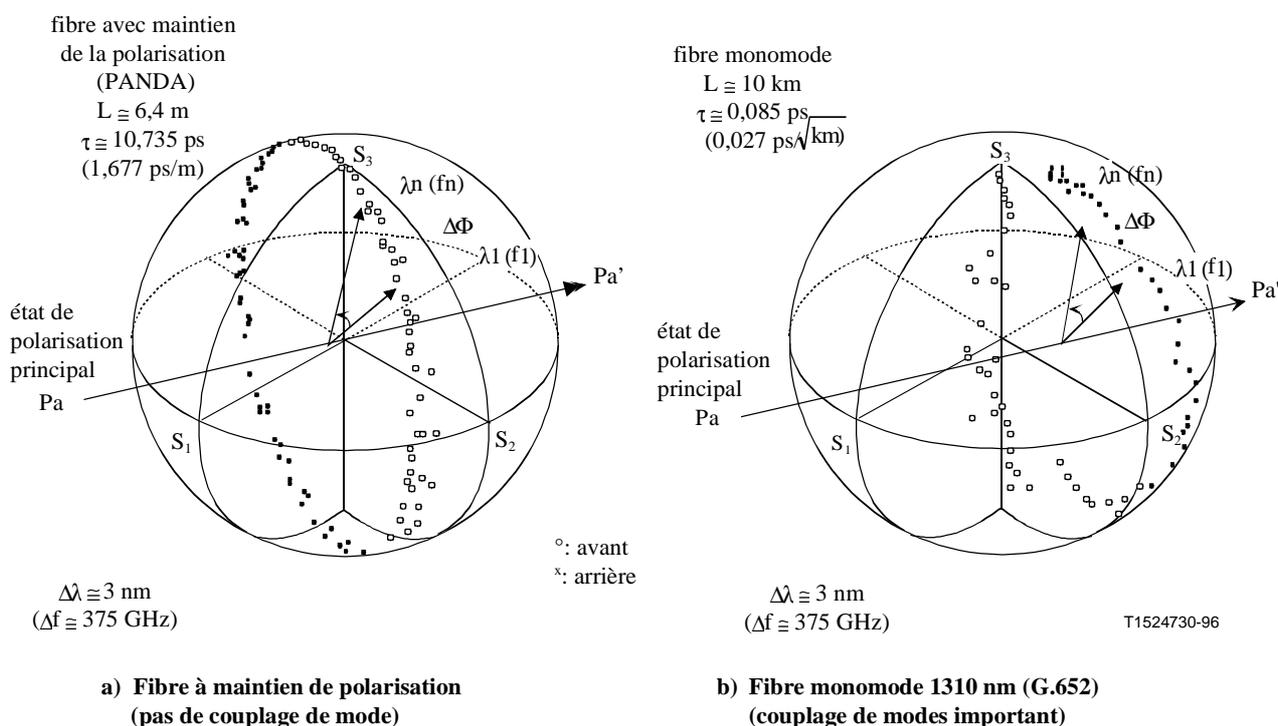


Figure 33/G.650 – Représentation sur la sphère de Poincaré de deux exemples de mesure de dispersion modale de polarisation

2.7.4.3.3 Méthode de l'état de polarisation

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:

$$SOP = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (2-41)$$

où:

$$\eta = \tan \left[0,5 \tan^{-1} \left\{ S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right\} \right] \quad (2-42)$$

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 34, 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:

$$\delta\tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c \Delta\lambda} \quad (2-43)$$

où N représente le nombre d'extremums et des courbes d'état de polarisation divisé par deux.

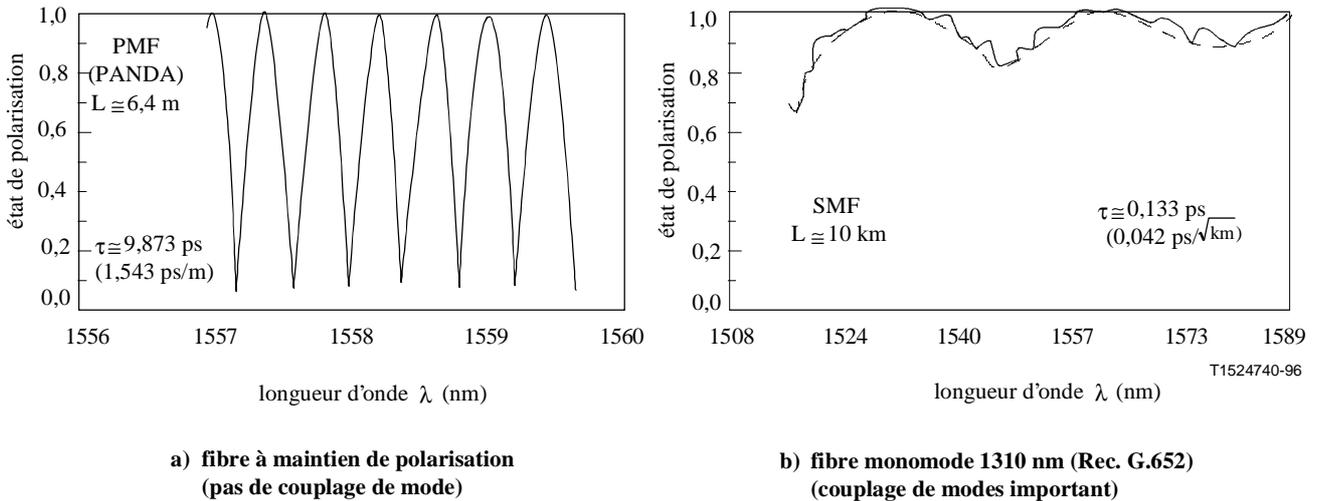


Figure 34/G.650 – Représentation de l'état de polarisation de deux exemples de mesure de la PMD

2.7.4.4 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.

Méthodes d'interpolation de la longueur d'onde de coupure

Le présent appendice contient les méthodes permettant de déterminer les coefficients A_t et B_t de l'équation 2-10 du 2.3.1.3.4.

I.1 Méthode du nombre limité d'erreurs négatives

L'algorithme trouve son origine dans la constatation que les transitions de structure (bosses) consistent en des points de données ayant un écart positif par rapport à la courbe théorique prévue. La procédure d'interpolation est fondée sur un modèle théorique de la région de transition LP_{11} et une méthode d'ajustement des données au modèle. Elle comporte six étapes.

Les deux premières définissent la région LP_{01} , ou la région des longueurs d'onde supérieures. Les deux étapes suivantes définissent la région de transition, où l'affaiblissement LP_{11} commence à croître. La cinquième étape détermine les caractéristiques de cette région en fonction d'un modèle théorique. La dernière étape est le calcul de la longueur d'onde de coupure λ_c à partir des paramètres de caractérisation.

Etape 1 – Définition de la région supérieure des longueurs d'onde

Longueur d'onde inférieure de la région

Dans le cas d'une référence multimode:

On détermine la longueur d'onde ayant la pente maximale, c'est-à-dire la longueur d'onde à laquelle la première différence, $a(\lambda) - a(\lambda + 0,01)$, est la plus grande. Pour les longueurs plus grandes que la longueur d'onde de pente maximale, la longueur d'onde inférieure de la région est celle à laquelle l'affaiblissement est minimal.

Dans le cas d'une référence courbée, ce qui suit simule la procédure pour le cas d'une référence multimode:

On détermine la longueur d'onde d'affaiblissement maximal. Pour les longueurs d'onde plus grandes que la longueur d'onde d'affaiblissement maximal, la longueur d'onde inférieure de la région est celle à laquelle la fonction suivante est minimale:

$$a(\lambda) - 8 + 8\lambda \quad (\lambda \text{ en } \mu\text{m})$$

Longueur d'onde supérieure de la région

Longueur d'onde inférieure de la région plus $0,15 \mu\text{m}$.

Etape 2 – Caractérisation de la courbe d'affaiblissement, $a(\lambda)$, de la région supérieure des longueurs d'onde comme une équation linéaire dans la longueur d'onde (λ)

$$a(\lambda) \cong A_u + B_u \lambda \quad (\text{I-1})$$

On propose d'utiliser les méthodes suivantes:

Méthode de la référence courbée:

On prend $B_u = 0$

On donne à A_u la valeur médiane des valeurs d'affaiblissement dans la région des longueurs d'onde supérieures.

Méthode de la référence multimode:

On détermine A_u et B_u de telle manière que la somme des valeurs absolues de l'erreur dans la région des longueurs d'onde supérieures est minimale et que toutes les erreurs sont non négatives. On détermine la médiane des erreurs dans la région des longueurs d'onde supérieures et l'on ajoute à A_u .

On détermine l'erreur la plus négative de la région supérieure des longueurs d'onde, E :

$$E = \min[a(\lambda) - A_u - B_u \lambda] \quad (\text{I-2})$$

Etape 3 – Détermination de la longueur d'onde supérieure de la région de transition

En commençant par la longueur d'onde supérieure de la région supérieure des longueurs d'onde, on détermine, à partir de l'étape 1, la longueur d'onde maximale à laquelle l'affaiblissement est de 0,1 dB par rapport à la courbe déterminée à l'étape 2. On prend pour longueur d'onde supérieure de la région de transition cette longueur d'onde maximale majorée de 10 nm.

Etape 4 – Détermination de la longueur d'onde inférieure de la région de transition

Il existe différentes méthodes pour déterminer cette longueur d'onde. Voici des exemples:

Soit:
$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - A_u - B_u(\lambda) \quad (\text{I-3})$$

- en commençant par la longueur supérieure de la région de transition, déterminer, à partir de l'étape 3, la longueur d'onde à laquelle $\Delta a(\lambda)$ a un maximum local et à laquelle la différence entre ce maximum et le minimum local suivant (aux valeurs λ plus grandes) est maximale;
- la longueur d'onde la plus grande, au-dessous de la longueur d'onde supérieure de la région de transition, de telle manière que:

$\Delta a(\lambda)$ est plus grand que 2 dB, et

b1) il y a un maximum local pour $\Delta a(\lambda)$, ou

b2) il y a un maximum local pour $\Delta a(\lambda) - \Delta a(\lambda + 0,01)$.

Etape 5 – Détermination de la zone de transition avec le modèle et les contraintes au niveau de l'erreur

Le modèle est une régression linéaire d'une transformation. La restriction au niveau des erreurs limite les erreurs de régression négatives de telle manière que la transformée inverse de la courbe ajustée ne produise pas d'erreur d'affaiblissement négative inférieure à E (étape 2). On peut ajuster les données en tenant compte des restrictions sur les erreurs au moyen des méthodes de programmation linéaire Simplex.

Déterminer A_t et B_t , à partir de l'équation 2-10 du 2.3.1.3.4, de telle manière que la somme des valeurs absolues des erreurs soit minimale et qu'aucune erreur ne soit inférieure à $-v(\lambda)$, où $v(\lambda)$ est une fonction de E , à partir de l'étape 2:

$$w(\lambda) = 10^{\frac{\Delta a(\lambda) - E}{10}} \quad (\text{I-4})$$

$$z(\lambda) = 10 \log \left[-\frac{10}{A} \log \left(\frac{w(\lambda) - 1}{\rho} \right) \right] \quad (\text{I-5})$$

$$v(\lambda) = Y(\lambda) - z(\lambda) \quad (\text{I-6})$$

Etape 6 – Evaluation de la pente de la transition et calcul de la longueur d'onde de coupure λ_c

Si B_t est plus grand qu'une petite valeur négative donnée, comprise par exemple entre -1 et $-0,1$, on diminue de 10 nm la longueur d'onde supérieure de la région de transition et on répète l'étape 5.

Sinon, calculer λ_c :

$$\lambda_c = -\frac{A_t}{B_t} \quad (\text{I-7})$$

I.2 Méthode des moindres carrés

Cet algorithme est basé sur l'hypothèse que la structure que l'on observe parfois dans la région de transition est produite par un effet d'interférence autour de la position de la courbe théorique.

Le modèle mathématique est le même que celui utilisé dans la méthode du nombre limité d'erreurs négatives.

Etape 1 – Comme dans la méthode du nombre limité d'erreurs négatives.

Etape 2 – Comme dans la méthode du nombre limité d'erreurs négatives. E de l'équation I-2 n'est pas nécessaire.

Etape 3 – Comme dans la méthode du nombre limité d'erreurs négatives.

Etape 4 – Comme dans la méthode du nombre limité d'erreurs négatives.

Etape 5 – On détermine la zone de transition.

Le modèle est une approximation la plus proche par moindres carrés d'une transformée.

On calcule A_t et B_t , à partir de l'équation (2-10) du 2.3.1.3.4, de telle manière que la somme des carrés des erreurs soit minimale, au moyen des équations 2-7, 2-8, 2-9 et :

$$W(\lambda) = 10^{\Delta a(\lambda)/10} \quad (\text{I-8})$$

Etape 6 – Comme dans la méthode du nombre limité d'erreurs négatives.

APPENDICE II

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 II.1.

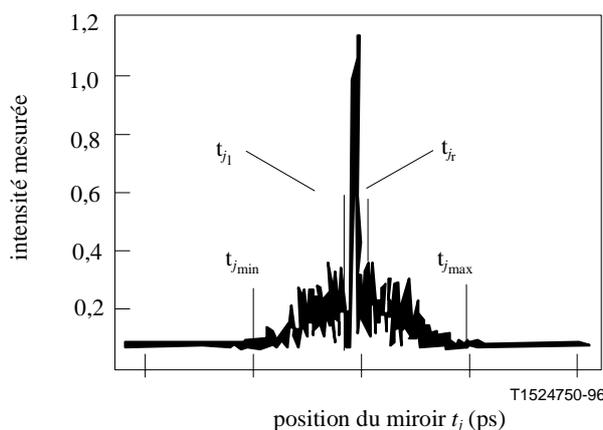


Figure II.1/G.650 – Paramètres pour l'analyse par interférogramme

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: $N_5 = (5 N/100)$

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

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

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

Etape 2 – Définition de l'intensité décalée I_j

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

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

Etape 3 – Calcul du centre (C) de l'interférogramme

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

Etape 4 – Suppression de la crête d'autocorrélation centrale

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

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

où τ_c est le temps de cohérence de la source.

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

$$j_r := j_i + 1 \quad (\text{II-9})$$

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

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

Etape 6 – Troncature de l'interférogramme

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

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

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

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

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

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

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

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

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

APPENDICE III

Attributs non linéaires

III.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 trajets longs 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.

III.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:

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

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

$$I(r) = \exp\left(-2r^2 / w^2\right) \quad (III-2)$$

où $2w$ est le diamètre du champ de mode, alors l'équation III-1 peut être intégrée analytiquement pour donner:

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

L'approximation de Gauss est précise pour les fibres G.652 et G.654 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 G.653 à dispersion décalée, A_{eff} ne peut pas être estimée avec précision avec l'équation III-3.

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

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

où k est un facteur de correction.

III.3 Facteur de correction k

Au cours de l'expérience, le diamètre de champ de mode (MFD, *mode field diameter*) a été mesuré par la méthode de l'essai à ouverture variable. Ensuite il a été possible de calculer à partir du diagramme de champ lointain de la puissance optique de sortie $P(r)$, le diagramme de champ proche au moyen d'une transformation inverse de Hankel. A_{eff} était ensuite calculée à partir du diagramme de champ proche au moyen de l'équation III-1.

Le facteur de correction k de l'équation III-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 à dispersion nulle. Les Figures III.1 et III.2 donnent des exemples des résultats calculés et mesurés pour divers types de fibres.

Pour d'autres types de fibres pouvant être mises au point pour les applications optiques sous-marines et le multiplexage en longueur d'onde, la relation de A_{eff} par rapport à w peut varier et doit être déterminée au moyen de l'équation III-1. Les plages de valeurs de k pour ces exemples sont indiquées dans le Tableau III.1.

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.

Tableau III.1/G.650 – 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 des Figures III.1 et III.2

Type de fibre	Longueur d'onde λ	
	~ 1310 nm	~ 1550 nm
Rec. G.652	0,970 ~ 0,980 ^{a)}	0,955 ~ 0,965
Rec. G.654	...	0,975 ~ 0,985 ^{a)}
Rec. G.653	0,940 ~ 0,950	0,945 ~ 0,960 ^{a)}

a) Région de longueur d'onde optimale.

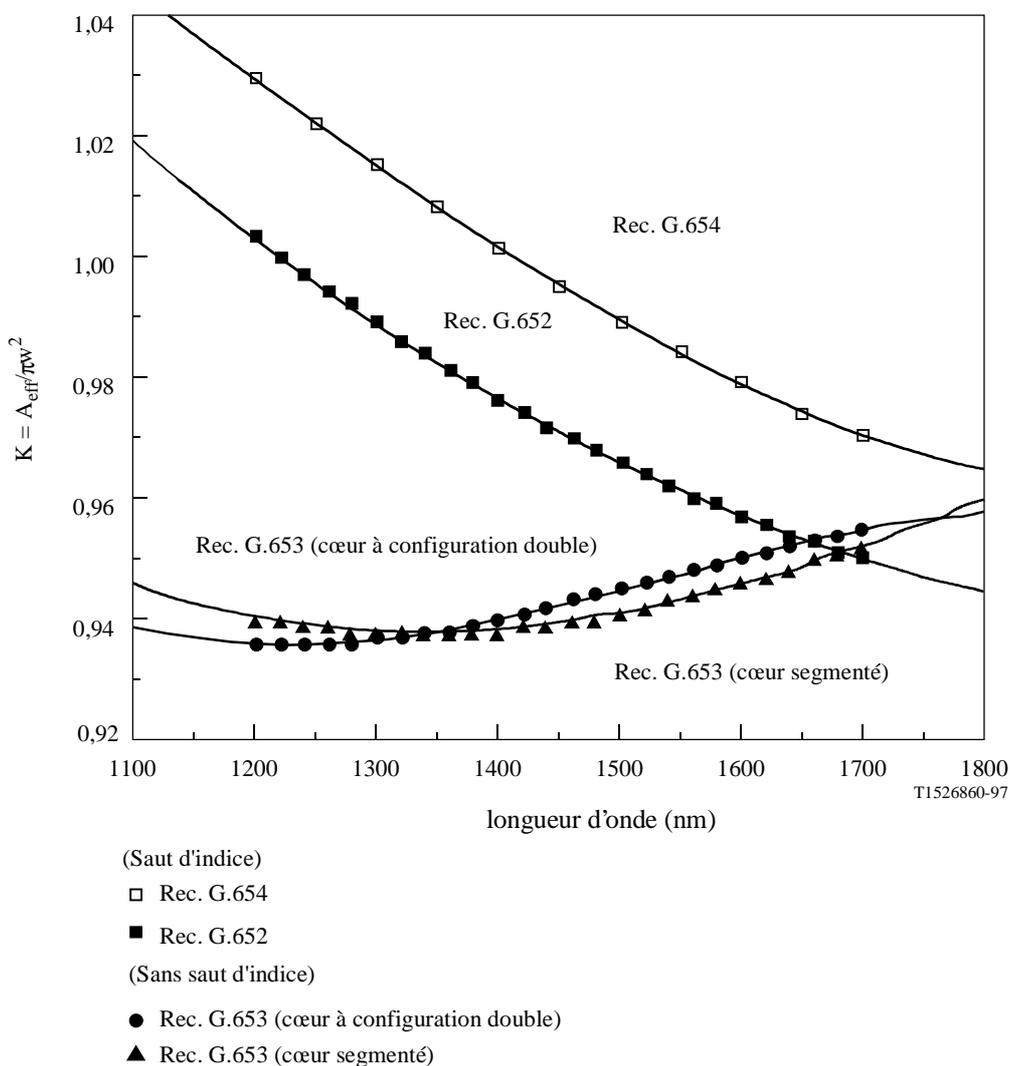


Figure III.1/G.650 – Facteur de correction k de A_{eff} et diamètre de champ de mode (= 2W) en fonction de la longueur d'onde pour des fibres G.652, G.653 et G.654 (obtenues par calcul)

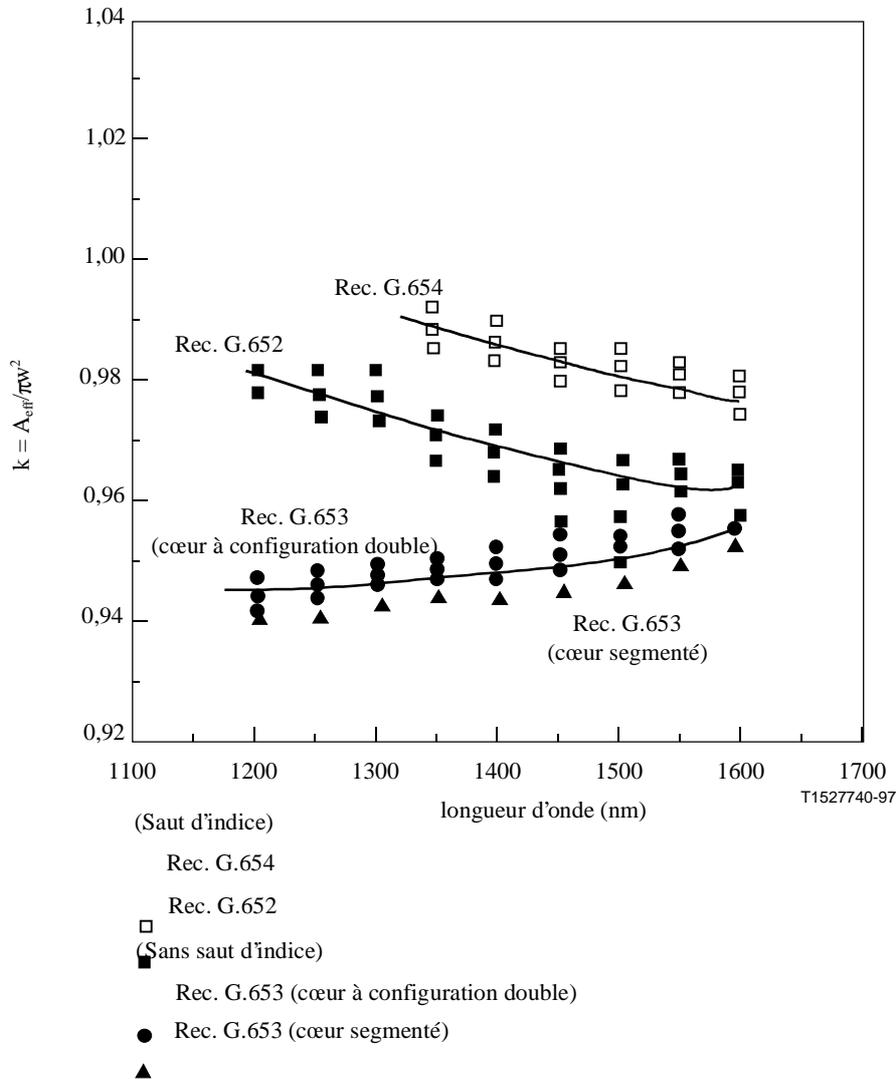


Figure III.2/G.650 – Facteur de correction k de A_{eff} et diamètre de champ de mode ($= 2W$) en fonction de la longueur d'onde pour des fibres G.652, G.653 et G.654 (obtenues par mesure)

III.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:

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

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.

III.5 Diffusion stimulée de Brillouin

III.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.

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

III.5.2.1 Seuil de diffusion SBS

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

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

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:

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

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:

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

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.

III.5.2.2 Montage de mesure du seuil de diffusion SBS

La Figure III.3 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

estée 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 III.4 montre un exemple de lumière transmise et rétrodiffusée à 1,32 μm en fonction d'une puissance d'entrée pour une fibre de type G.654. 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 III.4). Le Tableau III.2 résume les paramètres de la fibre et les seuils de diffusion SBS pour divers types de fibre.

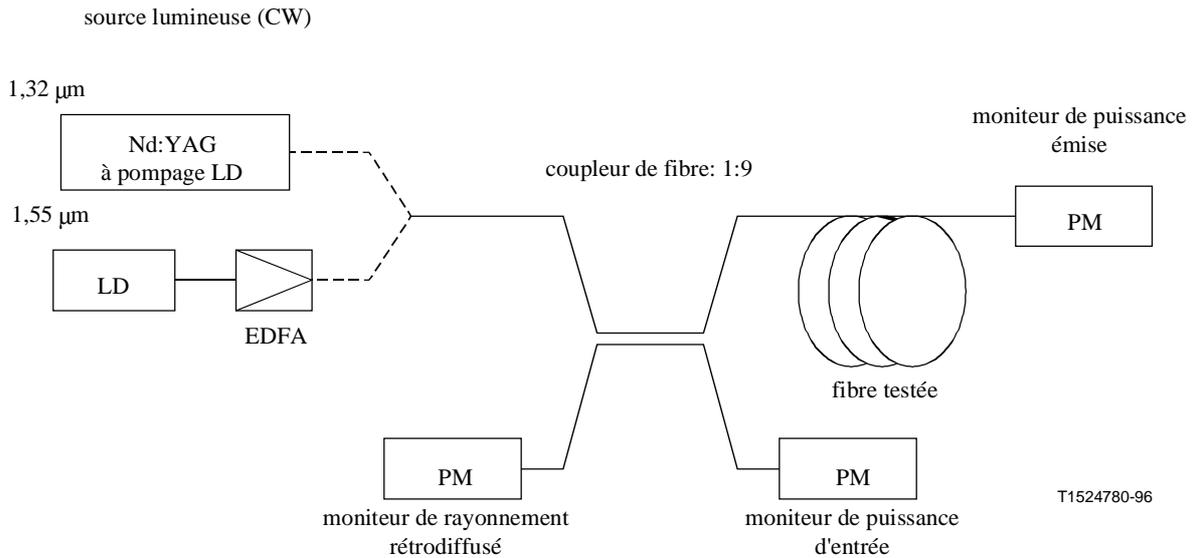


Figure III.3/G.650 – Montage de mesure

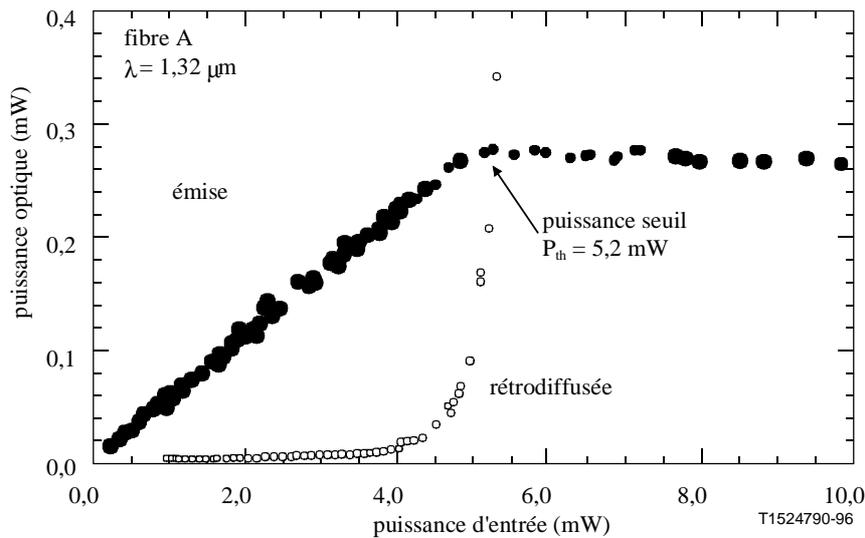


Figure III.4/G.650 – Puissance émise et puissance rétrodiffusée en fonction de la puissance d'entrée

Les puissances seuil indiquées dans le Tableau 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 III.2/G.650 – Valeurs des paramètres obtenues avec certaines fibres lors des tests

Fibre		A	B	C	D	E	F	G
type de fibre		Rec. G.654	Rec. G.652	Rec. 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

III.5.2.3 Estimation du seuil de diffusion SBS

La Figure III.5 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:

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

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

L'équation III-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:

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

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 III-9.

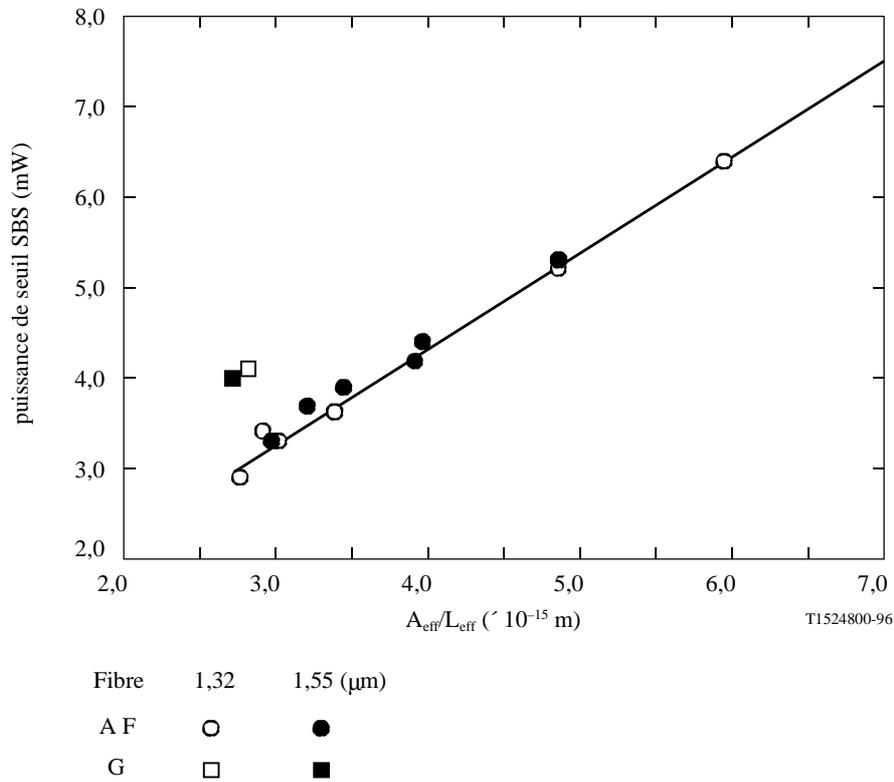


Figure III.5/G.650 – Relations entre le seuil de diffusion SBS et le rapport $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$

III.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.

SERIES 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	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, de télégraphie, de télécopie, circuits téléphoniques 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 pour données et communication entre systèmes ouverts
Série Z	Langages de programmation