



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.650.1

(06/2004)

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

Caractéristiques des supports de transmission – Câbles à
fibres optiques

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

Recommandation UIT-T G.650.1

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

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

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

Recommandation UIT-T G.650.1

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

Résumé

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

Ces méthodes de test s'appliquent principalement aux mesures en usine des attributs linéaires déterministes des fibres et câbles optiques monomodes. Certaines de ces méthodes peuvent également servir à caractériser des composants optiques autonomes.

Source

La Recommandation UIT-T G.650.1 a été approuvée le 13 juin 2004 par la Commission d'études 15 (2001-2004) de l'UIT-T selon la procédure définie dans la Recommandation UIT-T A.8.

Historique

- 1993 Les définitions et les méthodes de test ont été retirées des Recommandations concernant les fibres monomodes telles que la Rec. UIT-T G.652 et ont été utilisées pour créer la version initiale de la Rec. UIT-T G.650.
- 1997 La deuxième version de la Rec. UIT-T G.650 ajoute des définitions et méthodes de test pour la dispersion modale de polarisation ainsi que les Appendices I, II et III. La détermination améliorée de la longueur d'onde de coupure (désormais § 5.3.1.3.4) a également été ajoutée.
- 2000 La troisième version a établi les méthodes de référence et les autres méthodes de test pour la dispersion modale de polarisation, modifié les définitions et méthodes de test pour l'erreur de concentricité de cœur (§ 3.4 et 5.2) et ajouté un § 5.1.4 et les Appendices IV, V et VI.
- 2002 La Rec. UIT-T G.650 a été divisée en Recommandations plus petites, en vue d'en faciliter la mise à jour. La Rec. UIT-T G.650.2 contient les définitions et méthodes de test applicables aux attributs statistiques et non linéaires des fibres et des câbles à fibres optiques monomodes.
- 2004 La deuxième version de la Rec. UIT-T G.650.1 a visé à ajouter une troisième méthode de test possible "Modélisation de l'affaiblissement spectral" (§ 5.4.4) ainsi que le nouvel Appendice III "Exemple de modèle de matrice". Ces informations, qui figuraient dans les Recommandations concernant les fibres monomodes, ont été transférées dans la Rec. UIT-T G.650.1. En outre, des procédures d'ajustement de la dispersion chromatique ont été ajoutées (Annexe A).

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

NOTE

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

Le respect de cette Recommandation se fait à titre volontaire. Cependant, il se peut que la Recommandation contienne certaines dispositions obligatoires (pour assurer, par exemple, l'interopérabilité et l'applicabilité) et considère que la Recommandation est respectée lorsque toutes ces dispositions sont observées. Le futur d'obligation et les autres moyens d'expression de l'obligation comme le verbe "devoir" ainsi que leurs formes négatives servent à énoncer des prescriptions. L'utilisation de ces formes ne signifie pas qu'il est obligatoire de respecter la Recommandation.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

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

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

© UIT 2005

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

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application	1
2	Références.....	1
	2.1 Références normatives.....	1
	2.2 Références informatives	1
3	Termes et définitions	2
	3.1 Définitions générales	2
	3.2 Caractéristiques mécaniques	2
	3.3 Caractéristiques du champ de mode	2
	3.4 Caractéristiques géométriques de la fibre.....	3
	3.5 Définitions de la dispersion chromatique	4
	3.6 Autres caractéristiques.....	4
4	Abréviations et acronymes	6
5	Méthodes de mesure	6
	5.1 Méthodes de test de référence du diamètre du champ de mode	7
	5.2 Méthode de test pour le diamètre de gaine, l'erreur de concentricité du cœur et la non-circularité de la gaine	14
	5.3 Méthodes de test de la longueur d'onde de coupure	24
	5.4 Méthodes de test de l'affaiblissement.....	33
	5.5 Méthodes de test de la dispersion chromatique.....	45
	5.6 Méthodes de test d'épreuve.....	53
	Annexe A – Ajustement de dispersion chromatique.....	57
	A.1 Généralités.....	57
	A.2 Définition des équations et des coefficients d'ajustement.....	57
	A.3 Procédure d'ajustement.....	58
	Appendice I – Méthodes d'interpolation de la longueur d'onde de coupure.....	58
	I.1 Méthode du nombre limité d'erreurs négatives	58
	I.2 Méthode des moindres carrés	60
	Appendice II – Méthode de mesure de l'uniformité de dispersion chromatique fondée sur la technique de rétrodiffusion	61
	II.1 Généralités.....	61
	II.2 Montage de mesure.....	61
	II.3 Procédure de mesure.....	62
	II.4 Présentation des résultats.....	64
	II.5 Références	65
	Appendice III – Exemple de modèle de matrice.....	65
	BIBLIOGRAPHIE	67

Recommandation UIT-T G.650.1

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

1 Domaine d'application

La présente Recommandation contient les définitions et méthodes de test applicables principalement aux mesures en usine des attributs linéaires déterministes des fibres et câbles optiques monomodes décrits dans les Recommandations UIT-T G.652, G.653, G.654, G.655 et G.656. Ces définitions et méthodes de test ne conviennent généralement pas pour les fibres multimodes, telles qu'elles sont décrites dans la Rec. UIT-T G.651. Certaines de ces méthodes peuvent également servir le cas échéant, à caractériser des composants optiques autonomes tels que ceux décrits dans la Rec. UIT-T G.671. La Rec. UIT-T G.650.2 contient les définitions et méthodes de test applicables aux attributs statistiques et non linéaires.

2 Références

2.1 Références normatives

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

Aucune.

2.2 Références informatives

- [1] Recommandation UIT-T G.652 (2003), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes*.
- [2] Recommandation UIT-T G.653 (2003), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques monomodes à dispersion décalée*.
- [3] Recommandation UIT-T G.654 (2004), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée*.
- [4] Recommandation UIT-T G.655 (2003), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques monomodes à dispersion décalée non nulle*.
- [5] Recommandation UIT-T G.651 (1998), *Caractéristiques d'un câble à fibres optiques multimodes à gradient d'indice (50/125 μm)*.
- [6] Recommandation UIT-T G.671 (2002), *Caractéristiques de transmission des composants et sous-systèmes optiques*.
- [7] CEI 60793-1-42 (2001-07), *Fibres optiques – Partie 1-42: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion chromatique. Annexe C, Déphasage différentiel*.

3 Termes et définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1 Définitions générales

3.1.1 profil d'indice de réfraction: variations de l'indice de réfraction le long d'un diamètre de la fibre.

3.1.2 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.

3.1.3 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.

3.1.4 supprimeur de mode de gaine: dispositif qui facilite la conversion des modes de gaine en modes de rayonnement.

3.1.5 filtre de mode: dispositif conçu de manière à accepter ou éliminer un ou plusieurs modes.

3.2 Caractéristiques mécaniques

3.2.1 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).

3.2.2 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).

3.2.3 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.

3.2.4 paramètre de susceptibilité aux contraintes: coefficient sans dimension n qui lie empiriquement la croissance des criques aux contraintes appliquées. 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.

3.3 Caractéristiques du champ de mode

3.3.1 champ de mode: le champ de mode est la distribution du champ monomode fondamental LP_{01} qui engendre la distribution spatiale de l'intensité dans la fibre.

3.3.2 diamètre de champ de mode (MFD, mode field diameter): le diamètre $2w$ du champ de mode, 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:

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

3.3.3 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 .

$$r_c = \frac{\iint_{Area} r I(r) dA}{\iint_{Area} I(r) dA} \quad (3-2)$$

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.

3.3.4 erreur de concentricité du champ de mode: distance entre le centre du champ de mode et le centre géométrique de la gaine optique.

3.3.5 non-circularité du champ de mode: comme il n'est normalement pas nécessaire de mesurer la non-circularité du champ de mode aux fins de réception, sa définition n'est pas nécessaire dans le présent contexte.

3.4 Caractéristiques géométriques de la fibre

3.4.1 gaine optique: partie externe d'indice de réfraction constant d'une section droite de la fibre.

3.4.2 centre de gaine optique: il s'agit du centre du cercle qui s'adapte le mieux à frontière de la gaine optique.

NOTE – La méthode de meilleure adaptation doit être spécifiée. Une méthode possible est décrite au § I.2/G.651 [5].

3.4.3 diamètre de gaine optique: diamètre du cercle définissant le centre de la gaine.

3.4.4 écart sur le diamètre de gaine optique: différence entre la valeur effective et la valeur nominale du diamètre de la gaine.

3.4.5 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.

3.4.6 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.

3.4.7 centre du cœur: il s'agit du centre du cercle qui s'adapte le mieux aux points de niveau constant dans le diagramme d'intensité de champ proche émis à partir du centre de la fibre, en utilisant des longueurs d'onde supérieures et/ou inférieures à la longueur d'onde de coupure de la fibre.

NOTE 1 – Le niveau constant précédent doit être compris entre 5% et 50% de l'intensité maximale du champ proche.

NOTE 2 – Le centre du cœur représente en général une bonne approximation du centre de champ de mode.

3.4.8 erreur de concentricité du cœur: distance entre le centre du cœur et celui de la gaine.

3.5 Définitions de la dispersion chromatique

3.5.1 dispersion chromatique: étalement 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.

3.5.2 temps de propagation de groupe: temps nécessaire à une impulsion lumineuse pour traverser une unité de longueur de fibre. Le temps de propagation de groupe en fonction de la longueur d'onde est désigné par $\tau(\lambda)$. Il est généralement exprimé en ps/km.

3.5.3 coefficient de dispersion chromatique: modification du temps de propagation de groupe d'une impulsion lumineuse par unité de longueur de fibre causé par une modification de longueur d'onde unitaire. Le coefficient de dispersion chromatique est donc défini selon la formule suivante: $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$. Il est généralement exprimé en ps/nm × km.

3.5.4 pente de dispersion chromatique: pente de la courbe du coefficient de dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde. La pente de dispersion est définie selon la formule suivante: $S(\lambda) = dD/d\lambda$.

3.5.5 longueur d'onde de dispersion nulle: longueur d'onde à laquelle disparaît la dispersion chromatique.

3.5.6 pente de dispersion nulle: pente de dispersion chromatique à la longueur d'onde pour laquelle la dispersion est nulle.

3.6 Autres caractéristiques

3.6.1 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 droit.

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 mm de rayon (x est fixée à 76 mm par un certain nombre d'Administrations) 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 :

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

Dans ces conditions, chaque section de câble individuelle est suffisamment monomode. Toute épissure imparfaite créera une certaine puissance dans un mode d'ordre élevé (PL_{11}) 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 LP_{11} avant l'épissure suivante. Si l'inégalité (3-3) 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_{c1} ou λ_c . Cette possibilité est traitée dans les Recommandations UIT-T G.652 [1], G.653 [2], G.654 [3] et G.655 [4].

3.6.2 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:

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (dB)} \quad (3-4)$$

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:

$$a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \text{ (dB/longueur unitaire)} \quad (3-5)$$

4 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

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

5 Méthodes de mesure

On spécifie en général la méthode de test de référence (RTM, *reference test method*) ainsi que les autres méthodes possibles (ATM) pour chaque paramètre, les deux types de méthodes étant censés être applicables aux opérations normales de recette de produits. Toutefois, si avec une autre

méthode, on constate la moindre incohérence, il est recommandé d'employer la méthode de référence pour obtenir les résultats de mesure définitifs.

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

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

5.1.1 Méthode de référence: exploration du champ lointain

5.1.1.1 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 § 3.3.2. 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 § 5.1.1.2.6.

5.1.1.2 Montage de mesure

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

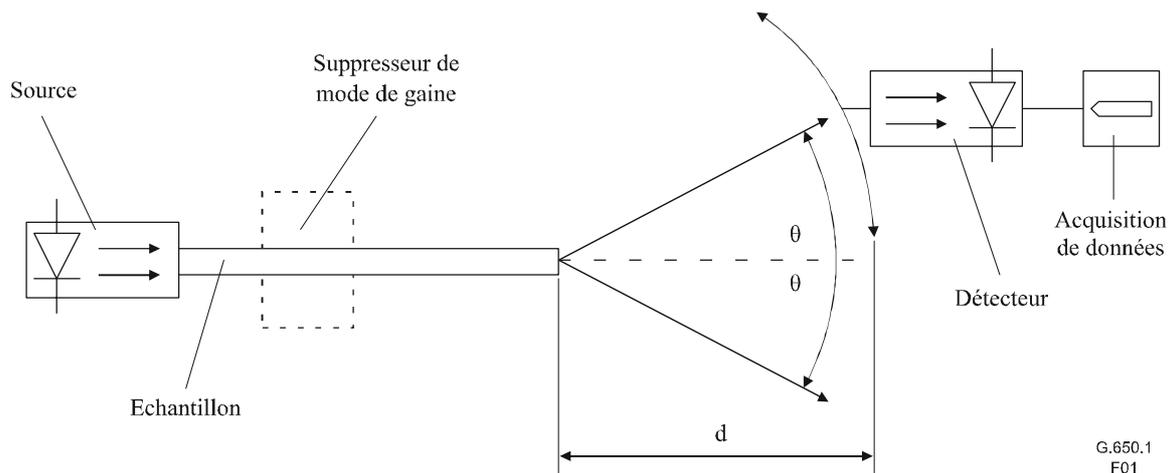


Figure 1/G.650.1 – Montage type d'exploration du champ lointain

5.1.1.2.1 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 maximale totale à mi-hauteur (FWHM, *full width at half maximum*) ne sera pas supérieure à 10 nm.

5.1.1.2.2 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.

5.1.1.2.3 Conditions d'injection

Les conditions d'injection appliquées doivent être suffisantes pour exciter le mode fondamental (LP₀₁). On peut citer par exemple:

- a) l'injection par raccordement avec une fibre;
- b) 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.

5.1.1.2.4 Suppresseur de mode de gaine

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

5.1.1.2.5 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 supprimeur de mode, si on utilise un tel supprimeur. 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.

5.1.1.2.6 Appareillage d'exploration

On utilisera un mécanisme pour explorer la distribution d'intensité du champ lointain (par exemple, un photodétecteur à balayage à micro-ouverture ou un photodétecteur à balayage avec fibre amorcée). 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 UIT-T G.652 [1] et G.653 [2] 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° 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.

5.1.1.2.7 Détecteur

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

5.1.1.2.8 Amplificateur

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

5.1.1.2.9 Acquisition des données

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

5.1.1.3 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 3-1.

5.1.1.4 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.

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

5.1.2.1 Généralités

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

$$2w = (\lambda / \pi D) \left[\int_0^\infty a(x) \frac{x}{(x^2 + D^2)^2} dx \right]^{-1/2} \quad (5-1)$$

L'équivalence mathématique des équations 3-1 et 5-1 est valable dans l'approximation de petits angles θ . Dans le cas de cette approximation, l'équation 5-1 peut être obtenue à partir de l'équation 3-1 par intégration.

5.1.2.2 Montage de mesure

5.1.2.2.1 Source lumineuse (comme au § 5.1.1.2.1)

5.1.2.2.2 Modulation (comme au § 5.1.1.2.2)

5.1.2.2.3 Conditions d'injection (comme au § 5.1.1.2.3)

5.1.2.2.4 Supprimeur de mode de gaine (comme au § 5.1.1.2.4)

5.1.2.2.5 Echantillon (comme au § 5.1.1.2.5)

5.1.2.2.6 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 couvertes par la Rec. UIT-T G.653 [2]). 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.

5.1.2.2.7 Détecteur (comme au § 5.1.1.2.7)

5.1.2.2.8 Amplificateur (comme au § 5.1.1.2.8)

5.1.2.2.9 Acquisition des données (comme au § 5.1.1.2.9)

5.1.2.3 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:

$$a(x) = 1 - \frac{P(x)}{P_{\max}} \quad (5-2)$$

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 5-1.

5.1.2.4 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 suppresseur de mode de gaine;
- f) le type et les dimensions du détecteur;
- g) la température de l'échantillon et les conditions ambiantes (lorsque cela est nécessaire);
- h) l'indication de la précision et de la reproductibilité des mesures;
- i) le diamètre du champ de mode.

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

5.1.3.1 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):

$$2w = 2 \left[\frac{\int_0^{\infty} r f^2(r) dr}{\int_0^{\infty} r \left[\frac{df(r)}{dr} \right]^2 dr} \right]^{1/2} \quad (5-3)$$

L'équivalence mathématique des équations 3-1 et 5-3 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 3-1 à l'équation 5-3 et inversement.

5.1.3.2 Montage de mesure

5.1.3.2.1 Source lumineuse (comme au § 5.1.1.2.1)

5.1.3.2.2 Modulation (comme au § 5.1.1.2.2)

5.1.3.2.3 Conditions d'injection (comme au § 5.1.1.2.3)

5.1.3.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme au § 5.1.1.2.4)

5.1.3.2.5 Echantillon (comme au § 5.1.1.2.5)

5.1.3.2.6 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 à micro-ouverture ou un photodétecteur à balayage à fibre amorcée). 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.

5.1.3.2.7 Détecteur (comme au § 5.1.1.2.7)

5.1.3.2.8 Amplificateur (comme au § 5.1.1.2.8)

5.1.3.2.9 Acquisition des données (comme au § 5.1.1.2.9)

5.1.3.3 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 5-3. 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 3-1.

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.

5.1.3.4 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 maximale spectrale à mi-hauteur de la raie spectrale de la source.
- d) L'identification de la fibre et sa longueur.
- e) Le type de suppresseur de mode de gaine.
- f) Le 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.

5.1.4 Autre méthode possible de test (n° 3): différence de rétrodiffusion bidirectionnelle

5.1.4.1 Généralités

Le diamètre de champ de mode est déterminé à partir de la différence de rétrodiffusion bidirectionnelle à travers une épissure avec une fibre de zone morte dont on connaît le diamètre de champ de mode:

$$w_s = w_d 10^{\frac{g(L_d - L_s) + f}{20}} \quad (5-4)$$

où:

w_d est le diamètre de champ de mode de la fibre de zone morte

w_s est le diamètre de champ de mode de la fibre échantillon

L_d est la variation de rétrodiffusion (dB) à travers l'épissure lorsque l'on mesure de la fibre de zone morte

L_s est la variation de rétrodiffusion (dB) à travers l'épissure lorsque l'on mesure de la fibre

g est un coefficient correcteur dépendant de la longueur d'onde et du type de fibre

f est un coefficient correcteur dépendant de la longueur d'onde et du type de fibre

5.1.4.2 Montage de mesure

Idem que dans le § 5.4.2.2 avec les prescriptions supplémentaires suivantes:

la Figure 2 montre un schéma de principe d'un montage, optionnel, utilisant une commutation optique.

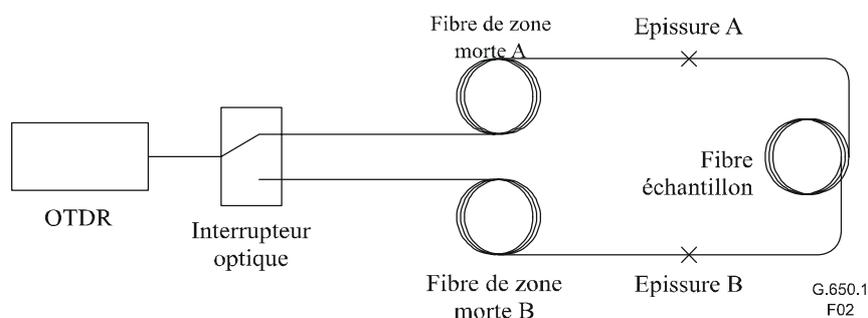


Figure 2/G.650.1 – Montage optionnel pour la rétrodiffusion bidirectionnelle

La longueur d'onde de la source pour la réflectométrie optique temporelle doit être connue à 2 nm près. Un décalage de 2 nm introduit une erreur de 0,02 μm dans les mesures effectuées entre 1310 nm et 1550 nm.

Une fibre de zone morte doit être suffisamment longue pour empêcher que la zone morte ne contienne l'épissure ou le joint d'about avec la fibre échantillon. Le diamètre MFD de la fibre de zone morte doit être mesuré à chaque longueur d'onde dont la mesure est nécessaire par la méthode RTM ou par les première ou deuxième méthodes alternatives. La fibre de zone morte est généralement du même type que la fibre soumise au test.

L'épissure ou le joint d'about doit être suffisamment stable sur la période de la mesure de manière à ne pas affecter les résultats. Un fluide de correspondance d'index est recommandé lorsque l'on utilise un joint d'about afin de réduire à un minimum les réflexions.

5.1.4.3 Procédure de mesure

Cette procédure comprend deux parties: la première concerne une fibre et une longueur d'onde données lorsque les coefficients correcteurs g et f sont connus. La seconde est une procédure pour la qualification d'un type et d'une conception donnés de fibre à une longueur d'onde connue. La procédure de qualification comprend le calcul précis des coefficients correcteurs, g et f , qui permettent la correction de la longueur d'onde OTDR par rapport à la valeur nominale. Lorsque g et f sont inconnus et qu'une détermination juste est impossible, leur valeur nominale peut être admise respectivement égale à 1 et à 0.

5.1.4.3.1 Mesure d'une fibre à une longueur d'onde connue

- a) Aligner la fibre de manière à ce que la lumière soit injectée de la fibre de zone morte A dans la fibre échantillon (à partir d'une réflectométrie OTDR à travers l'épissure A dans la fibre échantillon comme le montre la Figure 2).
- b) Mesurer la modification de rétrodiffusion à travers l'épissure (épissure A dans la Figure 2), en évitant toute réflexion, et enregistrer la valeur comme L_d .
- c) Aligner la fibre de manière à ce que la lumière soit injectée de la fibre de zone morte A dans la fibre échantillon (à partir d'une réflectométrie OTDR à travers l'épissure B dans la fibre échantillon, puis à travers l'épissure A comme le montre la Figure 2).
- d) Mesurer la modification de rétrodiffusion à travers l'épissure (épissure A dans la Figure 2), en évitant toute réflexion, et enregistrer la valeur comme L_s .
- e) Calculer le diamètre de champ de mode conformément à l'équation 5-4.

5.1.4.3.2 Qualification d'un type, d'une conception de fibre et de la longueur d'onde

- a) Sélectionner un échantillon parmi les fibres du type et de la conception à mesurer, dont on a mesuré le diamètre de champ de mode, w_s , à la longueur d'onde souhaitée, à l'aide de la méthode de test de référence ou de la première ou deuxième méthode alternative, de manière à ce que la plage des valeurs de diamètres de champ de mode pour le type et la conception des fibres soit représentée dans cet échantillon.
- b) Appliquer les points a) à d) de la procédure du § 5.1.4.3.1 afin de déterminer les modifications de rétrodiffusion à travers l'épissure L_d et L_s .
- c) Calculer $20 \log_{10} \left(\frac{w_s}{w_d} \right)$ pour chaque fibre et exécuter une régression linéaire en fonction de $(L_d - L_s)$ pour déterminer g (la pente) et f (l'ordonnée à l'origine).
- d) Sélectionner un deuxième échantillon de fibres, indépendant du premier ensemble qui a servi à déterminer g et f , dont le diamètre de champ de mode a également été mesuré à la longueur d'onde souhaitée à l'aide de la méthode de test de référence ou de la première ou deuxième méthode alternative.
- e) Appliquer la procédure décrite au § 5.1.4.3.1, en utilisant les valeurs de g et de f déterminées au point c) afin de déterminer le diamètre de champ de mode, w_s . Trouver la différence avec la valeur mesurée à l'aide de la méthode de test de référence ou de la première ou deuxième méthode alternative.
- f) Calculer la différence moyenne (biais) et l'écart-type des différences (σ_d) pour déterminer s'il y a équivalence.

- g) Une mesure acceptable de l'équivalence peut être obtenue en calculant le niveau d'équivalence, B, où $B = |\text{biais}| + 2 \sigma_d / \text{racine}(n)$, n étant la taille de l'échantillon. Une limite supérieure type de B est 0,1 μm .
- h) Si B dépasse cette limite supérieure, il est recommandé d'apporter des correctifs à la procédure comme par exemple une amélioration des épissures ou des joints d'about.

5.1.4.4 Présentation des résultats

Pour chaque fibre mesurée:

- a) la longueur d'onde nominale;
- b) la valeur du diamètre de champ de mode;
- c) l'identification de la fibre.

Informations nécessaires:

- d) description de l'appareil;
- e) données de qualification pour chaque type, conception de fibre et la longueur d'onde;
- f) indications de la précision et de la reproductibilité.

5.2 Méthode de test pour le diamètre de gaine, l'erreur de concentricité du cœur et la non-circularité de la gaine

5.2.1 Méthode de test de référence: technique de l'image de champ proche

5.2.1.1 Généralités

Les paramètres géométriques du verre sont déterminés à partir de la distribution de l'intensité de champ proche conformément aux définitions fournies aux § 3.4.3, 3.4.6 et 3.4.8.

5.2.1.2 Montage de mesure

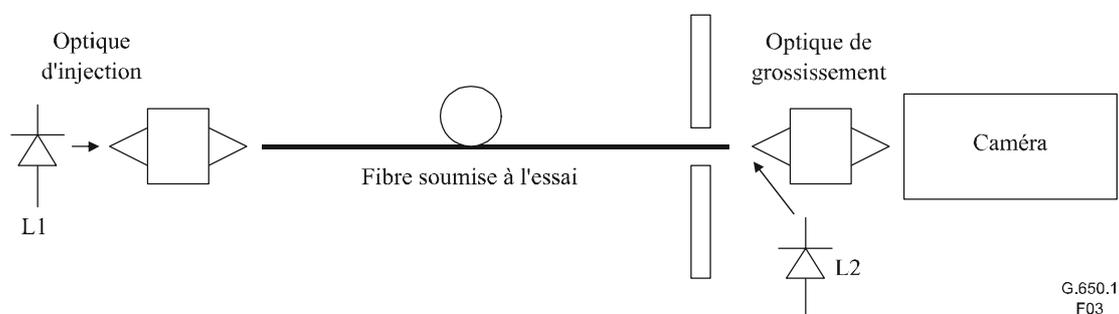


Figure 3/G.650.1 – Schéma d'un montage de mesure

5.2.1.2.1 Source lumineuse

La source lumineuse L1 utilisée pour éclairer le cœur doit avoir une intensité réglable et une assise stable pendant une durée assez longue pour que l'on puisse mener à bien la mesure. On peut utiliser des longueurs d'onde supérieures et/ou inférieures à la longueur d'onde de coupure de la fibre. Il faut utiliser une deuxième source lumineuse, L2, ayant des caractéristiques similaires pour éclairer la gaine.

5.2.1.2.2 Conditions d'injection

L'optique d'injection doit être disposée de manière à ce que la source lumineuse recouvre uniformément la fibre, angulairement et spatialement. La gaine doit être éclairée uniformément à l'extrémité de sortie.

NOTE – Les conditions d'injection à partir de la source L1 doivent définir une distribution circulaire symétrique de champ spatial à la sortie de la fibre.

5.2.1.2.3 Suppresseur de mode de gaine

La lumière du mode de gaine doit être supprimé de l'échantillon à proximité de l'extrémité d'entrée. Lorsque la fibre soumise à l'essai présente un revêtement primaire ayant un indice de réfraction supérieur à celui du verre, le revêtement agit comme supprimeur de mode de gaine.

5.2.1.2.4 Echantillon

L'échantillon consistera en une courte longueur de la fibre à mesurer. Les extrémités des fibres doivent être propres, lisses et perpendiculaires à leurs axes.

5.2.1.2.5 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.

5.2.1.2.6 Détecteur

Il faut utiliser des caméras vidéo CCD, des vidicons d'exploration ou autres dispositifs de reconnaissance de diagramme/d'intensité afin de détecter l'image grossie du champ proche de sortie et la transmettre à un écran vidéo. Le numériseur vidéo numérise l'image pour une analyse ultérieure par ordinateur. Le système vidéo doit être suffisamment linéaire de manière à ce que l'incertitude de mesure ne soit pas plus grande qu'il ne faut après l'étalonnage.

5.2.1.2.7 Ecran vidéo

Il faut utiliser un écran vidéo pour afficher l'image détectée. L'écran affiche un diagramme, par exemple un réticule, afin d'aider l'opérateur à centrer l'image de l'échantillon. On peut utiliser un alignement ou une mise au point assistée par ordinateur.

5.2.1.2.8 Système de données

La mesure, l'acquisition de données et les calculs sont réalisés à l'aide d'un ordinateur. Une imprimante fournit la copie papier des informations et des résultats des mesures.

5.2.1.3 Procédure de mesure

5.2.1.3.1 Etalonnage

L'étalonnage doit être réalisé conformément aux procédures fournies dans la CEI 60745.

5.2.1.3.2 Mesure

L'échantillon préparé doit être aligné à l'extrémité d'entrée afin d'obtenir la condition d'injection spécifiée. Il faut focaliser et centrer sur l'écran l'image de champ proche de l'extrémité de sortie. Il faut régler l'intensité de l'éclairage de l'image du cœur à l'extrémité d'entrée et celle de l'image de la gaine à l'extrémité de sortie par rapport à un étalon interne déterminé pour l'équipement de mesure particulier.

L'image vidéo numérisée de la face de sortie doit être enregistrée et il faut déterminer et enregistrer dans des tables de contours les points représentant le contour de l'image de la gaine et celui de l'image du cœur. Les niveaux décisionnels pour les frontières de l'image de champ proche sont les suivants:

frontière de l'image du cœur: ce niveau doit être compris entre 5% et 50% de l'intensité maximale de champ proche;

frontière de l'image de la gaine: en fonction de la méthode d'éclairage, on peut utiliser différentes méthodes pour la déterminer. La méthode utilisée dans la pratique doit être la même que celle utilisée pour l'étalonnage.

5.2.1.3.3 Calculs

Les données brutes pour les contours du cœur et de la gaine sont ajustées à de lisses formes mathématiques fermées afin de déterminer les meilleures estimations des contours réels. Ces formes sont ensuite ajustées à un cercle afin de déterminer les caractéristiques géométriques, y compris les écarts du premier ordre par rapport à une forme circulaire idéale de chacune frontière de contour respectif. Ces valeurs et la représentation mathématique du contour servent à déterminer les paramètres suivants:

- X_{co} , Y_{co} (μm) centre ajusté du cœur;
- R_{cl} (μm) rayon ajusté de la gaine;
- X_{cl} , Y_{cl} (μm) centre ajusté de la gaine;
- R_{mincl} (μm) distance minimale du contour de la gaine au centre;
- R_{maxcl} (μm) distance maximale du contour de la gaine au centre;
- Diamètre de gaine (μm) = $2R_{cl}$;
- Non-circularité de la gaine (%) = $100(R_{maxcl} - R_{mincl})/R_{cl}$;
- Erreur de concentricité du cœur (μm) = $[(X_{cl} - X_{co})^2 + (Y_{cl} - Y_{co})^2]^{1/2}$.

Les formes mathématiques fermées et lisses qui sont utilisées pour représenter les contours doivent permettre une variation de courbure supérieure ou égale à celle que l'on trouve dans une ellipse. Pour les formes non elliptiques, les données peuvent être converties en coordonnées polaires par rapport à un centre grossièrement estimé avant de régler le rayon en fonction de la position angulaire.

Il est permis de pratiquer une filtration active ou d'éliminer des points de données brutes ajustés à la forme mathématique ceux qui représentent un dommage dû à la coupure. Le choix de la courbe, l'équipement, la méthode de coupure et l'algorithme de filtration sont interactives quant à leur contribution à la qualité des résultats de mesure de la gaine.

5.2.1.4 Présentation des résultats

Pour chaque mesure:

- a) l'identification de la fibre;
- b) les paramètres: diamètre de gaine, non-circularité de gaine et erreur de concentricité de cœur.

Informations nécessaires:

- a) montage de mesure;
- b) conditions d'injection;
- c) caractéristiques spectrales;
- d) facteur de grossissement;

- e) type et dimensions des détecteurs;
- f) indication de la précision et de la reproductibilité, y compris les données d'étalonnage.

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

5.2.2.1 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.

5.2.2.2 Montage de mesure

Un diagramme schématique de la méthode de mesure est représenté à la Figure 4. 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.

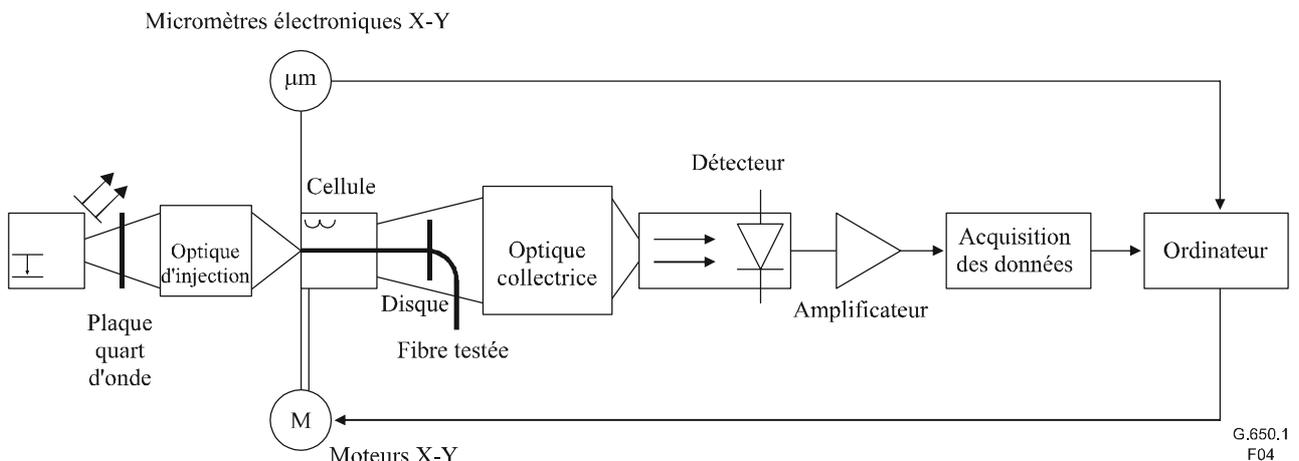


Figure 4/G.650.1 – Configuration type du montage de mesure du champ proche réfracté

5.2.2.2.1 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.

5.2.2.2.2 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 $1,0 \mu\text{m}$. L'équipement permet d'explorer par balayage le point lumineux sur tout le diamètre de la fibre.

5.2.2.2.3 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.

5.2.2.2.4 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.

5.2.2.2.5 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.

5.2.2.3 Procédure

Il faut se reporter au schéma du montage de mesure (Figure 4).

5.2.2.3.1 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.

5.2.2.3.2 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.

5.2.2.3.3 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.

5.2.2.3.4 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 3. Une mesure de profil d'indice fournit effectivement l'erreur de concentricité du cœur.

5.2.2.4 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 cœur.
- 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).

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

5.2.3.1 Généralités

La méthode de la visée latérale est appliquée aux fibres monomodes afin de déterminer les paramètres géométriques (l'erreur de concentricité du cœur, 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.

5.2.3.2 Montage de mesure

Un schéma du montage de mesure est représenté à la Figure 5.

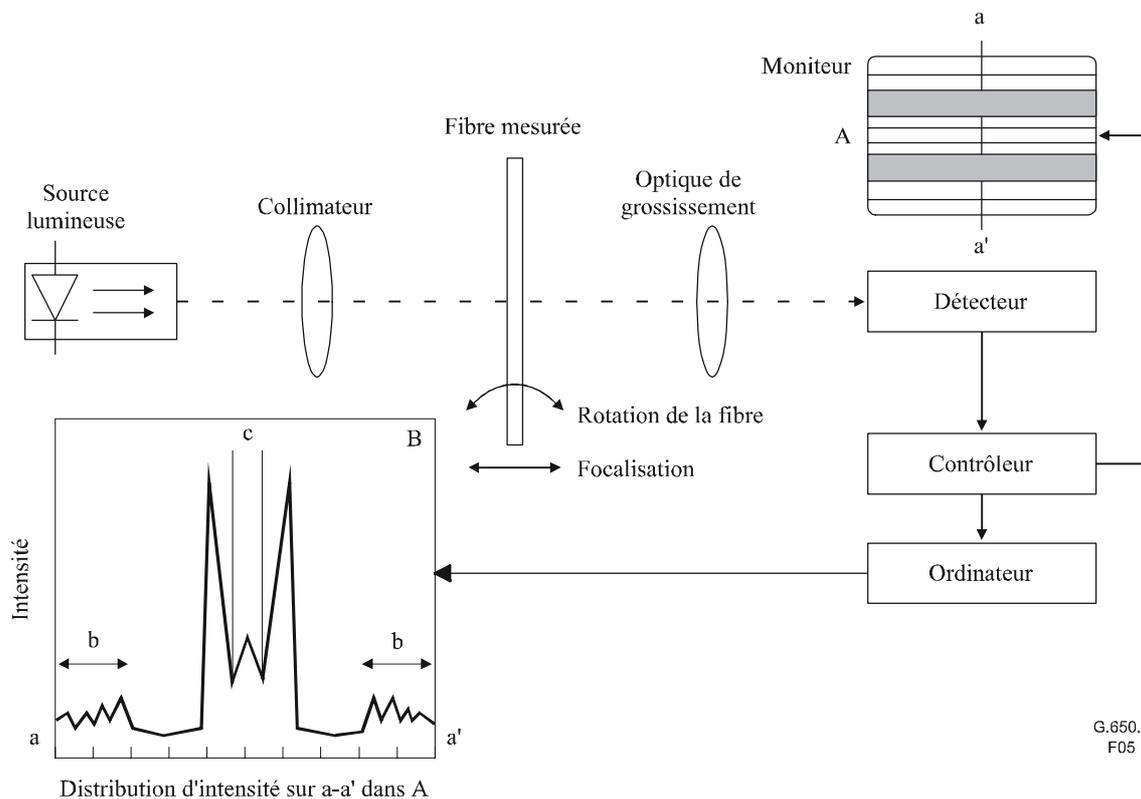


Figure 5/G.650.1 – Schéma du montage de mesure en visée latérale

5.2.3.2.1 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.

5.2.3.2.2 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.

5.2.3.2.3 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.

5.2.3.2.4 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.

5.2.3.2.5 Traitement des données

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

5.2.3.3 Procédure de mesure

5.2.3.3.1 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.

5.2.3.3.2 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 5) 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 cœur.

Comme le montre la Figure 6, en ajustant la courbe de la fonction sinusoïdale aux valeurs de l'erreur de concentricité du champ de mode (voir Note 2 au § 3.4.7) obtenues expérimentalement en fonction de l'angle de rotation, on peut calculer l'erreur de concentricité du cœur 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.

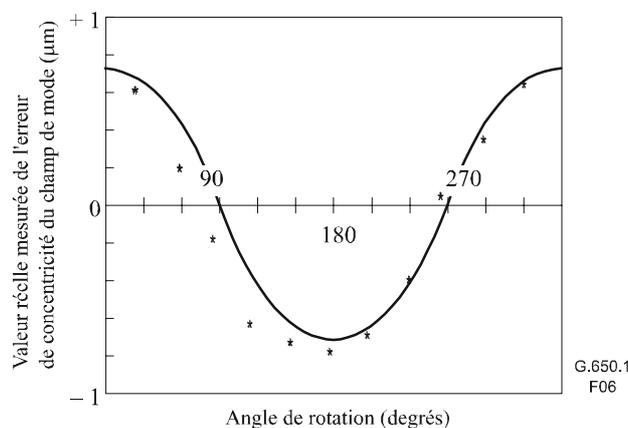


Figure 6/G.650.1 – Valeur mesurée de l'erreur de concentricité du champ de mode en fonction de l'angle de rotation

5.2.3.4 Présentation des résultats

- Montage de mesure.
- Identification de la fibre.
- Caractéristiques spectrales de la source.
- Indication de la précision et de la reproductibilité des mesures.
- Courbe de l'erreur de concentricité du cœur en fonction de l'angle de rotation.

- f) Erreur de concentricité du cœur, diamètre de la gaine optique et non-circularité de la gaine optique.
- g) Température de l'échantillon et conditions ambiantes (si nécessaire).

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

5.2.4.1 Généralités

Les caractéristiques géométriques sont déterminées à partir de la distribution d'intensité du champ proche, selon les définitions données aux § 3.4.3, 3.4.6 et 3.4.8.

Etant donné que la concentricité de champ de mode est une bonne approximation de la concentricité du cœur, cette méthode peut être utilisée pour évaluer l'erreur de concentricité de cœur.

5.2.4.2 Montage de mesure

Un schéma du montage de mesure est représenté à la Figure 7.

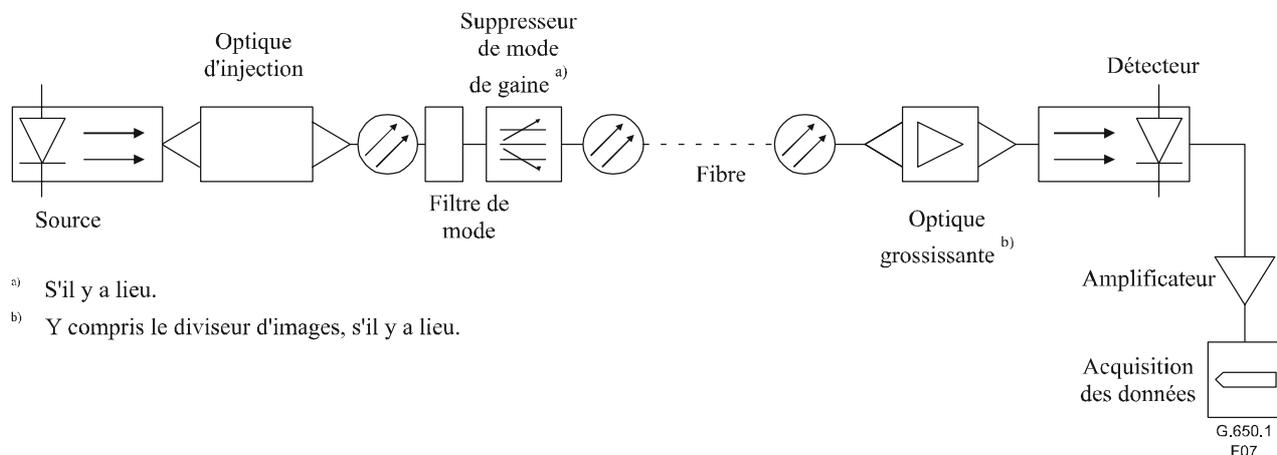


Figure 7/G.650.1 – Montage type de mesure du champ proche émis

5.2.4.2.1 Source lumineuse

Pour éclairer le cœur, on utilisera une source lumineuse dont la longueur d'onde normalisera de 1310 nm (pour les fibres couvertes par la Rec. UIT-T G.652 [1]) ou 1550 nm, d'intensité réglable (pour les fibres couvertes par les Recommandations UIT-T 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.

5.2.4.2.2 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.

5.2.4.2.3 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} .

5.2.4.2.4 Suppresseur de mode de gaine

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

5.2.4.2.5 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.

5.2.4.2.6 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.

5.2.4.2.7 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 à micro-ouverture;
- b) miroir d'exploration à micro-ouverture 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.

5.2.4.2.8 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.

5.2.4.2.9 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.

5.2.4.3 Procédure de mesure

5.2.4.3.1 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.

5.2.4.3.2 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.

5.2.4.4 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.

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

5.3.1 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

5.3.1.1 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;
- 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.

5.3.1.2 Montage de mesure

5.3.1.2.1 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.

5.3.1.2.2 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.

5.3.1.2.3 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;
- b) l'injection avec un système optique approprié, à gros point lumineux et grande ouverture numérique.

5.3.1.2.4 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} .

5.3.1.2.5 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.

5.3.1.3 Procédure de mesure

5.3.1.3.1 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.

5.3.1.3.2 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.

5.3.1.3.3 Calculs

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

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_c(\lambda)} \quad (5-5)$$

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

En supposant 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:

$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - (A_u + B_u \lambda) \quad (5-6)$$

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 8a et 9a.

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-dessous 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 LP₁₁ et la puissance en mode fondamental. Quand les modes sont uniformément excités conformément au § 5.3.1.2.3, l'affaiblissement $a(\lambda)$ permet de déterminer également l'affaiblissement $A(\lambda)$, en dB en mode LP₁₁ dans l'échantillon:

$$A(\lambda) = 10 \log \left[\left(\frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - 1 \right) / 2 \right] \quad (5-7)$$

5.3.1.3.4 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 8b et 9b montrent les "bosses" qui apparaissent parfois près de la longueur d'onde de coupure. Si ces bosses sont absentes (voir les Figures 8a et 9a), 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.

$$\gamma(\lambda) = 10 \log \left[-\frac{10}{A} \log \left(\frac{10^{\Delta a(\lambda)/10} - 1}{\rho} \right) \right] \quad (5-8)$$

$$A = 10 \log \left[\rho / (10^{0,01} - 1) \right] \quad (5-9)$$

Sauf indication contraire, $\rho = 2$.

$$(5-10)$$

Quand les coefficients de:

$$A_t + B_t \lambda = -Y(\lambda) \quad (5-11)$$

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

$$\lambda_c = -\frac{A_t}{B_t} \quad (5-12)$$

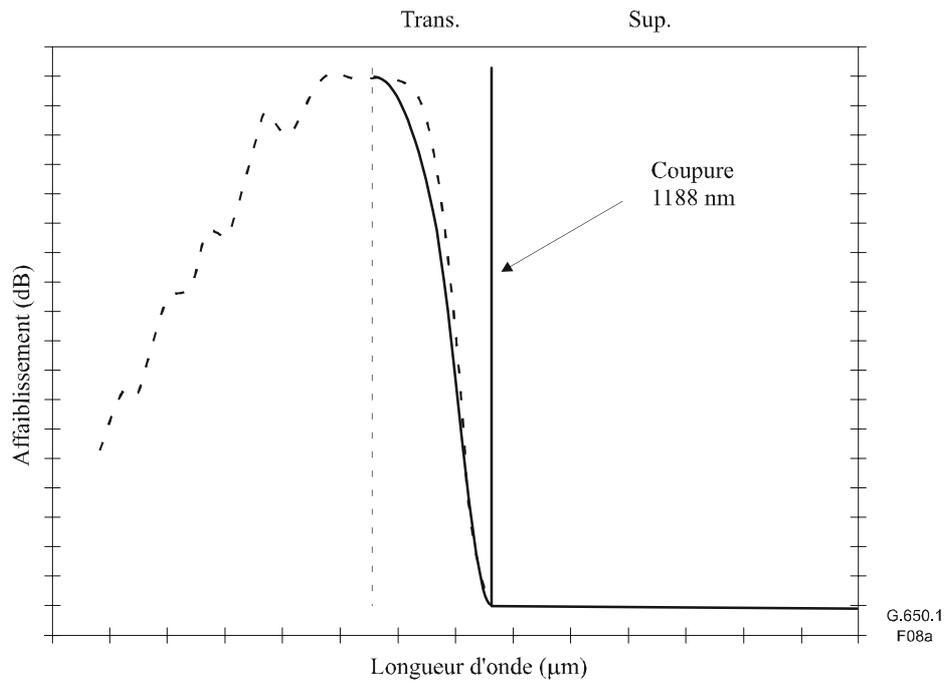


Figure 8a/G.650.1 – Fréquence de coupure de référence monomode

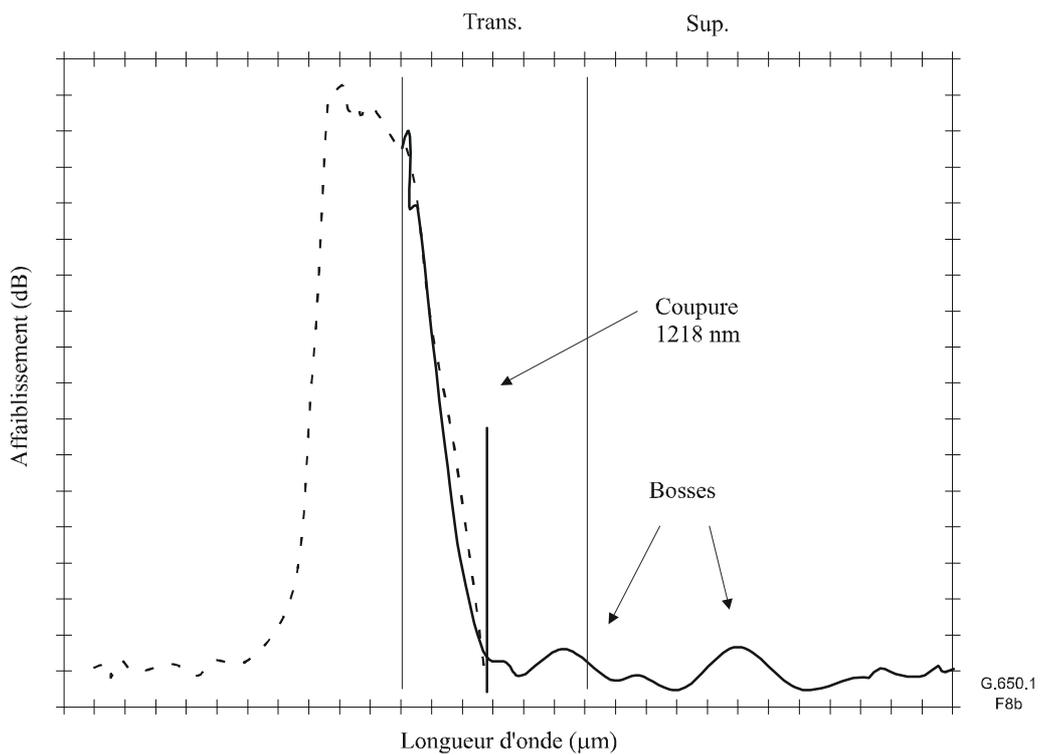


Figure 8b/G.650.1 – Fréquence de coupure de référence monomode avec bosses

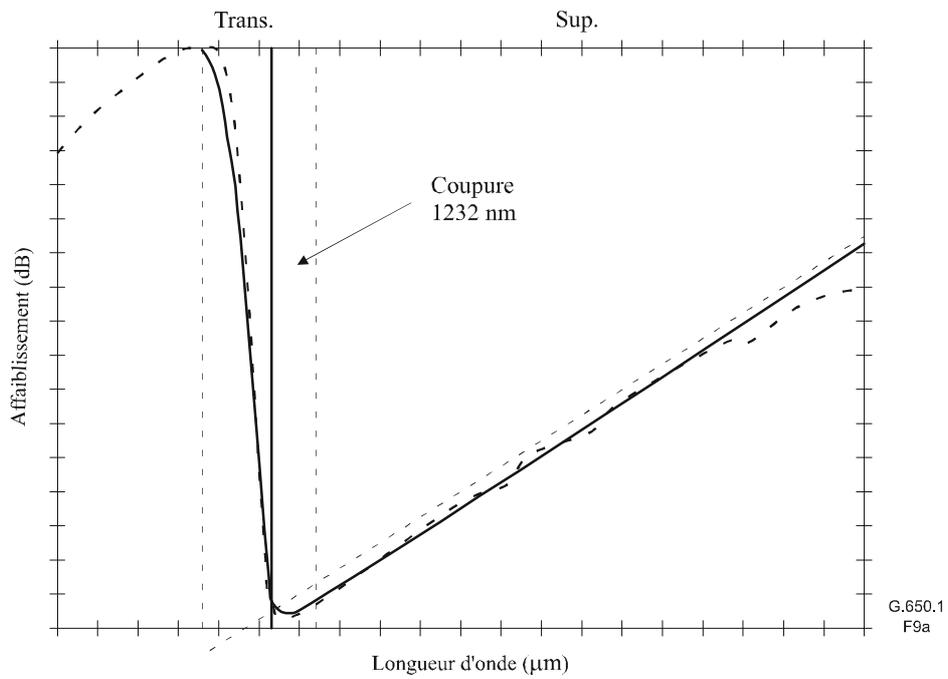


Figure 9a/G.650.1 – Fréquence de coupure de référence multimode

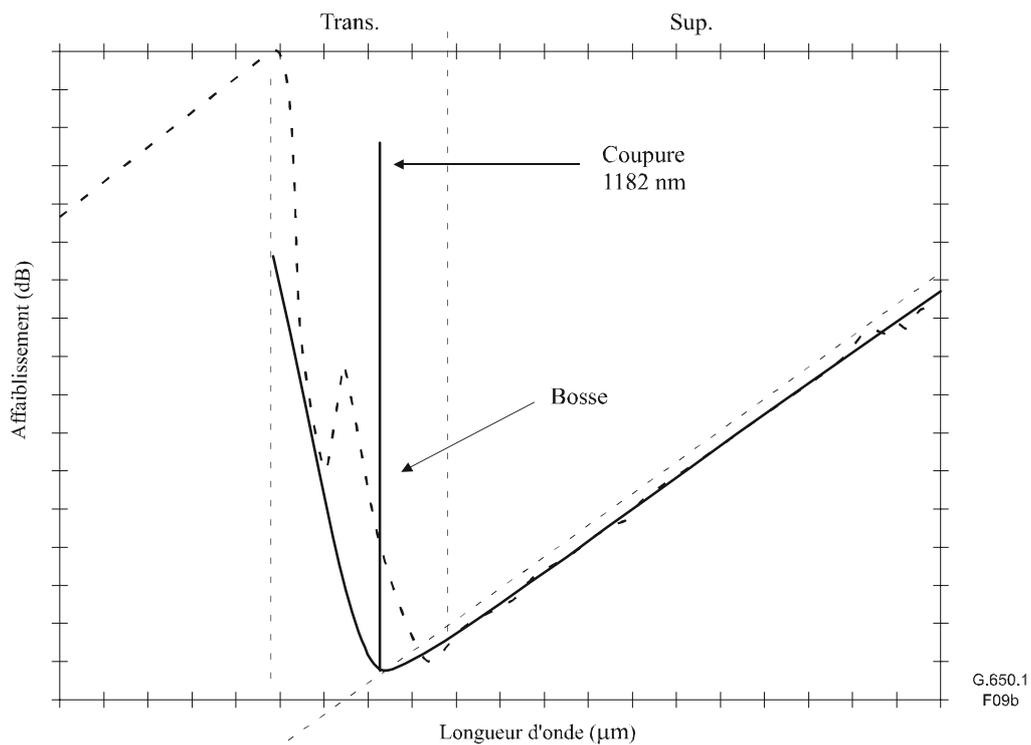


Figure 9b/G.650.1 – Fréquence de coupure de référence multimode avec bosse

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.

5.3.1.4 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.

5.3.1.5 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).

5.3.2 Autre méthode de test possible: technique du mandrin λ_c

5.3.2.1 Généralités (comme au § 5.3.1.1)

5.3.2.2 Montage de mesure

5.3.2.2.1 Source lumineuse (comme au § 5.3.1.2.1)

5.3.2.2.2 Modulation (comme au § 5.3.1.2.2)

5.3.2.2.3 Conditions d'injection (comme au § 5.3.1.2.3)

5.3.2.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme au § 5.3.1.2.4)

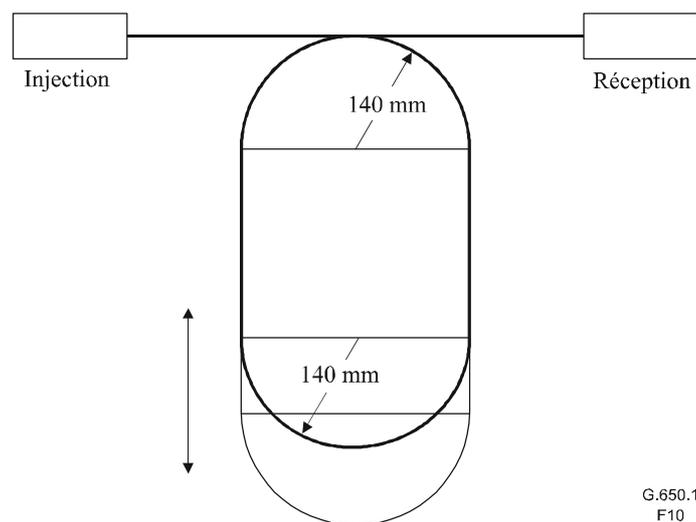
5.3.2.2.5 Détecteur optique (comme au § 5.3.1.2.5)

5.3.2.3 Procédure de mesure

5.3.2.3.1 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 (180 degrés chacun), 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 $P_1(\lambda)$ 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 attendue.

Comme indiqué dans la Figure 10, 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.



G.650.1
F10

Figure 10/G.650.1 – Mise en place de la fibre: détermination de la longueur d'onde de coupure par la technique du mandrin

5.3.2.3.2 Transmission à travers l'échantillon de référence (comme au § 5.3.1.3.2)

5.3.2.3.3 Calculs (comme au § 5.3.1.3.3)

5.3.2.3.4 Détermination de la longueur d'onde de coupure (comme au § 5.3.1.3.4)

5.3.2.4 Présentation des résultats (comme au § 5.3.1.5)

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

5.3.3.1 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;
- b) on prend un court segment (1 à 2 m) d'une fibre multimode.

5.3.3.2 Montage de mesure

5.3.3.2.1 Source lumineuse (comme au § 5.3.1.2.1)

5.3.3.2.2 Modulation (comme au § 5.3.1.2.2)

5.3.3.2.3 Conditions d'injection (comme au § 5.3.1.2.3)

5.3.3.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme au § 5.3.1.2.4)

5.3.3.2.5 Détecteur optique (comme au § 5.3.1.2.5)

5.3.3.3 Procédure de mesure

5.3.3.3.1 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 $X = 40$ mm de rayon sera formée à chaque extrémité de la fibre décordée (voir Figure 11). 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.

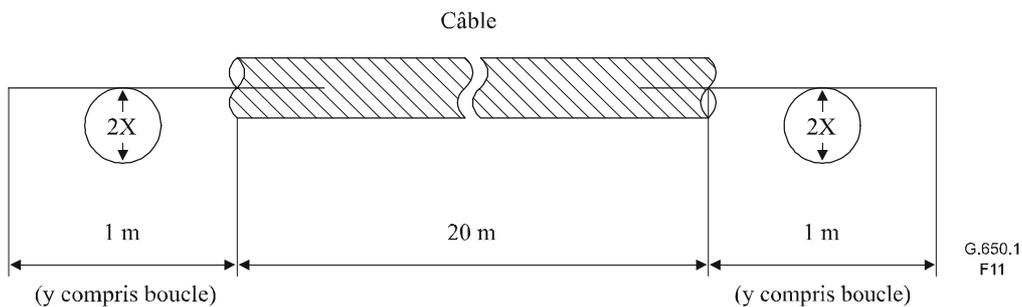


Figure 11/G.650.1 – Condition de déploiement utilisée pour la mesure de la longueur d'onde de coupure de la fibre câblée

5.3.3.3.2 Transmission à travers l'échantillon de référence (comme au § 5.3.1.3.2)

5.3.3.3.3 Calculs

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

$$R(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (5-13)$$

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

5.3.3.3.4 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 § 5.3.1.3.3 et 5.3.1.3.4.

5.3.3.4 Présentation des résultats

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

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

5.3.4.1 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;
- b) on prend un court segment (1 à 2 m) d'une fibre multimode.

5.3.4.2 Montage de mesure

5.3.4.2.1 Source lumineuse (comme au § 5.3.1.2.1)

5.3.4.2.2 Modulation (comme au § 5.3.1.2.2)

5.3.4.2.3 Conditions d'injection (comme au § 5.3.1.2.3)

5.3.4.2.4 Suppresseur de mode de gaine (comme au § 5.3.1.2.4)

5.3.4.2.5 Détecteur optique (comme au § 5.3.1.2.5)

5.3.4.3 Procédure de mesure

5.3.4.3.1 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 $X = 40$ mm de rayon est formée à chaque extrémité de la fibre (voir Figure 12). 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.

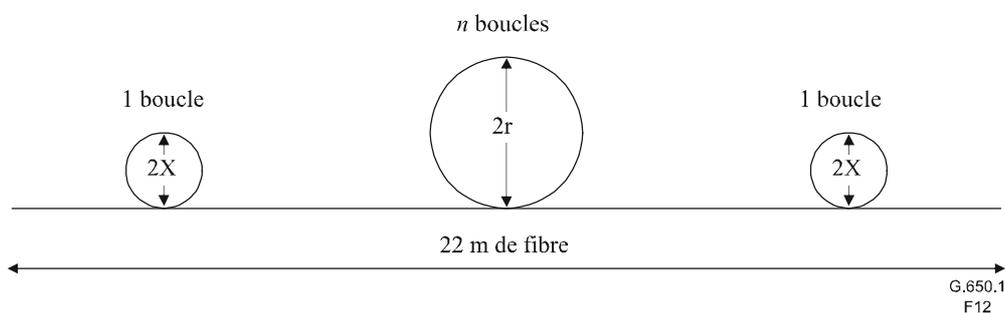


Figure 12/G.650.1 – Conditions de déploiement pour mesurer la longueur λ_{cc} d'onde de coupure d'une fibre non câblée

5.3.4.3.2 Transmission à travers l'échantillon de référence (comme au § 5.3.1.3.2)

5.3.4.3.3 Calculs (comme au § 5.3.1.3.3)

5.3.4.3.4 Détermination de la longueur d'onde de coupure de la fibre câblée
(comme au § 5.3.3.3.4)

5.3.4.4 Présentation des résultats

Comme au § 5.3.3.4, avec en plus:

- valeur de r .

5.4 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).

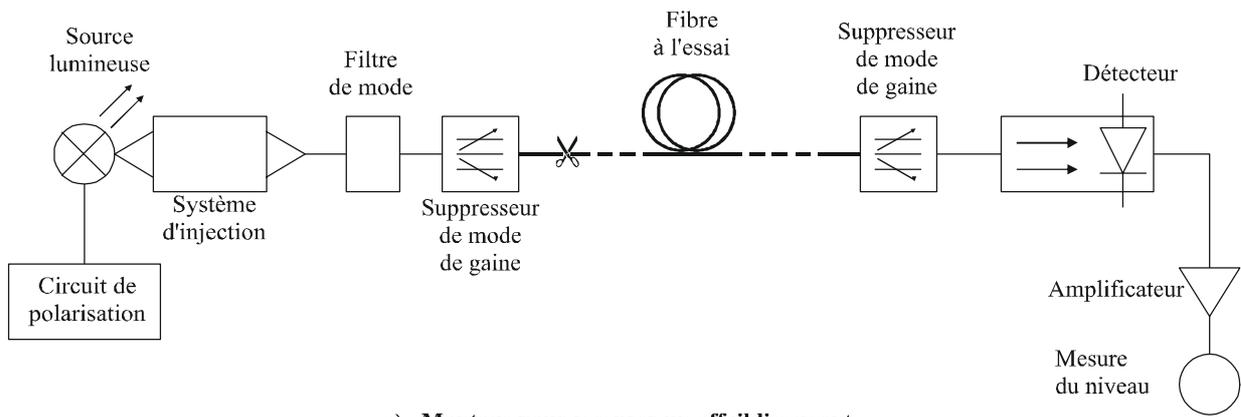
5.4.1 Méthode de test de référence: technique de la fibre coupée

5.4.1.1 Généralités

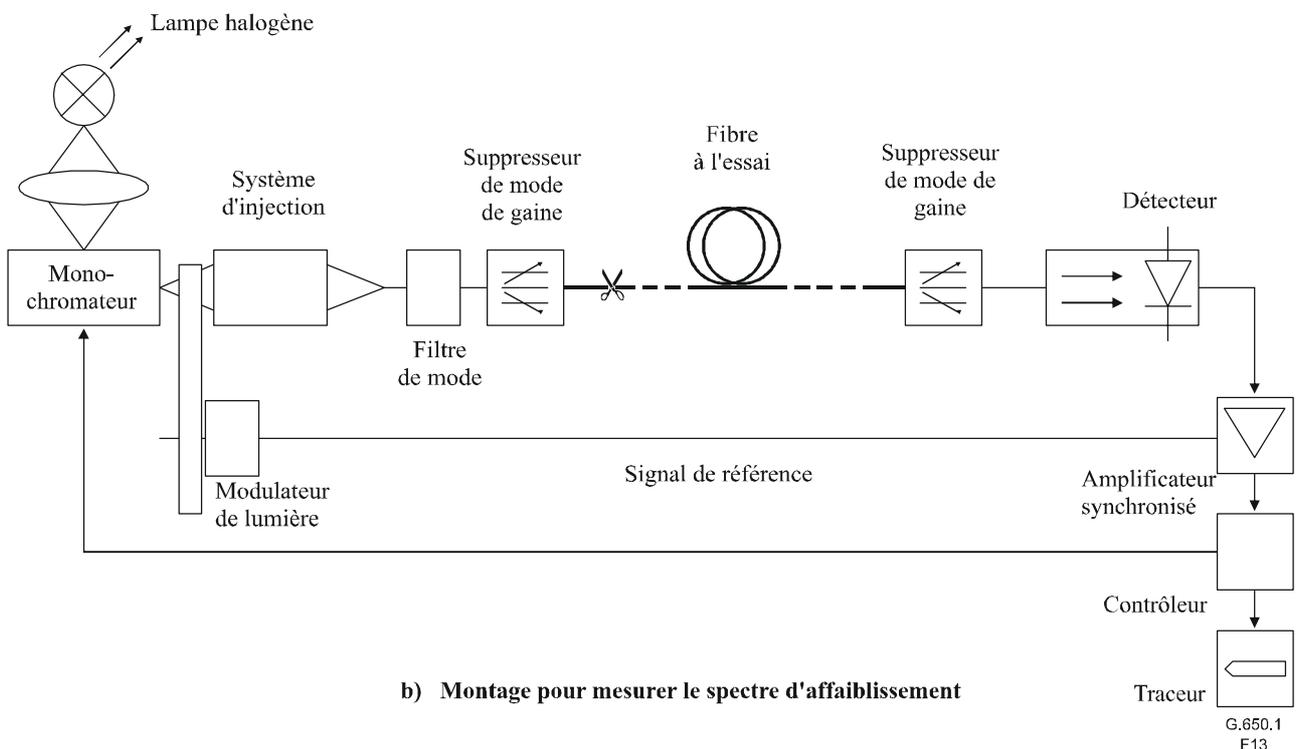
La méthode de la fibre coupée est une application directe de la définition, dans laquelle on mesure les puissances P_1 et P_2 en deux points de la fibre sans changer les conditions d'entrée. P_2 est la puissance de sortie à l'extrémité de la fibre et P_1 la puissance de sortie en un point situé près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

5.4.1.2 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 13 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

Figure 13/G.650.1 – Technique de la fibre coupée

5.4.1.2.1 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.

5.4.1.2.2 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.

5.4.1.2.3 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.

5.4.1.2.4 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.

5.4.1.2.5 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.

5.4.1.2.6 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.

5.4.1.3 Procédure de mesure

5.4.1.3.1 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.

5.4.1.3.2 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 3-4 et 3-5.

5.4.1.4 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).

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

5.4.2.1 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 61746 Ed.1.0-86/118/CDV de la CEI.

5.4.2.2 Montage de mesure

5.4.2.2.1 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 14a.

5.4.2.2.2 Source optique

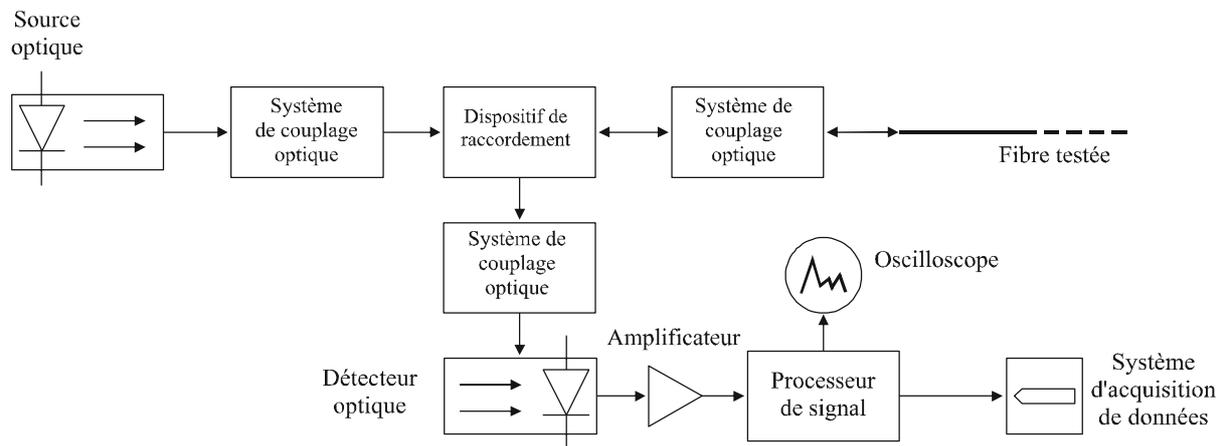
Il convient d'utiliser une source optique stable ayant des longueurs d'onde appropriées qui seront enregistrées. La largeur et la fréquence de répétition des impulsions doivent être compatibles avec la résolution voulue et la longueur de la fibre.

5.4.2.2.3 Système de couplage optique

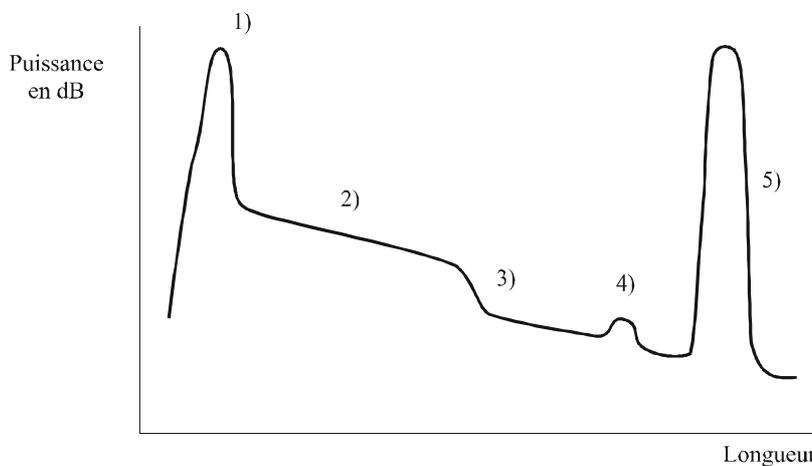
On utilisera un système optique assurant le passage efficace du faisceau dans la fibre testée, le dispositif de raccordement ou le détecteur optique. On peut utiliser en outre plusieurs moyens, tels que les matériaux adaptateurs d'indice, pour réduire les réflexions de Fresnel.

5.4.2.2.4 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



G.650.1
F14

b) Exemple de courbe de perte par réflexion unidirectionnelle

Figure 14/G.650.1 – La technique de mesure par réflexion unidirectionnelle

5.4.2.2.5 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.

5.4.2.2.6 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.

5.4.2.2.7 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.

5.4.2.2.8 Suppresseur du mode de gaine

Voir § 5.4.1.2.5.

5.4.2.2.9 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).

5.4.2.3 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 14b 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 zones 1) et 5) de la Figure 14b).
- 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:

soit $a(x)$ 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:

$$y(x) = \frac{a(x) - b(L_f - x)}{2} \quad (5-14)$$

- 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:

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0} \quad (5-15)$$

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

L'affaiblissement linéique de bout en bout de la fibre est déterminé de la même manière que l'équation 5-15 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 14b).

5.4.2.4 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 14b) 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.

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

5.4.3.1 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 Figure 15); 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 § 5.4.3.3.2.

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.

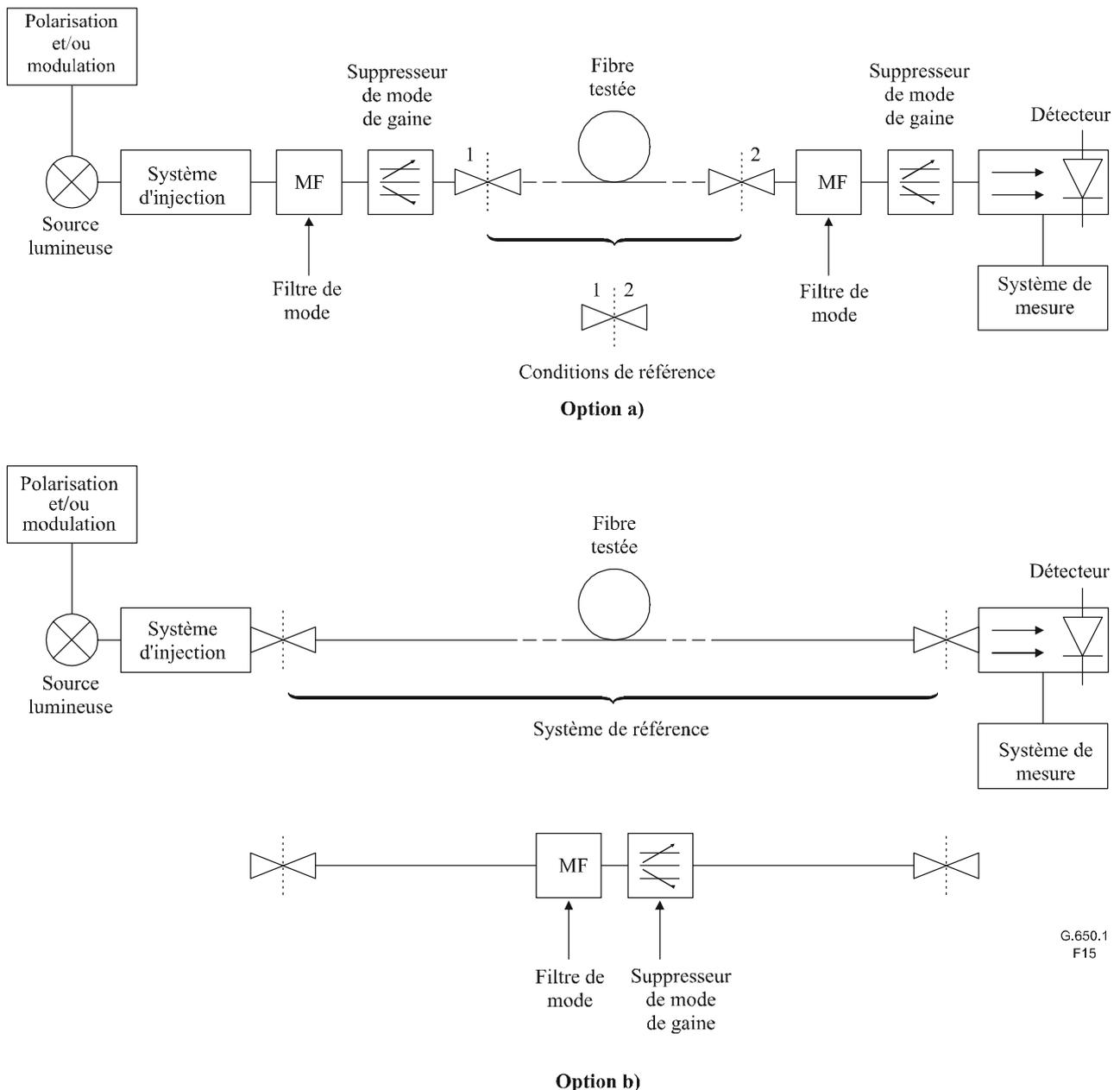


Figure 15/G.650.1 – Configurations types de la technique de mesure de l'affaiblissement d'insertion

5.4.3.2 Montage de mesure

La Figure 15 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.

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

5.4.3.2.2 Modulation

Voir § 5.4.1.2.2.

5.4.3.2.3 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.

5.4.3.2.4 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.

5.4.3.2.5 Filtre de mode

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

5.4.3.2.6 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.

5.4.3.2.7 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 § 5.4.3.2.3, 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.

5.4.3.3 Procédure de mesure

5.4.3.3.1 Préparation de la fibre étudiée

Voir § 5.4.1.3.1.

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

5.4.3.3.2 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)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} + C_r - C_1 - C_2 \text{ (dB)} \quad (5-16a)$$

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)

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \text{ (dB)} \quad (5-16b)$$

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:

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} - C_a \text{ (dB)} \quad (5-17)$$

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.

5.4.3.4 Présentation des résultats

- a) Installation de mesure, y compris le type de la source, sa longueur d'onde, la largeur maximale 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).

5.4.4 Autre méthode de test possible (n° 3): modélisation de l'affaiblissement spectral¹

5.4.4.1 Généralités

Le coefficient d'atténuation d'une fibre dans un spectre de longueurs d'onde peut être calculé à l'aide d'une matrice de caractérisation, M , et d'un vecteur, v . Le vecteur contient les coefficients d'atténuation mesurés à un petit nombre (trois à cinq) de longueurs d'onde (par exemple, 1310 nm, 1360 nm, 1380 nm, 1410 nm 1550 nm et/ou 1625 nm).

Dans une des options, le constructeur de fibres ou de câbles doit fournir une matrice caractéristique des produits qu'il fabrique, et l'affaiblissement spectral modélisé est un vecteur, w , calculé à partir du produit de M et de v :

$$w = M \cdot v$$

En variante, s'il utilise une matrice générique, le constructeur doit également fournir un vecteur de facteur de correction tel que les prévisions soient calculées selon la formule suivante:

$$W = w + e$$

où:

W est le vecteur modifié

w est obtenu suivant la formule $w = M \cdot v$

e est le vecteur de facteur de correction

¹ Le paragraphe 5.4.4 a été simplement transféré dans le corps même de cette Recommandation. Il a déjà été approuvé en tant qu'Amendement 1 et NE fait PAS l'objet de la procédure AAP.

Une matrice générique est une matrice de caractérisation applicable à de multiples fibres, modèles et constructeurs (dans le cadre, semble-t-il d'un type de fibre donné), et déterminée et/ou invoquée par un organisme de normalisation, un abonné/utilisateur final isolé ou un autre fabricant aux produits duquel les différents constructeurs peuvent comparer les leurs, la différence étant obtenue par le vecteur, e .

5.4.4.2 Montage de mesure

Etant donné que cette technique de calcul utilise des valeurs prédéterminées, aucun équipement de mesure particulier n'est nécessaire. N'importe laquelle des méthodes de test recommandées (la technique de la fibre coupée (§ 5.4.1), la technique de la rétrodiffusion (§ 5.4.2) ou la technique de l'affaiblissement d'insertion (§ 5.4.3)) peut être utilisée pour obtenir les valeurs mesurées qui permettront de procéder aux calculs.

En cas de non-concordance des résultats, les valeurs des coefficients d'atténuation obtenues par des mesures directes prévalent sur les valeurs mesurées par cette méthode.

5.4.4.3 Procédure de calcul

Le coefficient d'atténuation d'une fibre dans un spectre de longueurs d'onde peut être calculé suivant la formule $w = M \cdot v$. Le vecteur, v , contient les coefficients d'atténuation mesurés à un petit nombre (3 à 5) de longueurs d'onde prédictives (par exemple, 1310 nm, 1360 nm, 1380 nm, 1410 nm, 1550 nm et/ou 1625 nm) qui ont été mesurées selon une des méthodes de test de l'affaiblissement susmentionnées. En multipliant la matrice, M , par le vecteur, v , on obtient un autre vecteur, w , qui contient les coefficients d'atténuation prévus à de nombreuses longueurs d'onde (par exemple à des intervalles de longueur d'onde de 10 nm entre 1240 nm et 1600 nm).

La matrice, M , est donnée par:

$$\begin{array}{ccc}
 A_{11} & A_{12} \dots\dots\dots & A_{1n} \\
 A_{21} & A_{22} \dots\dots\dots & A_{2n} \\
 " & " & \\
 " & " & \\
 " & " & \\
 A_{m1} & A_{m2} \dots\dots\dots & A_{mn}
 \end{array}$$

où m est le nombre de longueurs d'onde dans lesquelles les coefficients d'atténuation doivent être évalués et n le nombre de longueurs d'onde prédictives. Un exemple d'une telle matrice est donné à titre indicatif dans l'Appendice III.

L'écart type de la différence entre les coefficients d'atténuation réels et prévus à chaque longueur d'onde doit être inférieur à 0,xx dB/km dans une plage de longueurs d'onde prédéterminée. Une tolérance différente – 0,yy dB/km – peut être nécessaire si une autre plage de longueurs d'onde est spécifiée. Les valeurs de xx (et de yy), ainsi que la ou les plages de longueurs d'onde, doivent être déterminées d'un commun accord entre l'utilisateur et le fabricant.

Si on obtient l'estimation en utilisant la matrice M spécifique du fabricant ou du type de fibre, aucun vecteur de correction e n'est alors nécessaire.

Les éléments de M et e étant obtenus sur une base statistique, les éléments du vecteur w doivent être déterminés comme tels. Pour indiquer l'exactitude des coefficients d'atténuation prévus, les constructeurs de fibres doivent fournir un vecteur contenant l'écart type de la différence entre les coefficients d'atténuation réels et prévus, ainsi que les valeurs de M et/ou de e (voir § 5.4.4.4).

NOTE 1 – Pour faciliter l'utilisation de cette matrice, la fibre doit être périodiquement mesurée aux longueurs d'onde prédictives. Le nombre de longueurs d'onde prédictives doit être compris entre 3 et 5, une forte préférence étant accordée au nombre le plus faible si l'on peut obtenir une précision suffisante.

NOTE 2 – Ce modèle ne prend en considération que l'affaiblissement des fibres non câblées. Il est nécessaire d'ajouter un vecteur complémentaire à w pour tenir compte des effets du câblage et de l'environnement.

5.4.4.4 Présentation des résultats

Outre les points à communiquer pour la méthode de test utilisée aux fins de la mesure des coefficients d'atténuation, il y a lieu de communiquer les points suivants:

- a) l'atténuation prévue et la longueur d'onde correspondante;
- b) la méthode utilisée pour obtenir les valeurs des coefficients d'atténuation mesurés (sur demande);
- c) la matrice utilisée pour prévoir l'affaiblissement spectral, ou le vecteur de correction si une matrice normalisée a été utilisée (sur demande);
- d) le vecteur contenant l'écart type de la différence entre les coefficients d'atténuation réels et prévus obtenu au cours de la mise au point de la matrice (sur demande).

5.5 Méthodes de test de la dispersion chromatique

La dispersion chromatique varie en fonction de la longueur d'onde. Certaines méthodes ou implémentations permettent de mesurer le temps de propagation de groupe en fonction de la longueur d'onde, la dispersion chromatique et la pente de dispersion étant obtenues par dérivation à partir de ces données (en fonction de la longueur d'onde). Cette différentiation est souvent faite après ajustement de ces données sur un modèle mathématique. D'autres implémentations de la méthode de référence permettent de prendre directement des mesures à chacune des longueurs d'ondes spécifiées.

Dans le cas de certaines catégories de fibres, les attributs de dispersion chromatique sont spécifiés en fonction des paramètres d'un modèle particulier. En pareils cas, la Recommandation pertinente définit le modèle adapté à la définition des paramètres spécifiés. Pour les autres catégories de fibres, la dispersion est spécifiée comme étant située à l'intérieur d'une plage donnée pour un ou plusieurs intervalles particuliers de longueur d'onde. Dans ce dernier cas, il est possible soit de prendre les mesures directement aux extrémités des longueurs d'onde, soit d'utiliser un modèle d'ajustement pour permettre d'appliquer des méthodes ou implémentation de mesure des temps de propagation de groupe, ou pour permettre d'enregistrer un ensemble limité de paramètres pouvant servir à calculer, par interpolation, la dispersion associée à des longueurs d'onde particulières pour lesquelles aucune valeur de mesure directe réelle n'est disponible.

L'Annexe A donne une description générale de l'ajustement de dispersion chromatique et indique un certain nombre d'équations correspondantes adaptées à toute méthode de mesure ou catégorie de fibre.

5.5.1 Méthode de test de référence: la technique du déphasage

5.5.1.1 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.

NOTE – Le déphasage différentiel est décrit dans l'Annexe C de la CEI 60793-1-42.

5.5.1.2 Montage de mesure

La Figure 16 représente un schéma du montage de mesure.

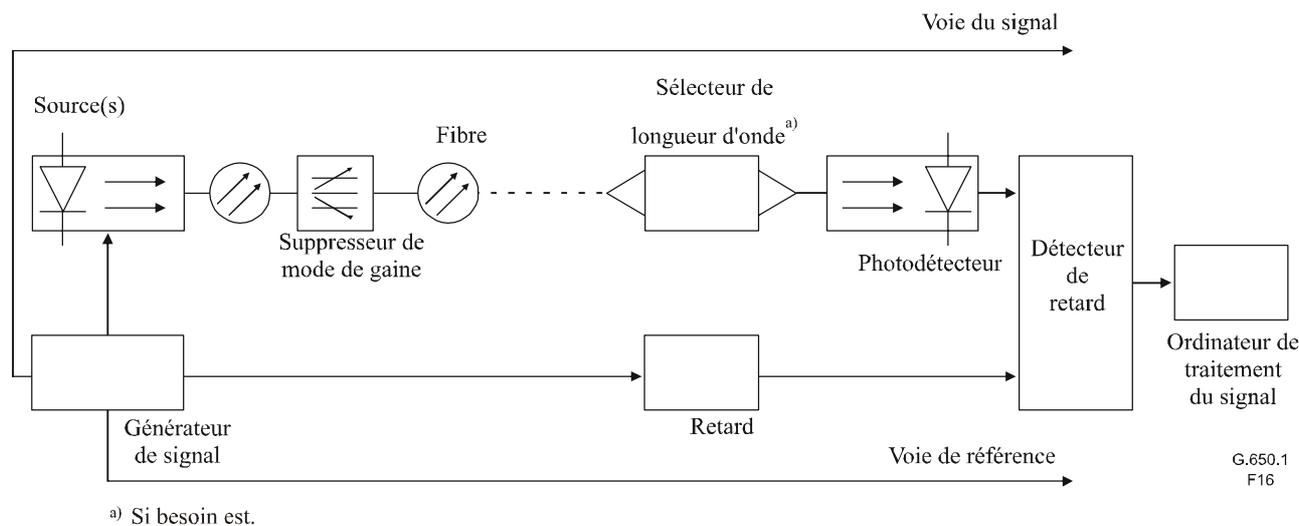


Figure 16/G.650.1 – Configuration type du montage de test

5.5.1.2.1 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, *laser diode array*)), des diodes laser à longueur d'onde réglable (WTL, *wavelength tunable laser diodes*) (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.

5.5.1.2.2 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, un point de données au moins doit être à moins de 100 nm de λ_0 .

5.5.1.2.3 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.

5.5.1.2.4 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.

5.5.1.2.5 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.

5.5.1.2.6 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.

5.5.1.3 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.

5.5.1.4 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) Modèle servant à ajuster les données de temps de propagation de groupe ou les données de dispersion chromatique, et gamme de longueurs d'onde utilisée pour l'ajustement.
- i) Valeurs des coefficients découlant de l'ajustement pour chaque gamme de longueurs d'onde utilisée à cet effet.
- j) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

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

5.5.2.1 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

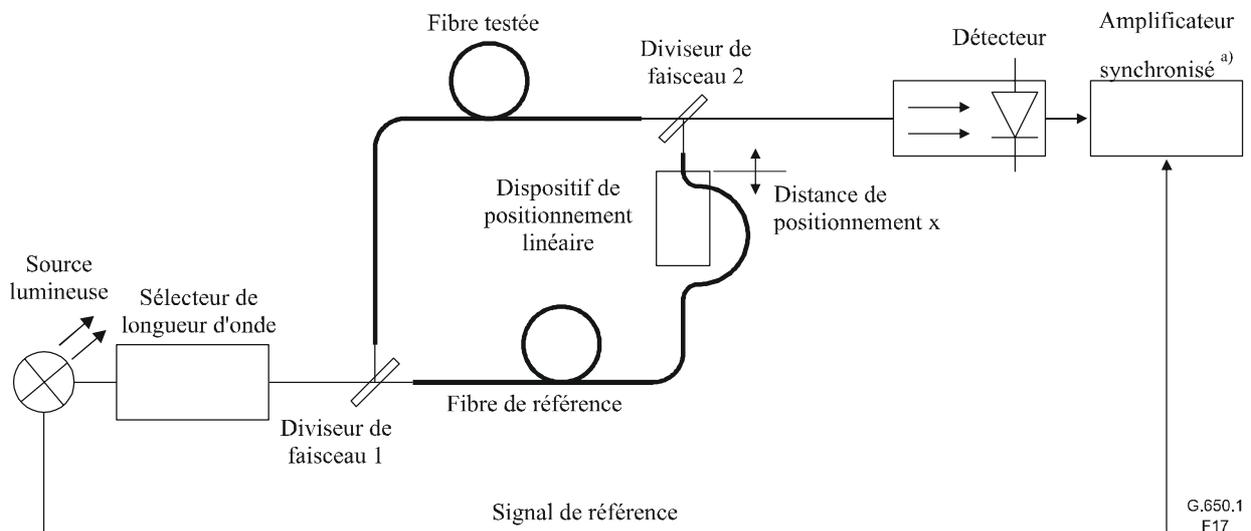
de la dispersion chromatique des fibres optiques. On peut en outre mesurer l'effet de conditions générales ou locales, telles que les affaiblissements dus aux changements de température et aux macrocourbures, sur la dispersion chromatique.

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 applicable dans tous les cas.

5.5.2.2 Montage de mesure

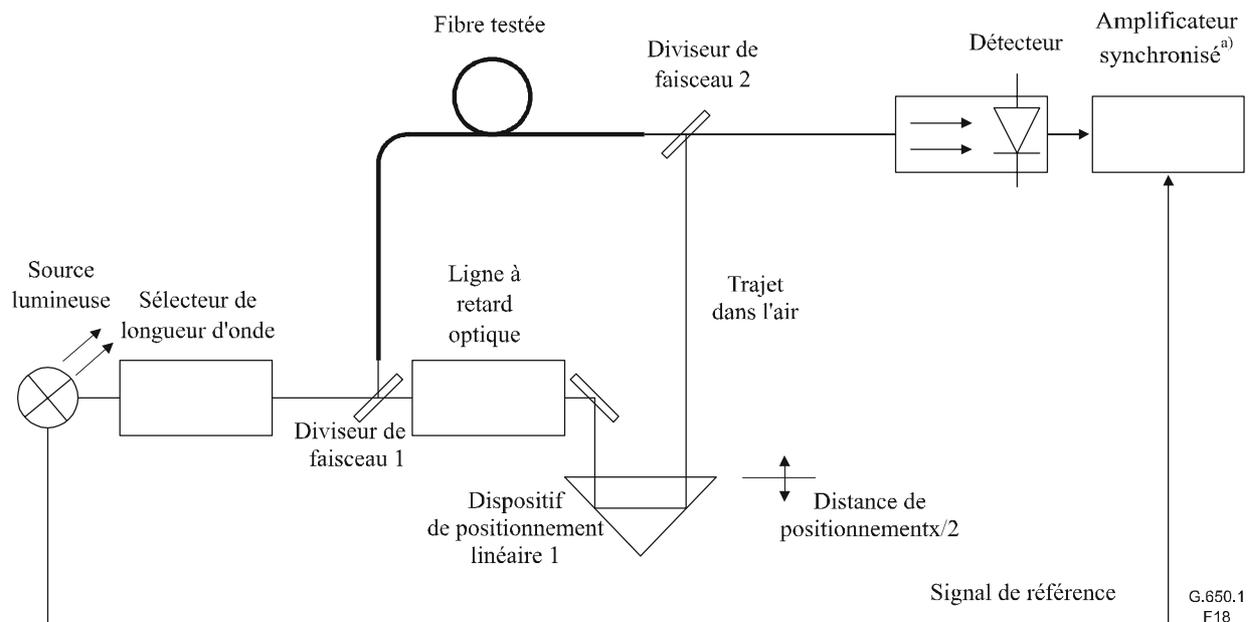
Les Figures 17 et 18 représentent le schéma du montage de mesure utilisé avec une fibre de référence et avec, comme référence, un trajet aérien.



a) Si nécessaire.

G.650.1
F17

Figure 17/G.650.1 – Schéma du montage de mesure avec fibre de référence



a) Si nécessaire.

Figure 18/G.650.1 – Schéma du montage de mesure avec référence de trajet dans l'air

5.5.2.2.1 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.

5.5.2.2.2 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, un point de données ou moins doit être à moins de 100 nm du λ_0 .

5.5.2.2.3 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.

5.5.2.2.4 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 .

5.5.2.2.5 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.

5.5.2.2.6 Traitement des données

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

5.5.2.3 Procédure de mesure

- 1) La fibre soumise à essai est placée dans l'équipement de mesure (Figures 17 et 18). 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 19) 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:

$$\Delta\tau_g(\lambda_i) = \frac{x_0 - x_i}{c_0} \quad (5-18)$$

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.

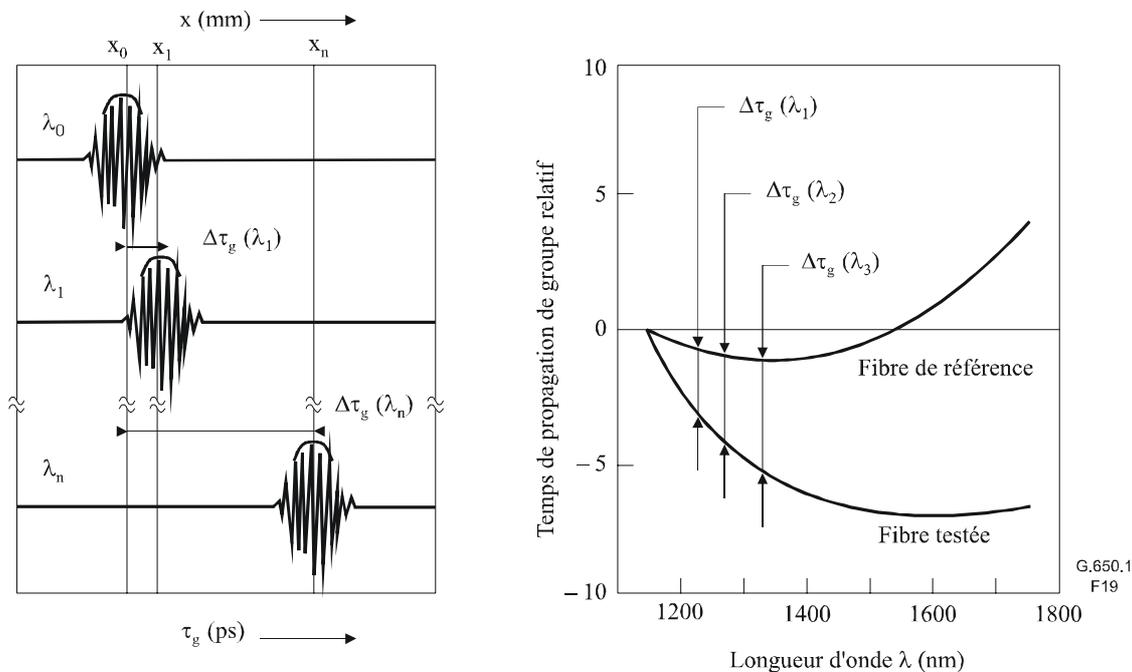


Figure 19/G.650.1 – Détermination du temps de propagation de groupe spectral

5.5.2.4 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) Modèle servant à ajuster les données de temps de propagation de groupe ou les données de dispersion chromatique, et gamme de longueurs d'onde utilisée pour l'ajustement.
- g) Valeurs des coefficients découlant de l'ajustement pour chaque gamme de longueurs d'onde utilisée à cet effet.
- h) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

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

5.5.3.1 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.

5.5.3.2 Montage de mesure

Un schéma du montage de mesure est représenté à la Figure 16.

5.5.3.2.1 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) (par exemple un laser à cavité externe (ECL)), 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.

5.5.3.2.2 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 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, un point de données ou moins doit se trouver au plus à 100 nm de λ_0 .

5.5.3.2.3 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.

5.5.3.2.4 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.

5.5.3.2.5 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.

5.5.3.2.6 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 ordinateur numérique pour procéder à la commande de l'équipement, au stockage des données et à l'évaluation numérique des données.

5.5.3.3 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.

5.5.3.4 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) Modèle servant à ajuster les données de temps de propagation de groupe ou les données de dispersion chromatique, et gamme de longueurs d'onde utilisée pour l'ajustement.
- i) Valeurs des coefficients découlant de l'ajustement pour chaque gamme de longueurs d'onde utilisée à cet effet.
- j) Température de l'échantillon et conditions d'environnement (si nécessaire).

5.6 Méthodes de test d'épreuve

5.6.1 Méthode de test de référence: traction longitudinale

5.6.1.1 Généralités

- 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.
- Des conditions ambiantes normales doivent être appliquées pour le stockage et les tests de contrôle: température de $23 \pm 5^\circ \text{C}$ 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.
- 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:

$$\sigma = E(1 + c\epsilon)\epsilon \quad (5-19)$$

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.

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

$$\sigma = \frac{(1-F)T}{\pi a^2} \quad (5-20)$$

où $2a$ est le diamètre de la fibre ($125 \mu\text{m}$) et F la fraction de la traction supportée par les revêtements. F est obtenu par:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n E_j A_j}{E_g \pi a^2 + \sum_{j=1}^n E_j A_j} \quad (5-21)$$

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^{e} couche de revêtement

E_g est le module de la fibre de verre

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

5.6.1.1.1 Paramètres du test de contrôle

- 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 20, où l'on observe les temps de charge et de décharge (t_1 et t_u) 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.
- 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.

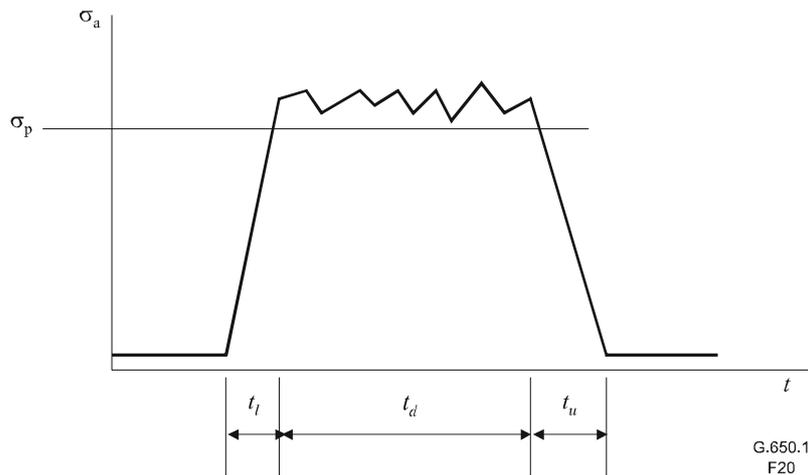


Figure 20/G.650.1 – Contraintes σ en fonction du temps t pendant l'essai de contrôle

5.6.1.2 Appareil de contrôle

5.6.1.2.1 Mode opératoire

- a) 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 Figure 20).
- b) 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 .
- c) Dans la zone d'épreuve, la contrainte appliquée σ_a est maintenue à des valeurs supérieures à la contrainte spécifiée, σ_p .
- d) Dans la zone de décharge, la contrainte passe de la valeur appliquée à une faible valeur. La durée de la décharge est t_u .
- e) 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.
- f) 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.

5.6.1.2.2 Appareils de test

- a) *Machine à cabestan de freinage* (Figure 21)

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.

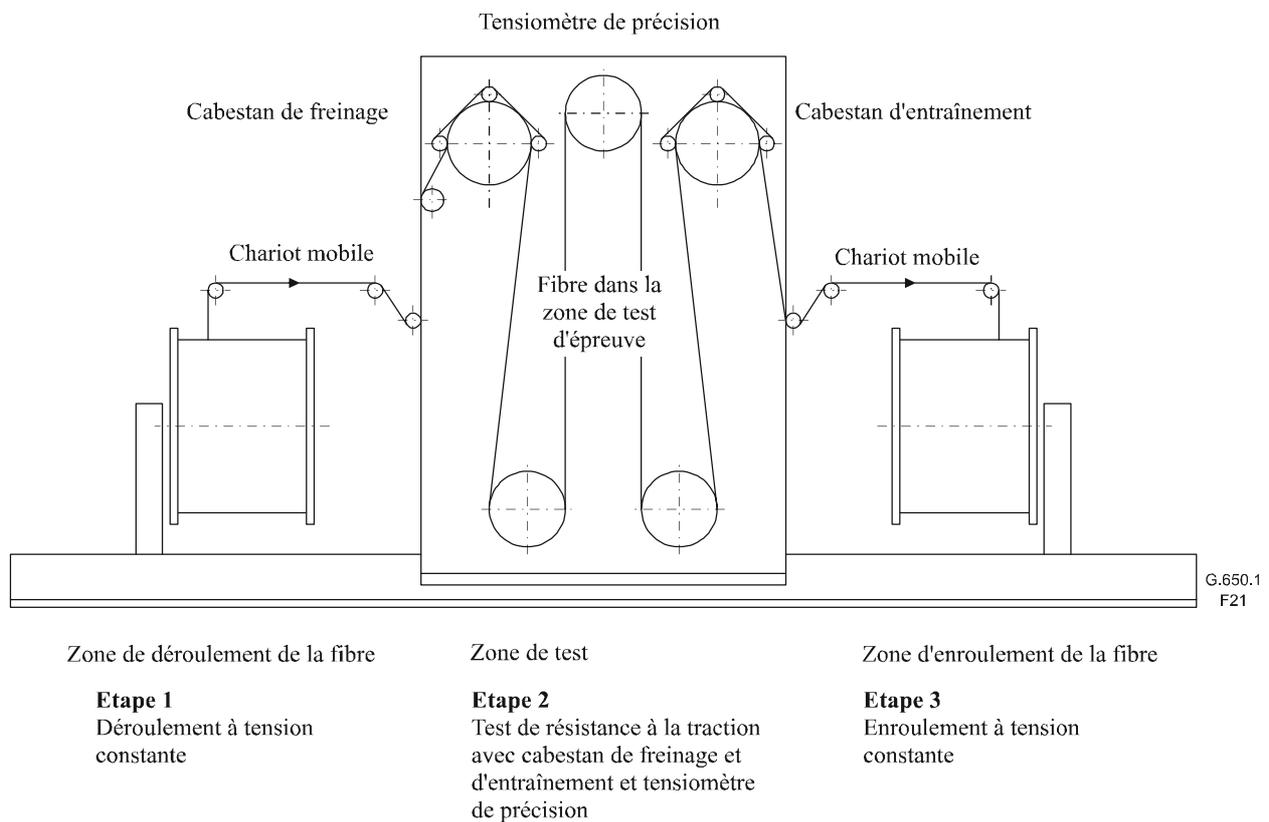


Figure 21/G.650.1 – Configuration type d'un montage de test à cabestan de freinage

b) *Machine à charge directe* (Figure 22)

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.

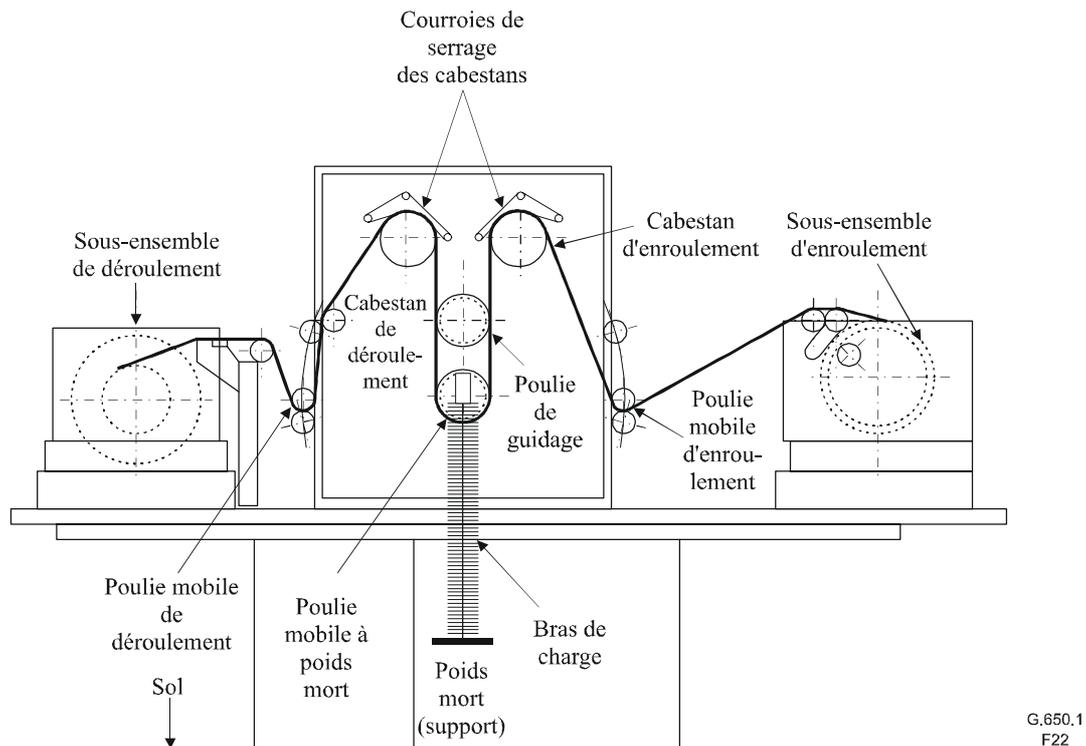


Figure 22/G.650.1 – Configuration typique d'un appareil de test à charge directe

5.6.1.3 Méthode de test

5.6.1.3.1 Echantillon

- a) 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.
- b) 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.

5.6.1.3.2 Calculs

Si la traction appliquée par la machine est étalonnée, on calcule la contrainte à partir de l'équation 5-20. La déformation peut être obtenue à partir de l'équation 5-19.

5.6.1.4 Présentation des résultats

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

Annexe A

Ajustement de dispersion chromatique

A.1 Généralités

Les résultats des mesures de dispersion chromatique représentent soit des valeurs de dispersion chromatique directement mesurées, soit des valeurs de temps de propagation de groupe en fonction de la longueur d'onde. La valeur de dispersion chromatique et la pente de dispersion sont obtenues par dérivation à partir de ces données. Cette différentiation est souvent faite après ajustement des données sur un modèle mathématique.

La présente annexe donne une description générale de l'ajustement de dispersion chromatique et indique un certain nombre d'équations d'ajustement standard.

NOTE – Même si les caractéristiques de pente de dispersion peuvent ne pas être des critères normatifs, des valeurs types sont souvent fournies par les fabricants pour faciliter la prise en compte de la dispersion.

A.2 Définition des équations et des coefficients d'ajustement

Le Tableau A.1 contient une description générale de modèles mathématiques d'ajustement. La formule polynomiale est générale; elle peut être étendue à des polynômes d'ordre supérieur conformément aux mêmes principes.

Le Tableau A.2 donne les équations correspondant à la pente de dispersion.

Le Tableau A.3 donne les formules correspondant à la longueur d'onde et à la pente de dispersion nulle à cette longueur d'onde respectivement pour le modèle à trois termes de Sellmeier et le modèle polynomial du second ordre.

Tableau A.1/G.650.1 – Définition des types et des coefficients d'ajustement

Type d'ajustement	Equation relative au temps de propagation de groupe	Equation relative aux données de dispersion
Sellmeier à 3 termes	$A + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda^{-2}$	$2 \cdot B \cdot \lambda - 2 \cdot C \cdot \lambda^{-3}$
Sellmeier à 5 termes	$A + B \cdot \lambda^2 + C \cdot \lambda^{-2} + D \cdot \lambda^4 + E \cdot \lambda^{-4}$	$2 \cdot B \cdot \lambda - 2 \cdot C \cdot \lambda^{-3} + 4 \cdot D \cdot \lambda^3 - 4 \cdot E \cdot \lambda^{-5}$
Polynome du second ordre (quadratique)	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda$
Polynome du troisième ordre (cubique)	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2 + D \cdot \lambda^3$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda + 3 \cdot D \cdot \lambda^2$
Polynome du quatrième ordre	$A + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2 + D \cdot \lambda^3 + E \cdot \lambda^4$	$B + 2 \cdot C \cdot \lambda + 3 \cdot D \cdot \lambda^2 + 4 \cdot E \cdot \lambda^3$

Tableau A.2/G.650.1 – Equations relatives à la pente

Type d'ajustement	Equation relative à la pente de dispersion
Sellmeier à 3 termes	$2 \cdot B + 6 \cdot C \cdot \lambda^{-4}$
Sellmeier à 5 termes	$2 \cdot B + 6 \cdot C \cdot \lambda^{-4} + 12 \cdot D \cdot \lambda^2 + 20 \cdot E \cdot \lambda^{-6}$
Polynome du second ordre (quadratique)	$2 \cdot C$
Polynome du troisième ordre (cubique)	$2 \cdot C + 6 \cdot D \cdot \lambda$
Polynome du quatrième ordre	$2 \cdot C + 6 \cdot D \cdot \lambda + 12 \cdot E \cdot \lambda^2$

Tableau A.3/G.650.1 – Equations relatives à la longueur d'onde et à la pente de dispersion nulle

Type d'ajustement	Longueur d'onde de dispersion nulle	Pente de dispersion nulle
Sellmeier à 3 termes	$(C/B)^{1/4}$	8B
Polynome du second ordre (quadratique)	$-B/(2C)$	2C

A.3 Procédure d'ajustement

Pour un ajustement numérique fiable, il convient de convertir les abscisses (longueurs d'onde) en valeurs sur une plage plus étroite en modifiant les coordonnées avant d'effectuer la régression par moindres carrés. Une fois la régression effectuée, il faut reconvertir les paramètres d'ajustement en valeurs de la plage de longueurs d'onde d'origine avant de calculer les dérivées.

Il convient d'adopter une procédure appropriée de régression par moindres carrés pour résoudre le problème de l'ajustement. Cette méthode doit être stable du point de vue du bruit ou d'autres erreurs introduites au cours de la mesure du temps de propagation de groupe ou de la dispersion. (Se reporter à la référence [Press] dans Bibliographie.) Le choix des équations relatives au temps de propagation de groupe ou à la dispersion dérivée est fonction de la source des données d'entrée.

On veillera, pour l'ajustement, à disposer d'un nombre suffisant de points. Lorsque l'ordre d'ajustement et le nombre de points sont comparables, l'ajustement ne donnera pas de résultats précis.

Si l'on procède à un ajustement des données de temps de propagation de groupe, on peut calculer les données de dispersion chromatique à partir des équations relatives à la dispersion figurant dans le Tableau A.1 au moyen des coefficients obtenus à partir de l'ajustement. Il convient d'utiliser avec prudence toute extrapolation concernant des longueurs d'onde situées à l'extérieur de la région faisant l'objet de l'ajustement étant donné que ces ajustements peuvent présenter un comportement non réaliste du point de vue physique pour les points situés à l'extérieur de cette région.

La pente de dispersion peut être calculée à partir des équations du Tableau A.2, au moyen des coefficients obtenus à partir de l'ajustement.

Appendice I

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 5-11 du § 5.3.1.3.4.

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 $0,1 \text{ dB}$ 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:
$$\Delta a(\lambda) = a(\lambda) - A_u - B_u \lambda \quad (\text{I-3})$$

- a) 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;
- b) 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;
 - b1) il y a un maximum local pour $\Delta a(\lambda)$;
 - 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 5-11 du § 5.3.1.3.4, 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:

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

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

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

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 :

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

1.2 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 5-11 du § 5.3.1.3.4, de telle manière que la somme des carrés des erreurs soit minimale, au moyen des équations 5-8, 5-9, 5-10 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

Méthode de mesure de l'uniformité de dispersion chromatique fondée sur la technique de rétrodiffusion

II.1 Généralités

Une méthode de test permettant de déterminer l'uniformité de la dispersion chromatique d'une fibre optique monomode est décrite et elle est fondée sur des mesures de rétrodiffusion bidirectionnelle. Cette technique peut évaluer l'uniformité du guide d'onde et de la dispersion par le matériau sur une base individuelle. En outre, cette technique peut servir à mesurer le diamètre de champ de mode. Des procédures d'étalonnage de l'équipement de rétrodiffusion sont indiquées dans la CEI 61746 Ed.1.0-86/118/CDV.

II.2 Montage de mesure

II.2.1 Généralités (comme au § 5.4.2.2.1)

Un exemple de montage est illustré dans la Figure II.1.

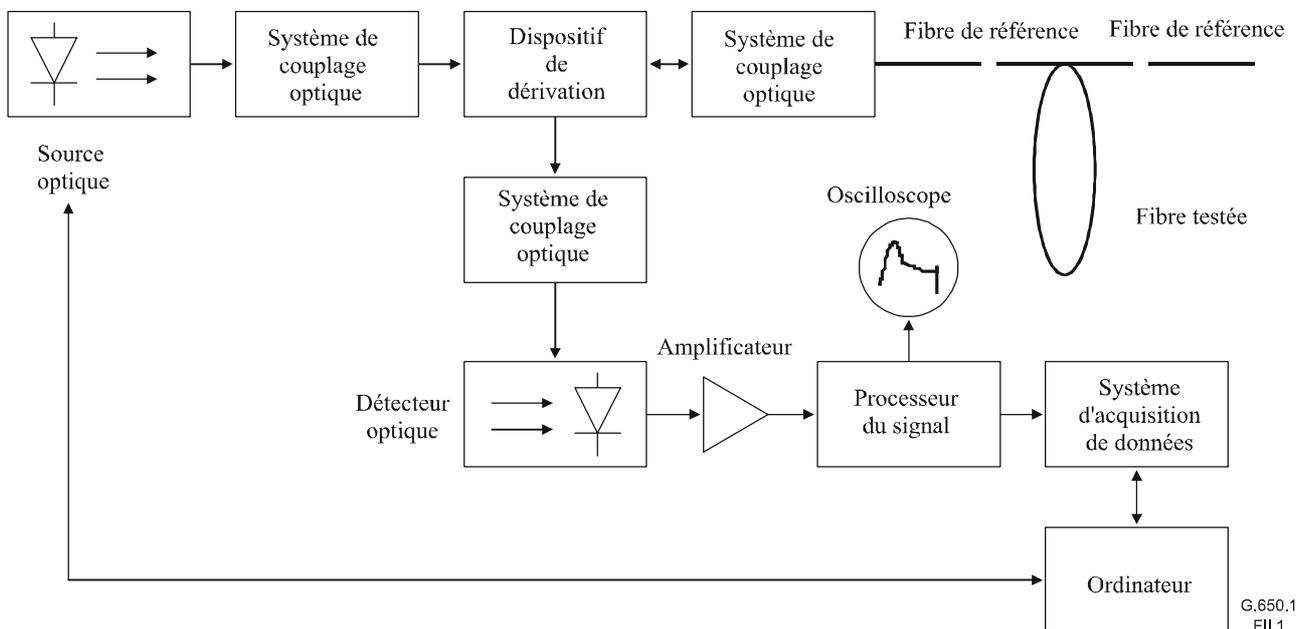


Figure II.1/650.1 – Schéma de montage pour la mesure de l'uniformité de dispersion chromatique

II.2.2 Source optique (comme dans § 5.4.2.2.2)

II.2.3 Système de couplage optique (comme dans § 5.4.2.2.3)

II.2.4 Dispositif de dérivation (comme dans § 5.4.2.2.4)

II.2.5 Détecteur optique (comme dans § 5.4.2.2.5)

II.2.6 Amplificateur (comme dans § 5.4.2.2.6)

II.2.7 Processeur du signal (comme dans § 5.4.2.2.7)

II.2.8 Suppresseur du mode de gaine (comme dans § 5.4.2.2.8)

II.2.9 Fibre de référence

Le profil d'indice de réfraction de la fibre de référence doit être similaire à celui de la fibre soumise à l'essai et sa longueur est restreinte afin de conserver une bonne uniformité longitudinale mais elle doit être supérieure à celle de la zone morte d'entrée des mesures de rétrodiffusion. De plus, le diamètre du champ de mode de la fibre de référence doit être mesuré en fonction de la longueur d'onde. Cette fibre de référence peut servir à estimer la valeur absolue du diamètre de champ de mode et la différence d'indices relatifs à partir des mesures de rétrodiffusion.

II.3 Procédure de mesure

- a) Connecter les fibres de référence aux deux extrémités de la fibre soumise à l'essai.
- b) Aligner la fibre soumise à l'essai avec le système de couplage optique.
- c) Comme au point b) au § 5.4.2.3.
- d) Comme au point c) au § 5.4.2.3.
- e) Tracer la courbe de perte due à l'imperfection de la rétrodiffusion bidirectionnelle en utilisant les deux courbes de pertes par rétrodiffusion unidirectionnelle qui ont été mesurées et enregistrées, en suivant la procédure soulignée ci-après:

posons $S_1(x)$ et $S_2(z)$ des fonctions décrivant les deux courbes de pertes par rétrodiffusion unidirectionnelle exprimées en dB, x et z étant les distances des extrémités de fibre les plus proches des sites d'injection respectifs et $L = x + z$. La courbe de perte due à l'imperfection de la rétrodiffusion bidirectionnelle est donnée par:

$$I(x, z) = \frac{S_1(x, \lambda) + S_2(L - x, \lambda)}{2} \quad (\text{II-1})$$

- f) Obtenir la perte par imperfection normalisée par celle à la position x_0 dans la fibre de référence en suivant la procédure indiquée ci-après:

$$\begin{aligned} I_n(x, \lambda) &= I(x, \lambda) - I(x_0, \lambda) \\ &= 20 \log \left\{ \frac{W(x_0, \lambda)}{W(x, \lambda)} \right\} + 10 \log \left[\left\{ \frac{1 + 0,62\Delta(x)}{1 + 0,62\Delta(x_0)} \right\} \left\{ \frac{50 - \Delta(x)}{50 - \Delta(x_0)} \right\} \right] \\ &= 20 \log \left\{ \frac{W(x_0, \lambda)}{W(x, \lambda)} \right\} + k \end{aligned} \quad (\text{II-2})$$

où le coefficient k est défini par:

$$k = 10 \log \left[\left\{ \frac{1 + 0,62\Delta(x)}{1 + 0,62\Delta(x_0)} \right\} \left\{ \frac{50 - \Delta(x)}{50 - \Delta(x_0)} \right\} \right] \quad (\text{II-3})$$

- g) Obtenir la distribution du diamètre de champ de mode, $2W(x, \lambda)$, selon la procédure indiquée ci-après:

posons le diamètre de champ de mode à la position x_0 dans la fibre de référence égal à $2W(x_0, \lambda)$. La distribution du diamètre de champ de mode est donnée par:

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot 10^{\frac{-I_n(x, \lambda) + k}{20}} \quad (\text{II-4})$$

Si les fibres de référence et de test ont le même profil d'indice et la même différence d'indices relatifs, posons le coefficient $k = 0$.

Si la différence d'indices relatifs dans la fibre de test n'est pas la même que dans la fibre de référence, calculer le coefficient k à l'aide de l'équation II-3 et la valeur du diamètre de champ de mode au point x dans la fibre de test qui a été préalablement évaluée.

Si les coefficients correcteurs f et g , déterminés comme il est décrit dans le point c) du § 5.1.4.3.2, sont donnés, la distribution du diamètre de champ de mode est donnée par:

$$2W(x, \lambda) = 2W(x_0, \lambda) \cdot 10^{\frac{-g \cdot I_n(x, \lambda) + f}{20}} \quad (\text{II-5})$$

- h) Répéter les procédures précédentes pour deux ou plusieurs longueurs d'onde différentes.
i) Obtenir les coefficients g_0 , g_1 , et g_2 qui satisfont à l'équation II-6 en utilisant les rayons de champs de mode $W(x, \lambda)$ précédents.

$$W(x, \lambda) = g_0(x) + g_1(x)\lambda^{1,5} + g_2(x)\lambda^6 \quad (\text{trois longueurs d'onde ou plus}) \quad (\text{II-6})$$

ou:

$$W(x, \lambda) = g_0(x) + g_1(x)\lambda^{1,5} \quad (\text{deux longueurs d'onde ou plus}) \quad (\text{II-7})$$

Cette expression peut être évaluée par un lissage par moindres carrés des données $W(x, \lambda_i)$ ($i = 1, \dots, n$).

- j) Obtenir la distribution de la dispersion du guide d'ondes, $D_w(x, \lambda)$, exprimée en ps/(nm × km) indiquée dans l'équation ci-après:

$$D_w(x, \lambda) = \frac{\lambda}{2\pi^2 cn W(x, \lambda)^2} \left\{ 1 - \frac{2\lambda}{W(x, \lambda)} \left(\frac{3}{2} g_1(x)\lambda^{0,5} + 6g_2(x)\lambda^5 \right) \right\} \quad (\text{trois longueurs d'onde ou plus}) \quad (\text{II-8})$$

ou:

$$D_w(x, \lambda) = \frac{\lambda}{2\pi^2 cn W(x, \lambda)^2} \left\{ 1 - \frac{3g_1(x)\lambda^{1,5}}{W(x, \lambda)} \right\} \quad (\text{deux longueurs d'onde ou plus}) \quad (\text{II-9})$$

où c et n représentent respectivement la vitesse en m/s de la lumière et l'indice de réfraction maximal du cœur.

- k) Obtenir la distribution de la différence d'indices relatifs, $D(x)$ exprimée en %, selon la procédure indiquée ci-après:

si les fibres de référence et de test ont le même profil d'indice, calculer les coefficients c_0 , c_1 et c_2 dans la fibre de référence qui satisfont à l'équation ci-après en utilisant le diamètre de champ de mode $2W(x_0, \lambda)$, le diamètre du cœur $2a(x_0)$, et la longueur d'onde de coupure $\lambda_c(x_0)$.

$$\frac{W(x_0, \lambda)}{a(x_0)} = c_0 + c_1 \left\{ \frac{\lambda}{\lambda_c(x_0)} \right\}^{1,5} + c_2 \left\{ \frac{\lambda}{\lambda_c(x_0)} \right\}^6 \quad (\text{II-10})$$

Calculer la caractéristique du rapport R_W des diamètres de champ de mode de deux longueurs d'ondes (λ_1 et λ_2) en fonction de la longueur d'onde de coupure λ_c en utilisant les coefficients c_0 , c_1 et c_2 précédents.

$$R_W \equiv \frac{2W(\lambda_1)}{2W(\lambda_2)} = \frac{c_0 + c_1 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_c} \right)^{1.5} + c_2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_c} \right)^6}{c_0 + c_1 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_c} \right)^{1.5} + c_2 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_c} \right)^6} \quad (\text{II-11})$$

Déterminer la fonction approximative entre le rapport R_W des diamètres de champ de mode à deux longueurs d'onde et la longueur d'onde de coupure λ_c .

Obtenir la distribution de longueur d'onde de coupure $\lambda_c(x)$ en appliquant la fonction approximative précédente au rapport des distributions de diamètre de champ de mode mesurées.

Obtenir la distribution du diamètre de cœur $2a(x)$ en substituant par leurs valeurs la distribution du diamètre de champ de mode $2W(x)$ et la distribution $\lambda_c(x)$ de la longueur d'onde de coupure dans l'équation II-10.

Obtenir la distribution de la différence d'indices relatifs, $D(x)$ exprimée en %, à l'aide de l'équation II-12:

$$\Delta(x) = \left\{ \frac{a(x_0)}{a(x)} \right\}^2 \left\{ \frac{\lambda_c(x)}{\lambda_c(x_0)} \right\}^2 \Delta(x_0) \quad (\text{II-12})$$

- 1) Obtenir la distribution de dispersion par le matériau, $D_m(x, \lambda)$, exprimée en ps/(nm × km) en utilisant la distribution de différence d'indices relatifs $D(x)$ précédente.

Maintenant, on peut obtenir l'équation approximative de la dispersion par le matériau en fonction de la longueur d'onde et de la différence d'indices relatifs.

La dispersion par le matériau $D_m(\lambda)$ peut être estimée à l'aide des équations II-13 et II-14:

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (\text{II-13})$$

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^k \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - A_i^2} \quad (\text{II-14})$$

où A_i et B_i représentent les coefficients de Sellmeier et sont des fonctions de la teneur en dopant correspondant à la différence d'indices relatifs D indiquées dans les Références [II-1] et [II-2].

Calculer une fonction estimée $D_m(\lambda)$, de la dispersion par le matériau en fonction de la différence des indices relatifs D à l'aide des équations II-13 et II-14.

La dispersion par le matériau en fonction de la différence des indices relatifs s'obtient de la manière suivante:

$$D_m(\lambda) = m_1(\lambda) + h \cdot \Delta \cdot m_2(\lambda) \quad (\text{II-15})$$

où h est une constante.

Obtenir la distribution de la dispersion chromatique, $D(x, \lambda)$, exprimée en ps/nm × km indiquée dans l'équation suivante:

$$D(x, \lambda) = D_m(x, \lambda) + D_w(x, \lambda) \quad (\text{II-16})$$

II.4 Présentation des résultats

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

- c) Largeur de l'impulsion.
- d) Longueurs d'onde des essais.
- e) Distribution du diamètre de champ de mode, en mm.
- f) Distribution de la dispersion chromatique, en ps/nm × km.

II.5 Références

- [II-1] KOBAYASHI (S.) *et al.*: Refractive-index dispersion of doped fused silica, *IOOC 1977*, pp. 309-312, 1977.
- [II-2] FLEMING (J.W.): Material dispersion in lightguide glasses, *Electron. Lett.*, Vol. 14, No. 11, pp. 326-328, 1978.

Appendice III²

Exemple de modèle de matrice

On trouvera ci-après un exemple de matrice $m \times n = 38 \times 3$, telle que définie au § 5.4.4.3, pour les fibres G.652. S'il faut estimer l'affaiblissement spectral dans la gamme de 1240 nm à 1600 nm (par échelons de 10 nm) en utilisant des longueurs d'onde prédictives de 1310 nm, 1380 nm et 1550 nm, un exemple d'éléments de matrice qui s'est révélé applicable³ pour certaines fibres G.652 est donné ci-après:

Longueur d'onde de sortie (µm)	Coefficients de prédiction		
	1310 nm	1380 nm	1550 nm
1,23	1,46027	-0,04235	-0,20771
1,24	1,35288	-0,01493	-0,13289
1,25	1,31704	-0,00412	-0,14768
1,26	1,26613	-0,00997	-0,13715
1,27	1,20167	-0,00843	-0,10635
1,28	1,14970	-0,01281	-0,06363
1,29	1,11290	-0,01059	-0,06245
1,30	1,03600	-0,00711	0,00711
1,31	0,96276	0,00342	0,05412
1,32	0,90437	0,01435	0,08572
1,33	0,86168	0,02098	0,11776
1,34	0,83194	0,05500	0,05849
1,35	0,73415	0,08336	0,14196
1,36	0,83266	0,11032	-0,10694

² L'Appendice III a été simplement transféré dans cette Recommandation. Il a déjà été approuvé en tant qu'Amendement 1 et NE fait PAS l'objet de la procédure AAP.

³ HANSON (T.A.): Spectral Attenuation Modelling with Matrix Models, *Conference Digest NPL Optical Fibre Measurement Conference (OFMC'91)*, pp. 8-11, York, Royaume-Uni, 1991.

Longueur d'onde de sortie (μm)	Coefficients de prédiction		
	1310 nm	1380 nm	1550 nm
1,37	0,69137	0,22596	-0,05961
1,38	0,01006	0,99798	-0,01126
1,39	-0,25502	0,94764	0,48887
1,40	0,00227	0,58463	0,51813
1,41	0,25780	0,33834	0,40811
1,42	0,29085	0,20419	0,49620
1,43	0,29329	0,13569	0,54995
1,44	0,33133	0,09266	0,51936
1,45	0,31608	0,06343	0,55905
1,46	0,24183	0,04483	0,68361
1,47	0,29207	0,03019	0,59222
1,48	0,19214	0,02196	0,75669
1,49	0,18650	0,01132	0,76122
1,50	0,21242	0,00541	0,70722
1,51	0,16884	0,00648	0,75347
1,52	0,11484	-0,00091	0,84972
1,53	0,09334	0,00419	0,85304
1,54	0,07231	-0,00021	0,88512
1,55	0,03111	-0,00115	0,94957
1,56	0,07054	-0,00321	0,87414
1,57	-0,03723	-0,01127	1,08140
1,58	-0,02543	0,00556	1,01041
1,59	-0,01370	0,00457	0,99389
1,60	-0,06916	-0,00107	1,11623

BIBLIOGRAPHIE

- [PRESS] PRESS (William H.): Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, *Cambridge University Press*, seconde édition (1993).

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

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