



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.654

(06/2002)

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

Caractéristiques des supports de transmission – Câbles à
fibres optiques

**Caractéristiques des câbles et fibres optiques
monomodes à longueur d'onde de coupure
décalée**

Recommandation UIT-T G.654

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 RADIOTÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
EQUIPEMENTS DE TEST	G.500–G.599
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.600–G.699
Généralités	G.600–G.609
Paires symétriques en câble	G.610–G.619
Câbles terrestres à paires coaxiales	G.620–G.629
Câbles sous-marins	G.630–G.649
Câbles à fibres optiques	G.650–G.659
Caractéristiques des composants et sous-systèmes optiques	G.660–G.699
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999
QUALITÉ DE SERVICE ET DE TRANSMISSION	G.1000–G.1999
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.6000–G.6999
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.7000–G.7999
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.8000–G.8999

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

Recommandation UIT-T G.654

Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée

Résumé

La présente Recommandation décrit les attributs de transmission pour une fibre optique monomode et un câble à fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée. Les définitions et les méthodes de mesure figurent dans une Rec. UIT-T G.650 distincte. Des tableaux de valeurs recommandées pour les différentes catégories de ce type de fibres sont fournis afin de faciliter la référence en fonction des types de systèmes pris en charge. Les catégories décrites dans les tableaux peuvent différer en fonction d'aspects technologiques particuliers ou de l'application visée. Des plages permises sont recommandées pour les attributs des fibres et des câbles. L'Appendice I contient des informations sur les attributs de liaison et sur la conception de systèmes.

Historique

- 1988 La Recommandation UIT-T G.654 *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes avec affaiblissement réduit au minimum à la longueur d'onde de 1550 nm* a été établie par la Commission d'études 15 (1985-1988) de l'UIT-T.
- 2000 La Recommandation UIT-T G.654 a été révisée par la Commission d'études 15 (1997-2000) de l'UIT-T et a été approuvée en tant que 4^e édition par l'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (Montréal, 27 septembre-6 octobre 2000). Cette révision a consisté à modifier la structure de la Recommandation conformément à d'autres Recommandations relatives aux fibres telles que Recommandations UIT-T G.652, G.653 ou G.655.
- 2002 La Recommandation UIT-T G.654 a été révisée par la Commission d'études 15 (2001-2004) de l'UIT-T et a été approuvée en tant que 5^e édition, dans le cadre de la procédure AAP du 29 juin 2002. Cette révision, intitulée G.654.B, a consisté à ajouter une nouvelle catégorie de fibre, les attributs diamètre du champ de mode et coefficient de dispersion chromatique étant modifiés. Conformément à l'accord sur les bandes spectrales, la description de la limite supérieure de la bande L est passée de 16xx nm à 1625 nm. Les termes sous-catégorie de base et sous-catégorie ont été remplacés respectivement par catégorie de base et catégorie.

Source

La Recommandation G.654 de l'UIT-T, révisée par la Commission d'études 15 (2001-2004) de l'UIT-T, a été approuvée le 29 juin 2002 selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

NOTE

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

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

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

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

© UIT 2002

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

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application	1
2	Références.....	1
	2.1 Références normatives.....	1
	2.2 Références informatives	2
3	Termes et définitions	2
4	Abréviations.....	2
5	Attributs de fibre.....	2
	5.1 Diamètre du champ de mode.....	3
	5.2 Diamètre de gaine.....	3
	5.3 Erreur de concentricité du cœur	3
	5.4 Non-circularité.....	3
	5.4.1 Non-circularité du champ de mode	3
	5.4.2 Non-circularité de la gaine	3
	5.5 Longueur d'onde de coupure	3
	5.6 Perte par macrocourbure.....	4
	5.7 Propriétés des matériaux des fibres	5
	5.7.1 Matériaux composant les fibres.....	5
	5.7.2 Matériaux protecteurs.....	5
	5.7.3 Seuil de déformation permanente.....	5
	5.8 Profil de l'indice de réfraction	5
	5.9 Uniformité longitudinale de la dispersion chromatique	5
	5.10 Coefficient de dispersion chromatique.....	5
	5.11 Exemples de lignes directrices relatives à la conception des fibres G.654.A	6
6	Attributs de câble.....	6
	6.1 Coefficient d'atténuation	6
	6.2 Coefficient de dispersion modale de polarisation	6
7	Tableaux des valeurs recommandées.....	7
Appendice I – Informations pour les attributs de liaison et la conception de systèmes		9
	I.1 Affaiblissement.....	10
	I.2 Dispersion chromatique.....	10
	I.3 Temps de propagation de groupe différentiel (DGD)	11
	I.4 Coefficient de non-linéarité.....	11
	I.5 Tableaux des valeurs types usuelles	11
Appendice II – Exemples de lignes directrices relatives à la conception de fibres G.654.A ..		12

	Page
Appendice III – Informations sur les statistiques de la dispersion modale de polarisation	15
III.1 Introduction	15
III.2 Collecte des données	17
III.3 Calcul de PMD_Q (Monte Carlo)	17
III.4 Calcul de DGD_{max} (Monte Carlo).....	18
Appendice IV – Bibliographie	18

Recommandation UIT-T G.654

Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée

1 Domaine d'application

La présente Recommandation décrit une fibre monomode ayant une longueur d'onde à dispersion nulle se situant au voisinage de 1300 nm, dont la longueur d'onde de coupure est décalée et dont l'affaiblissement est minimal à une longueur d'onde se situant au voisinage de 1550 nm; la fibre est optimisée pour la région des 1530-1625 nm.

Cette fibre à très faible affaiblissement et à longueur d'onde de coupure décalée (CSF, *cut-off shifted fibre*), se prête aux applications de la transmission numérique à longue distance telles que les systèmes de lignes terrestres à grande distance et les systèmes de câbles sous-marins utilisant des amplificateurs optiques. Ses caractéristiques géométriques, optiques (affaiblissement, longueur d'onde de coupure, dispersion chromatique et dispersion modale de polarisation, etc.), mécaniques et de transmission sont décrites ci-après.

Un certain nombre de dispositions sont prises pour prendre en charge la transmission à des longueurs d'onde plus élevées pouvant atteindre 1625 nm. Les paramètres géométriques, mécaniques et de transmission sont répartis ci-après selon trois catégories d'attributs:

- les attributs de fibre qui sont ceux qui sont conservés tout le long du câblage et de l'installation;
- les attributs de câble qui sont recommandés pour les câbles tels qu'ils sont livrés;
- les attributs de liaison qui sont caractéristiques des câbles concaténés, décrivant une méthode d'estimation des paramètres d'interface du système qui s'appuie sur des mesures, sur une modélisation ou sur d'autres considérations. L'Appendice I fournit un certain nombre de valeurs types d'attributs de liaison.

Les Tableaux 1 et 2 montrant les valeurs recommandées, sont fournis pour faciliter la référence. Ils indiquent les catégories de la fibre optique et du câble qui conviennent à des applications définies dans les Recommandations UIT-T G.691, G.692, G.957 et G.977.

Le sens des termes utilisés dans la présente Recommandation et les lignes directrices qu'il convient de suivre pour les mesures visant à vérifier les diverses caractéristiques sont indiqués dans les Recommandations UIT-T G.650.1 et G.650.2. Les caractéristiques de cette fibre, y compris la définition des paramètres qui s'appliquent, leurs méthodes de mesure et leurs valeurs appropriées seront précisées à mesure que les études et l'expérience progressent.

2 Références

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

2.1 Références normatives

- Recommandation UIT-T G.650.1 (2002), *Définitions et méthodes de test applicables aux attributs linéaires déterministes des fibres et câbles optiques monomodes*.

- Recommandation UIT-T G.650.2 (2002), *Définitions et méthodes de test applicables aux attributs statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes.*

2.2 Références informatives

Les Recommandations de l'UIT-T ci-après contiennent des dispositions qui, par la référence qui en est faite dans ce texte, constituent d'autres informations pertinentes.

- Recommandation UIT-T G.663 (2000), *Aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques.*
- Recommandation UIT-T G.691 (2000), *Interfaces optiques pour les systèmes STM-64, STM-256 et autres systèmes SDH monocanaux à amplificateurs optiques.*
- Recommandation UIT-T G.692 (1998), *Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques.*
- Recommandation UIT-T G.957 (1999), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone.*
- Recommandation UIT-T G.973 (1996), *Caractéristiques des systèmes en câbles sous-marins à fibres optiques sans répéteurs.*
- Recommandation UIT-T G.977 (2000), *Caractéristiques des systèmes de câbles optiques sous-marins à amplification optique.*

3 Termes et définitions

Les définitions données dans les Recommandations UIT-T G.650.1 et G.650.2 s'appliquent à la présente Recommandation.

Les valeurs doivent être arrondies au nombre de chiffres indiqué dans le tableau des valeurs recommandées, avant d'évaluer la conformité.

4 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

CSF	fibre à longueur d'onde de coupure décalée (<i>cut-off shifted fibre</i>)
DGD	temps de propagation de groupe différentiel (<i>differential group delay</i>)
DWDM	multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité (<i>dense wavelength division multiplexing</i>)
GPa	gigaPascal
MFD	diamètre de champ de mode (<i>mode field diameter</i>)
PMD	dispersion modale de polarisation (<i>polarization mode dispersion</i>)
PMD _Q	paramètre statistique pour liaisons PMD
RTM	méthode de test de référence (<i>reference test method</i>)
TBD	à déterminer (<i>to be determined</i>)
WDM	multiplexage par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplexing</i>)

5 Attributs de fibre

Seules sont recommandées dans le présent paragraphe les caractéristiques qui constituent un cadre minimal essentiel de conception en vue de la fabrication des fibres. Les tableaux du paragraphe 7

présentent des plages ou des limites de valeurs. Parmi celles-ci, la longueur d'onde de coupure de la fibre câblée et la dispersion modale de polarisation peuvent être sensiblement modifiées par la fabrication du câble ou par son installation. Toutefois, les caractéristiques recommandées s'appliquent de la même façon à une fibre isolée, à une fibre incorporée dans un câble enroulé sur un touret et à une fibre faisant partie d'un câble installé.

5.1 Diamètre du champ de mode

Une valeur nominale et une tolérance sur cette valeur nominale du diamètre du champ de mode (MFD, *mode field diameter*) doivent être indiquées à 1550 nm. La valeur nominale spécifiée pour le diamètre du champ de mode doit se situer dans la plage indiquée dans le paragraphe 7. La tolérance spécifiée ne doit pas dépasser la valeur indiquée dans le paragraphe 7. L'écart par rapport à la valeur nominale ne doit pas dépasser la tolérance spécifiée.

5.2 Diamètre de gaine

La valeur nominale recommandée pour le diamètre de gaine est de 125 μm .

Une tolérance est également spécifiée et elle ne doit pas dépasser la valeur indiquée dans le paragraphe 7. L'écart dans la gaine par rapport à la valeur nominale ne doit pas dépasser la tolérance spécifiée.

5.3 Erreur de concentricité du cœur

L'erreur de concentricité du cœur ne doit pas dépasser la valeur spécifiée dans le paragraphe 7.

5.4 Non-circularité

5.4.1 Non-circularité du champ de mode

Dans la pratique, la non-circularité du champ de mode des fibres ayant des champs de mode nominalement circulaires est suffisamment faible pour ne pas affecter la propagation ni le raccordement. Il n'est donc pas jugé utile de recommander une valeur particulière pour la non-circularité du champ de mode. Il n'est normalement pas nécessaire de mesurer la non-circularité du champ de mode lors des tests de recette.

5.4.2 Non-circularité de la gaine

Il convient que la non-circularité de la gaine ne doit pas dépasser la valeur indiquée dans le paragraphe 7.

5.5 Longueur d'onde de coupure

On distingue trois types utiles de longueur d'onde de coupure:

- a) la longueur d'onde de coupure λ_{cc} ;
- b) la longueur d'onde de coupure de fibre λ_c ;
- c) la longueur d'onde de coupure de jarretière λ_{cj} .

NOTE 1 – Pour certaines applications spécifiques de câbles sous-marins, d'autres valeurs de longueur d'onde de coupure peuvent être nécessaires.

La corrélation des valeurs mesurées de λ_c , de λ_{cc} et de λ_{cj} dépend de la fibre considérée, du type de câble et des conditions de mesure. En général on a $\lambda_{cc} < \lambda_{cj} < \lambda_c$, mais il est difficile d'établir une relation quantitative.

Même sur la plus courte longueur de câble entre deux raccords et pour la longueur d'onde minimale de fonctionnement, il est indispensable de conserver une transmission monomode. On dispose de deux moyens pour obtenir ce mode de fonctionnement:

- 1) recommander que λ_c soit inférieure à 1600 nm: si l'on fixe une limite inférieure, il convient que λ_c soit supérieure à 1350 nm;
- 2) recommander une valeur maximale de λ_{cc} de 1530 nm.

NOTE 2 – Les valeurs ci-dessus sont garanties d'un fonctionnement monomode au voisinage de 1550 nm. En cas de multiplexage WDM, nécessitant un fonctionnement à une longueur d'onde de (1550 nm-x), ces valeurs doivent être abaissées de x nm.

Il n'est pas nécessaire d'invoquer ces deux recommandations. Etant donné que la spécification de λ_{cc} est une façon plus directe de garantir le fonctionnement monomode du câble, elle constitue la solution préférable. Toutefois, lorsque les circonstances ne permettent pas immédiatement la spécification de λ_{cc} (par exemple en cas d'utilisation de câbles monofibres tels que des jarretières, ou en cas d'installation des câbles dans des conditions qui diffèrent sensiblement de celles de la méthode de mesure de référence de λ_{cc}), il est préférable de spécifier λ_c .

Si l'on spécifie λ_{cc} (point 2 ci-dessus), il faut bien savoir que λ_c peut être supérieur à 1600 nm.

Si l'on spécifie λ_c (point 1 ci-dessus), il n'est pas nécessaire de spécifier λ_{cc} .

Si l'on choisit de spécifier λ_{cc} , la valeur de λ_c peut être plus grande que la longueur d'onde de fonctionnement minimale en comptant que les effets de la fabrication et de l'installation du câble fourniront des valeurs de λ_{cc} inférieures à la longueur d'onde minimale de fonctionnement pour la longueur de câble la plus courte entre deux épissures.

Si l'on spécifie λ_{cc} , il est courant de faire un test d'homologation pour s'assurer que λ_{cc} est conforme en ce qui concerne la valeur en question.

La longueur d'onde de coupure du câble, λ_{cc} , ne doit pas dépasser le maximum spécifié dans le paragraphe 7.

5.6 Perte par macrocourbure

La perte par macrocourbure varie avec la longueur d'onde, le rayon de courbure et le nombre de tours autour d'un mandrin d'un rayon spécifié. La perte par macrocourbure ne doit pas dépasser le maximum indiqué dans le paragraphe 7 pour la ou les longueurs d'onde et le rayon de courbure spécifiés ainsi que pour le nombre de tours spécifié.

Si la fibre est à utiliser à une longueur d'onde supérieure à 1550 nm, la perte maximale à la longueur d'onde prévue la plus élevée pour une utilisation prévue (qui serait peut être déterminée à l'avance par une mesure à 1550 nm, au moyen d'une modélisation de l'affaiblissement spectral ou d'une base de données statistique pour ce type de fibre particulier. Une autre possibilité consiste à faire un test à une longueur d'onde plus grande.

NOTE 1 – Un test d'homologation peut être suffisant pour vérifier que cette condition est satisfaite.

NOTE 2 – Le nombre de tours recommandé correspond au nombre approximatif de tours déployés dans toutes les chemises d'épissures d'une distance caractéristique de répéteurs. Le rayon recommandé est équivalent au rayon de courbure minimal généralement admis dans la pratique pour l'installation à long terme de fibres dans les réseaux réels, afin d'éviter les pannes dues aux contraintes de fatigue statique.

NOTE 3 – Si, pour des raisons pratiques, on décide d'effectuer l'essai avec un nombre de tours inférieur au nombre de tours recommandé, il est conseillé de ne pas descendre en dessous de 40 tours et d'utiliser une valeur d'affaiblissement plus faible, proportionnelle au nombre de spires.

NOTE 4 – Si l'on envisage d'utiliser dans les coffrets d'épissures ou en d'autres endroits du système des rayons de courbure inférieurs à la valeur recommandée (par exemple, $R = 30$ mm), il est conseillé d'appliquer la même valeur d'affaiblissement maximal au même nombre de tours de fibre enroulée suivant ce rayon plus petit.

NOTE 5 – La recommandation relative à la perte par macrocourbure concerne l'installation de fibres dans des réseaux réels à fibres monomodes. L'influence du retordage des fibres monomodes câblées sur l'affaiblissement est mentionnée dans les spécifications relatives à l'affaiblissement des fibres câblées.

NOTE 6 – Au cas où des essais de routine seraient nécessaires, une boucle de diamètre inférieure comprenant un ou plusieurs tours pourra être utilisée au lieu de l'essai recommandé, afin d'augmenter la précision de mesure des pertes de courbure à 1550 nm et d'en faciliter la mesure. Dans ce cas, il convient de choisir le diamètre de la boucle, le nombre de spires et l'affaiblissement de courbure maximal admis de manière à ce que les résultats soient corrélés avec la valeur recommandée d'affaiblissement du test recommandé et du test autorisé.

5.7 Propriétés des matériaux des fibres

5.7.1 Matériaux composant les fibres

On indique les matériaux composant les fibres.

NOTE – Des précautions sont à prendre lorsque l'on raccorde par fusion des fibres faites de matériaux différents. Les premiers résultats indiquent que le raccordement de fibres différentes de silice de haute qualité permet d'obtenir des valeurs satisfaisantes en matière de perte et de solidité des épissures.

5.7.2 Matériaux protecteurs

Les propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés pour la couche primaire de la fibre et la meilleure technique à employer pour retirer cette couche le cas échéant, doivent être indiquées. Dans le cas de fibres à enveloppe unique, des indications analogues doivent être fournies.

5.7.3 Seuil de déformation permanente

Le seuil de déformation permanente σ_p ne doit pas être inférieur au minimum spécifié dans le paragraphe 7.

NOTE – Les définitions des paramètres mécaniques figurent aux § 3.2/G650.1 et 5.6/G.650.1.

5.8 Profil de l'indice de réfraction

Il n'est généralement pas nécessaire de connaître le profil de l'indice de réfraction.

5.9 Uniformité longitudinale de la dispersion chromatique

A l'étude.

NOTE – A une longueur d'onde donnée, la valeur absolue locale du coefficient de dispersion chromatique peut s'éloigner de la valeur mesurée sur une longueur importante. Si cette valeur décroît de façon importante pour atteindre une valeur faible à une longueur d'onde proche d'une longueur d'onde de fonctionnement dans un système de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM), le mélange de quatre ondes peut entraîner la propagation de la puissance sur d'autres longueurs d'onde, y compris, mais sans s'y limiter, d'autres longueurs d'onde de fonctionnement. L'amplitude de la puissance de mélange de quatre ondes est une fonction de la valeur absolue du coefficient de dispersion chromatique, de la pente de dispersion chromatique, des longueurs d'onde de fonctionnement, de la puissance optique et de la distance sur laquelle se produit le mélange de quatre ondes.

Pour les opérations de multiplexage par répartition en longueur d'onde à haute densité (DWDM, *dense wavelength division multiplexing*) dans la région de 1550 nm, la dispersion chromatique des fibres UIT-T G.654 est suffisamment importante pour éviter le mélange de quatre ondes. L'uniformité de la dispersion chromatique ne constitue donc pas un problème fonctionnel.

5.10 Coefficient de dispersion chromatique

Le temps de propagation de groupe mesuré par unité de longueur de fibre, en fonction de la longueur d'onde, sera ajusté par l'expression quadratique (se reporter au § 5.5.1.3.3/G.650.1):

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

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

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

Dans cette relation, S_{1550} représente la pente (uniforme) de la dispersion chromatique à 1550 nm, c'est-à-dire aussi la valeur de la pente de la dispersion $S_{1550}(\lambda) = dD/d\lambda$ pour $\lambda = 1550$ nm. De plus, D_{1550} désigne les valeurs de dispersion chromatique à la même longueur d'onde $\lambda = 1550$ nm.

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

NOTE 2 – A titre de variante, le coefficient de dispersion chromatique peut être mesuré directement, par exemple par une méthode de décalage de phase différentielle. Dans ce cas, on doit ajuster le coefficient de dispersion par une droite $\tau(\lambda)$ pour déterminer S_{1550} et D_{1550} .

5.11 Exemples de lignes directrices relatives à la conception des fibres G.654.A

L'Appendice II fournit un exemple de lignes directrices relatives à la conception des fibres pour les fibres à longueur d'onde de coupure décalée (CSF, *cut-off shifted fibre*) et à affaiblissement minimisé provenant de KDD, Japon.

6 Attributs de câble

Les caractéristiques géométriques et optiques des fibres indiquées au paragraphe 5 n'étant que peu affectées par le processus de câblage, on trouvera dans le présent paragraphe des recommandations portant essentiellement sur les caractéristiques de transmission des portions de câbles à la longueur de livraison.

Les conditions ambiantes et les conditions de mesure, très importantes, sont décrites dans les directives sur les méthodes de mesure.

6.1 Coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation est spécifié avec une valeur maximale à une ou plusieurs longueurs d'onde dans la région comprise entre 1530 nm et 1625 nm. Les valeurs de coefficient d'atténuation des câbles à fibres optiques ne doivent pas dépasser les valeurs indiquées dans le paragraphe 7.

NOTE – Les valeurs les plus faibles dépendent du processus de fabrication, de la composition et de la conception des fibres et de la conception des câbles. Des valeurs comprises entre 0,15 dB/km et 0,19 dB/km dans la région de 1550 nm ont été obtenues comme le montre l'Appendice II.

6.2 Coefficient de dispersion modale de polarisation

Les tableaux ne comprennent pas tous des prescriptions relatives à la dispersion modale de polarisation (PMD). S'il y a lieu, la dispersion modale de polarisation de fibre câblée doit être spécifiée sur une base statistique et non sur une base de fibre individuelle. Les prescriptions ne s'appliquent qu'à l'aspect de la liaison calculée à partir d'informations sur le câble. La métrique de la spécification statistique est fournie ci-après. Des méthodes de calcul sont données dans la Publication 61282-3 de la CEI et sont récapitulées dans l'Appendice III.

Le constructeur doit fournir une valeur de conception de la liaison PMD, PMD_Q , qui sert de borne statistique supérieure pour le coefficient de dispersion modale de polarisation relatif aux câbles à fibres optiques concaténés dans une éventuelle liaison définie entre des sections de câbles M. La borne supérieure est définie en termes de niveau de faible probabilité, Q, qui représente la probabilité qu'une valeur de coefficient de dispersion modale de polarisation concaténé dépasse PMD_Q . Pour les valeurs de M et de Q indiquées dans le paragraphe 7, la valeur de PMD_Q ne doit pas dépasser le coefficient de dispersion modale de polarisation maximal qui y est spécifié.

Des mesures portant sur une fibre non câblée peuvent servir à produire des statistiques pour les fibres câblées lorsque la conception et les procédés sont stables et qu'il existe des relations connues entre les coefficients de dispersion modale de polarisation des fibres non câblées et ceux des fibres câblées. Si la preuve d'une telle relation a été apportée, l'exploitant de câbles peut facultativement spécifier une valeur maximale de dispersion modale de polarisation portant sur les fibres non câblées.

On peut interpréter les limites imposées à la distribution des valeurs des coefficients de dispersion modale de polarisation comme étant presque équivalentes à celles de l'écart statistique du temps de propagation de groupe différentiel (DGD, *differential group delay*), qui varie aléatoirement en fonction du temps et de la longueur d'onde. Lorsqu'une distribution des coefficients de dispersion modale de polarisation est spécifiée pour les câbles à fibres optiques, on peut fixer des limites équivalentes sur la variation du temps de propagation de groupe différentiel. La métrique et les valeurs des limites de la distribution du temps de propagation de groupe différentiel pour les liaisons sont fournies dans l'Appendice I.

7 Tableaux des valeurs recommandées

Les Tableaux 1 et 2 récapitulent les valeurs recommandées pour un nombre d'espèces de fibres qui satisfont aux objectifs de la présente Recommandation.

La catégorie G.654.A est la catégorie de base et la catégorie G.654.B est la catégorie pour les fibres optiques monomodes et les câbles à fibres optiques monomodes à coupure décalée. Les deux tableaux contiennent les attributs et valeurs recommandés qui sont nécessaires à la prise en charge d'applications telles que celles qui sont recommandées dans les Recommandations UIT-T G.691, G.692, G.957 et G.977, dans la région de longueur d'onde de 1550 nm.

Tableau 1/G.654 – G.654A

<p><i>Ce tableau correspond à la catégorie de base pour un câble à fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée. Cette catégorie convient au système indiqué dans les Recommandations UIT-T G.691, G.692, G.957 et G.977, dans la région de longueur d'onde de 1550 nm.</i></p>		
Attributs de fibre		
Attribut	Détail	Valeur
Diamètre du champ de mode	Longueur d'onde	1550 nm
	Plage de valeurs nominales	9,5 µm à 10,5 µm
	Tolérance	±0,7 µm
Diamètre de gaine	Nominal	125 µm
	Tolérance	±1 µm
Erreur de concentricité du cœur	Maximum	0,8 µm
Non-circularité de gaine	Maximum	2,0%
Longueur d'onde de coupure du câble	Maximum	1530 nm
Perte par macrocourbure	Rayon	37,5 mm
	Nombre de tours	100
	Maximum à 1550 nm	0,50 dB
Limite d'allongement	Minimum	0,69 GPa
Coefficient de dispersion chromatique	$D_{1550 \text{ max}}$	20 ps/nm·km
	$S_{1550 \text{ max}}$	0,070 ps/nm ² ·km
Coefficient de dispersion modale de polarisation pour une fibre non câblée	Maximum	ps/√km (Note)
Attributs de câble		
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,22 dB/km
Coefficient de dispersion modale de polarisation	M	20 câbles
	Q	0,01%
	Maximum de dispersion modale de polarisation PMD _Q	0,5 ps/√km
<p>NOTE – Les exploitants de câbles peuvent spécifier un coefficient de dispersion modale de polarisation maximal facultatif afin de prendre en charge la prescription primaire sur PMD_Q du câble si la preuve en a été apportée pour une construction particulière de câble.</p>		

Tableau 2/G.654 – G.654B

<p><i>Cette catégorie convient au système décrit dans les Recommandations UIT-T G.691, G.692, G.957 et G.977, dans la région de longueur d'onde de 1550 nm. Elle peut s'appliquer à des systèmes de transmission WDM de plus grande capacité et utilisables sur de plus longues distances (par exemple, les systèmes sous-marins sans répéteur dotés d'amplificateurs optiques à télépompage, décrits dans la Rec. UIT-T G.973, ou les systèmes sous-marins dotés d'amplificateurs optiques, décrits dans la Rec. UIT-T G.977).</i></p>		
Attributs de fibre		
Attribut	Détail	Valeur
Diamètre du champ de mode	Longueur d'onde	1550 nm
	Plage de valeurs nominales	9,3 µm à 13,0 µm
	Tolérance	±1,0 µm
Diamètre de gaine	Nominal	125 µm
	Tolérance	±1 µm
Erreur de concentricité du cœur	Maximum	0,8 µm
Non-circularité de gaine	Maximum	2,0%
Longueur d'onde de coupure du câble	Maximum	1530 nm
Perte par macrocourbure	Rayon	37,5 mm
	Nombre de tours	100
	Maximum à 1550 nm	0,50 dB
Limite d'allongement	Minimum	0,69 GPa
Coefficient de dispersion chromatique	$D_{1550 \text{ max}}$	22 ps/nm·km
	$S_{1550 \text{ max}}$	0,070 ps/nm ² ·km
Coefficient de dispersion modale de polarisation pour une fibre non câblée	Maximum	ps/√km (Note)
Attributs de câble		
Coefficient d'atténuation	Maximum à 1550 nm	0,22 dB/km
Coefficient de dispersion modale de polarisation	M	20 câbles
	Q	0,01%
	Maximum de dispersion modale de polarisation PMD _Q	0,5 ps/√km
<p>NOTE – Les exploitants de câbles peuvent spécifier un coefficient de dispersion modale de polarisation maximal facultatif afin de prendre en charge la prescription primaire sur PMD_Q du câble si la preuve en a été apportée pour une construction particulière de câble.</p>		

Appendice I

Informations pour les attributs de liaison et la conception de systèmes

Une liaison concaténée comprend généralement un certain nombre de tronçons à longueur de livraison épissurés d'un câble à fibres optiques. Les prescriptions portant sur les tronçons à longueur de livraison sont données dans les paragraphes 5 et 6. Les caractéristiques de transmission des

liaisons concaténées doivent tenir compte non seulement des caractéristiques de fonctionnement des tronçons de câble individuels mais aussi des statistiques de la concaténation.

Les caractéristiques de transmission des câbles à fibres optiques de longueur d'usine auront une certaine distribution de probabilité dont il est souvent nécessaire de tenir compte si tant est que les conceptions les plus économiques doivent être retenues. Les différents paragraphes du présent appendice doivent être lus en gardant à l'esprit la nature statistique des différents paramètres.

Les attributs de liaison sont affectés par des facteurs autres que les câbles à fibres optiques, tels que les épissures, les connecteurs et l'installation. Ces facteurs ne peuvent pas être spécifiés dans la présente Recommandation. Pour l'estimation de valeurs d'attributs de liaison, les tableaux ci-après fournissent des valeurs types pour la liaison à fibres optiques. Les méthodes d'estimation des paramètres de fibre nécessaires à la conception de systèmes sont fournies sur la base de mesures, de modélisations ou d'autres éléments.

I.1 Affaiblissement

L'affaiblissement A d'une liaison est donné par:

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y \quad (\text{I-1})$$

où:

α est le coefficient d'atténuation type des câbles à fibres optiques dans une liaison;

α_s est la perte moyenne d'épissure;

x est le nombre d'épissures dans une liaison;

α_c est la perte moyenne des connecteurs de ligne;

y est le nombre de connecteurs de ligne dans une liaison (s'il y a lieu);

L est la longueur de la liaison.

Il convient d'attribuer une marge appropriée pour de futures modifications apportées à des configurations de câbles (épissures supplémentaires, longueurs de câble additionnelles, effets de vieillissement, variations de température, etc.). La formule (I-1) n'inclut pas de pertes dues aux connecteurs des équipements. Les valeurs types fournies au § I.5 se rapportent au coefficient d'atténuation d'une liaison par fibres optiques. Il convient que le bilan d'affaiblissement utilisé pour la conception d'un système réel tienne compte des variations statistiques de ces paramètres.

I.2 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique, en ps/nm, peut être calculée à partir des coefficients de dispersion chromatique des tronçons à longueur de livraison, en supposant une relation linéaire avec la longueur, et en tenant dûment compte des signes des coefficients (se reporter au § 5.10).

Lorsque ces fibres sont utilisées pour la transmission dans la région de 1550 nm, on emploie un certain nombre de formes de compensation de la dispersion chromatique. En l'occurrence, la dispersion chromatique moyenne de la liaison est utilisée pour la conception. La dispersion mesurée dans la fenêtre de 1550 nm peut y être caractérisée par une relation linéaire avec la longueur d'onde. Cette relation est décrite en termes des classiques coefficients de dispersion chromatique et de pente de dispersion à 1550 nm.

On trouvera au § I.1 des valeurs types pour le coefficient de dispersion chromatique, D_{1550} , et pour le coefficient de pente de dispersion chromatique, S_{1550} , à 1550 nm. Ces valeurs, avec la longueur de liaison, L_{Link} , peuvent être utilisées pour calculer la dispersion chromatique type à utiliser dans la conception de la liaison optique.

$$D_{Link}(\lambda) = L_{Link} [D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad (\text{ps/nm}) \quad (\text{I-2})$$

I.3 Temps de propagation de groupe différentiel (DGD)

Le temps de propagation de groupe différentiel est la différence des instants d'arrivée des deux modes de polarisation, à une longueur d'onde et un instant particulier. Pour une liaison ayant un coefficient de dispersion modale de polarisation spécifique, le temps de propagation de groupe différentiel de cette liaison varie aléatoirement avec le temps et la longueur d'onde comme une distribution de Maxwell qui ne contient qu'un seul paramètre, celui-ci étant le produit du coefficient de dispersion modale de polarisation de la liaison par la racine carrée de la longueur de la liaison. La dégradation du système due à une dispersion modale de polarisation à un instant et une longueur d'onde spécifique dépend du temps de propagation de groupe différentiel en cet instant et à cette longueur d'onde. Ainsi, des moyens permettant d'établir des limites utiles sur la distribution de temps de propagation de groupe différentiel, liée à la distribution du coefficient de dispersion modale de polarisation des câbles à fibres optiques et à sa limite, sont développés et documentés dans la Publication 61282-3 de la CEI et récapitulés dans l'Appendice IV. La métrique des limitations de la distribution de temps de propagation de groupe différentiel suit:

NOTE – La détermination de la contribution de composants autres que le câble à fibres optiques ne s'inscrit pas dans le cadre de la présente Recommandation, mais elle est exposée dans la Publication 61282-3 de la CEI.

Longueur de liaison de référence, $L_{Réf}$: longueur maximale de liaison à laquelle s'appliquent le temps de propagation de groupe différentiel maximal et la probabilité maximale. Pour des longueurs de liaison supérieures, multiplier le temps de propagation de groupe différentiel maximal par la racine carrée du rapport entre la longueur effective et la longueur de référence.

Longueur maximale de câble type, L_{Cab} : les valeurs maximales sont obtenues lorsque les longueurs des câbles individuels types de la concaténation ou celles des câbles mesurées pour la détermination de la distribution du coefficient de dispersion modale de polarisation sont inférieures à cette valeur.

Temps de propagation de groupe différentiel maximal, DGD_{max} : valeur du temps de propagation de groupe différentiel que l'on peut utiliser dans la conception d'un système optique.

Probabilité maximale, P_F : probabilité qu'une valeur effective de temps de propagation de groupe différentiel soit supérieure à DGD_{max} .

Le § I.5 contient des valeurs pour cette métrique, qui conviennent aux câbles à fibres optiques respectant les limites statistiques recommandées pour la dispersion modale de polarisation indiquées dans les Tableaux 1 et 2.

I.4 Coefficient de non-linéarité

L'effet de la dispersion chromatique interagit avec le coefficient de non-linéarité, n_2/A_{eff} , pour ce qui concerne les dégradations du système qui sont induites par des effets optiques non linéaires (se reporter à la Rec. UIT-T G.663). Les valeurs types varient avec l'implémentation. Les méthodes de test pour le coefficient de non-linéarité demeurent à l'étude.

I.5 Tableaux des valeurs types usuelles

Les valeurs indiquées dans le Tableau I.1 sont représentatives des liaisons par fibres optiques concaténées conformément aux § I.1, I.2 et I.3.

Tableau I.1/G.654 – Valeurs représentatives de liaisons par fibres optiques concaténées

Coefficient d'atténuation	Longueur d'onde	Valeur type (Note 2)
	1 550 nm	0,25 dB/km
	1 625 nm	TBD
Paramètre de dispersion chromatique	D_{1550}	TBD
	S_{1550}	TBD
Temps de propagation de groupe différentiel (DGD) (Note 1)	Longueur de liaison de référence	400 km
	Longueur type maximale de section de câble	10 km
	Temps de propagation de groupe différentiel maximal	25 ps
	Probabilité maximale	$6,5 \times 10^{-8}$
NOTE 1 – Ces valeurs ne sont appropriées que lorsque les valeurs de PMD_Q figurant dans les Tableaux 1 et 2 sont spécifiées.		
NOTE 2 – La valeur type des liaisons correspond au coefficient d'atténuation de liaison utilisé dans les Recommandations UIT-T G.957 et G.691.		

Appendice II

Exemples de lignes directrices relatives à la conception de fibres G.654.A

Dans la conception de fibres optiques, le diamètre du champ de mode (MFD) $2W$ et la longueur d'onde de coupure équivalente λ_{ce} sont des paramètres très importants. La Figure II.1¹ illustre les courbes de perte par équicourbure α_b , de dispersion D et d'indice de réfraction Δ pour la fibre de gaine correspondante, à 1,55 μm de longueur d'onde, en fonction de $2W$ et de λ_{ce} . Dans cette figure, la surface du parallélogramme correspond à une fibre optique monomode optimisée à 1,31 μm comme le recommande la fenêtre pour fibres ($2W_{1,55\mu\text{m}} = 10 \pm 1,0 \mu\text{m}$, $1,10 \mu\text{m} < \lambda_{ce} < 1,28 \mu\text{m}$) de la Recommandation UIT-T G.652. On constate, à partir de la Figure II.1, que la fibre optique monomode optimisée à 1,31 μm (SMF, *single-mode optical fibre* UIT-T G.652) utilisant une conception à gaine déprimée est significativement affectée par la perte par macrocourbure dans la région de longueur d'onde de 1,55 μm . L'affaiblissement du câblage dû à la microcourbure peut être considéré comme l'équivalent de la perte par macrocourbure au rayon d'équicourbure R_e .

L'affaiblissement en excès dû au processus de câblage était d'environ 0,015 dB/km à la longueur d'onde de 1,55 μm pour la fibre optique monomode ($V \cong 1,7$) et la valeur correspond à un rayon de courbure $R_e = 45 \text{ mm}$. En l'occurrence, l'affaiblissement par microcourbure théorique a été calculé par un rayon de macrocourbure équivalent $R_e = 45 \text{ mm}$.

Afin de conserver la caractéristique de faible affaiblissement des fibres optiques, on réduit à un minimum l'affaiblissement supplémentaire dû au processus de câblage. On constate, à partir de la Figure II.1, que pour obtenir une perte par câblage inférieure à 0,005 dB/km, la limite supérieure du diamètre du champ de mode (MFD) $2W$ et la limite inférieure de la longueur d'onde de coupure

¹ NAMIHIRA (Y.), HORIUCHI (Y.) et WAKABAYASHI (H.): Optimum fibre parameters of low-loss single-mode optical fibres for use in 1.55 μm wavelength regions, *Electronics Letters*, Vol. 23, N° 18, p. 963-964, 1987.

équivalente λ_{ce} sont respectivement d'environ 11,5 μm et 1,35 μm et que les paramètres optimaux souhaitables pour la fibre sont indiqués par la zone hachurée de cette Figure II.1. L'augmentation de la longueur d'onde de coupure équivalente λ_{ce} peut améliorer la résistance à la microcourbure à 1,55 μm sans augmenter l'affaiblissement intrinsèque de la fibre; toutefois, il convient de déterminer la limite supérieure de la longueur d'onde de coupure équivalente λ_{ce} (jusqu'à 1,60 μm) en considérant un fonctionnement monomodal du câble plus long. A titre d'exemple, il est bien connu que la différence de longueur d'onde de coupure équivalente entre une fibre revêtue par UV (2 m) et une fibre câblée de grande longueur (supérieure à 20 km) est d'environ 70 nm.

Les points (•) de la Figure II.1 représentent des mesures sur des échantillons de fibres optiques monomodes à longueur de coupe décalée et à affaiblissement minimisé à 1,55 μm (CSF), leurs paramètres étant indiqués dans le Tableau II.1. Dans ce tableau, les fibres 1 et 2 représentent des fibres au cœur en silice pure et à la gaine déprimée de F alors que les fibres 3 et 4 désignent une fibre au cœur légèrement dopé au Ge et au F et à la gaine déprimée de F, la fibre 5 étant une fibre classique au cœur dopé au Ge. La fibre 6 est également une classique fibre optique monomode (SMF, *single mode fibre*) standard à 1,31 μm . On constate, à partir du Tableau II.1, que l'atténuation et la dispersion chromatique de la fibre d'essai sont respectivement comprises dans la plage de 0,176 à 0,197 dB/km et dans la plage de 17,7 à 19,3 ps/nm-km. Les coefficients de diffusion de Rayleigh, A_0 et l'affaiblissement indépendant de la longueur d'onde, B_0 , de ces fibres optiques sont respectivement situés dans la plage d'environ 0,83 à 0,97 dB/km- μm^4 et dans la plage de 0,011 à 0,015 dB/km.

Les résultats expérimentaux de la perte par macrocourbure des fibres à longueur de coupe décalée et à affaiblissement minimisé à 1,55 μm (CSF, fibres 1 à 5) et ceux de la fibre optimisée à 1,31 μm (SMF, fibre 6) sont indiqués dans la Figure II.2. On constate, à partir de cette figure, qu'à la longueur d'onde de 1,55 μm les pertes par macrocourbure des fibres à longueur de coupe décalée (CSF) et à affaiblissement minimisé à 1,55 μm sont inférieures à celles d'une fibre optique monomode classique (UIT-T G.652) à une longueur d'onde de fonctionnement du système de 1,31 μm .

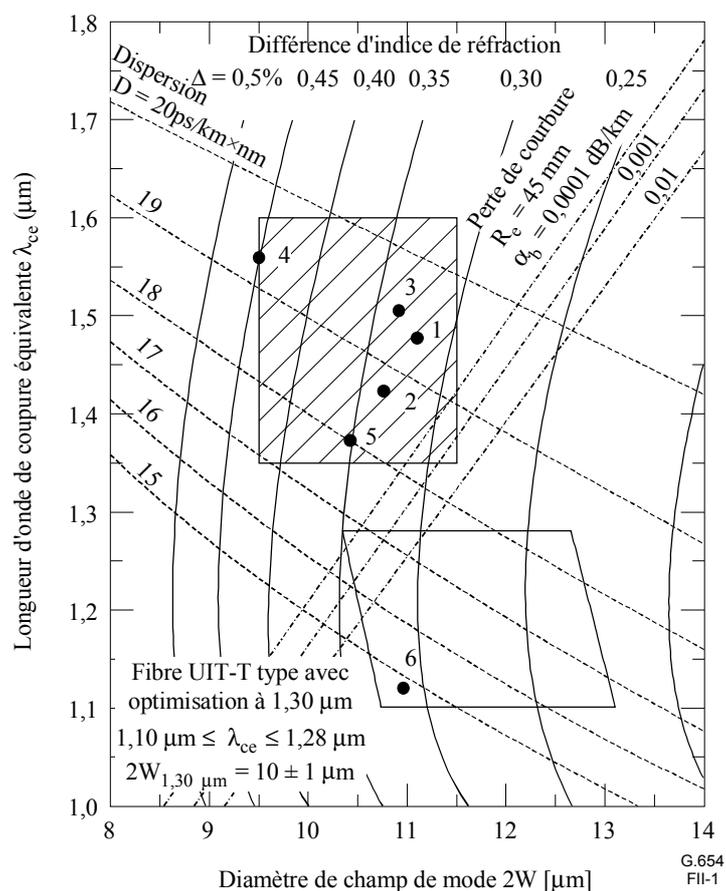
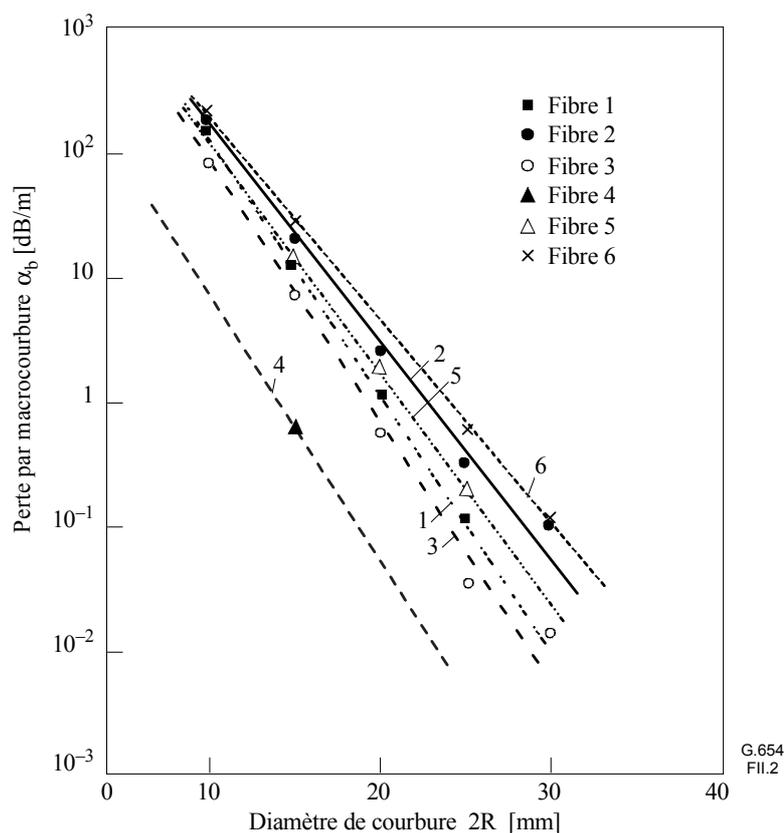


Figure II.1/G.654 – Courbes de perte d'équicourbure α_b , de dispersion chromatique D et d'indice de réfraction Δ à 1,55 μm en fonction du diamètre du champ de mode $2W$ et de la longueur d'onde de coupure équivalent λ_{ce}

Tableau II.1/G.654 – Paramètres de fibres pour les fibres optiques monomodes à décalage de longueur d'onde de coupure et à affaiblissement minimisé à 1,55 μm (UIT-T G.654.A)

Fibre	MFD [μm] @1,55 μm	λ_{ce} [μm]	Δ [%]	Affaiblissement [dB/km] @1,55 μm (@1,30 μm)	Dispersion [ps/nm-km] @1,55 μm (@1,30 μm)
1	11,1	1,48	0,33	0,176 (0,320)	19,27
2	10,8	1,43	0,34	0,184 (0,323)	18,69
3	10,9	1,51	0,35	0,181 (0,348)	18,92
4	9,50	1,56	0,45	0,189 (0,334)	18,99
5	10,1	1,38	0,35	0,197 (0,351)	17,67
Min ~ max	9,50 ~ 11,1	1,38 ~ 1,56	0,33 ~ 0,45	0,176 ~ 0,197 (0,320 ~ 0,351)	17,67 ~ 19,27

Fibres 1 et 2: cœur en silice pure; fibres 3 et 4: cœur à dopage léger au Ge/gaine F déprimée; fibre 5: cœur conventionnel à dopage au Ge.



NOTE – Les croix (courbe en ligne brisée) représentent la fibre 6, une fibre classique de la Rec. UIT-T G.652 à $\lambda = 1,30 \mu\text{m}$ ($\lambda_{\text{ce}} \cong 1,12 \mu\text{m}$, $2W_{1,30\mu\text{m}} \cong 9,20$, $\Delta \cong 0,33\%$).

Figure II.2/G.654 – Perte par macrocourbure en fonction du diamètre de courbure d'échantillons de fibres optiques monomodes d'essai à $1,55 \mu\text{m}$

Appendice III

Informations sur les statistiques de la dispersion modale de polarisation

Le présent appendice récapitule un certain nombre de calculs statistiques pour la dispersion modale de polarisation. La Publication 61282-3 de la CEI documente les calculs et la théorie de manière plus complète. La décomposition en sera donnée selon les paragraphes suivants:

- III.1 Introduction;
- III.2 Collecte des données;
- III.3 Calcul de PMD_Q (Monte Carlo);
- III.4 Calcul de DGD_{max} (Monte Carlo).

NOTE – D'autres méthodes de calcul existent et sont définies dans la Publication 61282-3 de la CEI. La méthode de Monte Carlo est indiquée ici car elle est la plus facile à décrire.

III.1 Introduction

La dispersion modale de polarisation (PMD) est un attribut statistique qui, pour une fibre donnée, est définie comme étant la moyenne de valeurs mesurées de temps de propagation de groupe différentiel (DGD) sur une plage de longueurs d'onde. Etant donné que les valeurs de temps de propagation de groupe différentiel varient aléatoirement en fonction du temps et de la longueur

d'onde, il existe une limite inférieure théorique à la reproductibilité réalisable de la valeur communiquée de la dispersion modale de polarisation égale à $\pm 15\%$ environ. Cette caractéristique implique qu'il n'est pas approprié de sélectionner des fibres ou câbles individuels selon une spécification plus contraignante que la capacité du procédé. Ces sélections sont souvent appropriées pour des attributs déterministes tels que l'affaiblissement mais, en général, elles ne le sont pas pour la dispersion modale de polarisation. Ainsi, une spécification portant sur la distribution totale du procédé est plus raisonnable.

Un second élément à considérer pour la fonctionnalité de dispersion modale de polarisation est que la dégradation du système à un instant et à une longueur d'onde donnée est contrôlée par la valeur du temps de propagation de groupe différentiel, qui varie statistiquement autour de la valeur de dispersion modale de polarisation. Si la valeur de la dispersion modale de polarisation est fournie pour une fibre câblée particulière, on peut calculer la probabilité que le temps de propagation de groupe différentiel soit supérieur à une valeur donnée. Il est toutefois évident que l'application de ces formules à une valeur maximale spécifiée donnera une vue très imprécise du fonctionnement réel du système. Une spécification statistique portant sur la dispersion modale de polarisation fournira cependant une limite statistique aux valeurs du temps de propagation de groupe différentiel pour la population prise dans son ensemble. Cette limite, définie en termes de probabilité, conduit à une valeur utilisable dans la conception de systèmes qui est inférieure d'environ 20% quant à la valeur du temps de propagation de groupe différentiel et inférieure de deux ordres de grandeur quant à la probabilité aux valeurs qu'on aurait obtenues sans une spécification statistique.

En ce qui concerne le premier élément d'appréciation, il est souhaitable de définir une métrique statistique unique pour la distribution des valeurs de dispersion modale de polarisation qui sont mesurées sur des câbles à fibres optiques. Il est donc nécessaire que la métrique incorpore à la fois l'aspect de la moyenne du procédé et celui de la variabilité du procédé. Un exemple d'une telle métrique est la limite supérieure de confiance à un certain niveau de probabilité.

Il est bien connu que le coefficient de dispersion modale de polarisation d'un ensemble de câbles concaténés peut être estimé en calculant la moyenne quadratique des coefficients de dispersion modale de polarisation des câbles individuels. Afin de donner plus de sens à la métrique de limite supérieure de confiance pour une application, on calcule la borne supérieure d'une liaison concaténée de vingt câbles. Ce nombre de câbles est certes inférieur à celui utilisé dans la plupart des liaisons, mais il est suffisamment grand pour avoir un sens en termes de projection des distributions de temps de propagation de groupe différentiel pour les liaisons concaténées. Une valeur de probabilité de 0,01% est également normalisée – en partie pour obtenir une équivalence avec la probabilité que le temps de propagation de groupe différentiel dépasse une valeur limite, que l'on exige très basse. La limite supérieure de confiance est appelée PMD_Q , ou valeur de conception de liaison et ce type de spécification est appelé Méthode 1.

La limite de probabilité pour le temps de propagation de groupe différentiel est réglée à $6,5 \cdot 10^{-8}$ sur la base de différents facteurs concernant les systèmes, y compris la présence éventuelle dans les liaisons d'autres composants générateurs de dispersion modale de polarisation. La Publication 61282-3 de la CEI décrit une méthode de détermination d'un maximum (défini en termes de probabilité) de manière que, si une distribution satisfait à la prescription de la Méthode 1, le temps de propagation de groupe différentiel à travers des liaisons composées uniquement de câbles à fibres optiques dépasse le temps de propagation de groupe différentiel maximal avec une probabilité inférieure à $6,5 \cdot 10^{-8}$. La valeur DGD_{max} est fixée pour une gamme étendue de formes de distribution. Cette méthode du DGD_{max} pour spécifier la distribution de la dispersion modale de polarisation pour des câbles à fibres optiques est appelée Méthode 2. La Publication 61282-3 de la CEI fournit des méthodes pour combiner les paramètres de la Méthode 2 avec ceux d'autres composants optiques.

La Méthode 1 est une métrique basée sur les quantités qui sont l'objet de la mesure et, donc, elle est d'une certaine manière plus simple à utiliser dans le commerce en tant que prescription normative.

La Méthode 2 est un moyen d'extrapoler les implications pour la conception de systèmes et, donc, elle est incluse en tant qu'information pour la conception de systèmes.

III.2 Collecte des données

Les calculs sont effectués avec des valeurs de dispersion modale de polarisation qui sont représentatives d'une période donnée de la construction et de la fabrication d'un câble. En général, au moins 100 valeurs sont nécessaires. L'échantillon est normalement prélevé sur différents câbles de production et en différents endroits sur les fibres.

La distribution des câbles peut être élargie avec des mesures portant sur des fibres non câblées, à la condition qu'on ait apporté, pour une construction donnée, la preuve d'une relation stable entre les valeurs pour les fibres non câblées et celles pour le câble. Une manière d'augmenter cette distribution est de générer plusieurs valeurs possibles pour les câbles à partir de la valeur de chaque fibre non câblée. Il convient de choisir au hasard ces différentes valeurs pour qu'elles soient représentatives de la relation habituelle et de la variabilité qui découle, par exemple, de la reproductibilité des mesures. Sachant que l'étendue des variations comprend l'erreur de reproductibilité, cette méthode d'estimation de la distribution des valeurs de dispersion modale de polarisation pour câbles peut conduire à surestimer PMD_Q .

La longueur des échantillons mesurés pourrait sembler avoir des implications sur les déductions de la Méthode 2. Cet aspect a été étudié – les conclusions en sont les suivantes. Les implications de la Méthode 2 restent valides pour toute liaison ayant une longueur inférieure à 400 km tant que:

- soit les câbles installés ont une longueur inférieure à 10 km;
- soit les longueurs mesurées sont inférieures à 10 km.

III.3 Calcul de PMD_Q (Monte Carlo)

D'autres méthodes de calcul sont indiquées dans la Publication 61282-3 de la CEI. La méthode de Monte Carlo est indiquée ici car elle est la plus facile à décrire et utilise le moins d'hypothèses.

Les valeurs mesurées des coefficients de dispersion modale de polarisation sont représentées par x_i , i allant de 1 à N , le nombre de mesures. Ces valeurs sont utilisées pour générer 100 000 valeurs de coefficient de dispersion modale de polarisation pour une liaison concaténée, dont chacune est calculée avec la moyenne quadratique de 20 valeurs de câble individuelles choisies au hasard dans la population échantillon.

NOTE – Lorsque $N = 100$, il existe $5,3 \cdot 10^{20}$ valeurs de liaison possibles.

Pour chaque calcul de valeur de liaison, choisir 20 nombres aléatoires compris entre 1 et N . Choisir ces valeurs et les affecter d'un indice, k . Le coefficient de dispersion modale de polarisation pour la liaison, y , est calculé de la manière suivante:

$$y = \left(\frac{1}{20} \sum_{k=1}^{20} x_k^2 \right)^{1/2} \quad (\text{III-1})$$

Consigner ces 100 000 valeurs de y dans un histogramme de haute densité au fur et à mesure qu'elles sont calculées. Lorsque la saisie est achevée, se servir de l'histogramme pour calculer la fonction de probabilité cumulée et déterminer la valeur de dispersion modale de polarisation associée avec le niveau de confiance de 99,99%. Consigner cette dernière valeur comme étant PMD_Q . Si la valeur calculée de PMD_Q est inférieure à la valeur spécifiée $\{0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}\}$, la distribution satisfait à la Méthode 1.

III.4 Calcul de DGD_{\max} (Monte Carlo)

Ce calcul s'appuie sur celui de PMD_Q . En l'occurrence, une valeur de DGD_{\max} est prédéfinie (à 25 ps) et on calcule une probabilité, P_F , de dépasser cette valeur. Si la valeur calculée est inférieure à la valeur spécifiée ($6,5 \cdot 10^{-8}$), la distribution satisfait à la Méthode 2.

Avant de démarrer la méthode de Monte Carlo, calculer la limite du coefficient de dispersion modale de polarisation, P_{\max} , de la manière suivante:

$$P_{\max} = \frac{DGD_{\max}}{\sqrt{L_{réf}}} = \frac{25}{20} = 1,25$$

Pour chaque paire consécutive parmi 20 valeurs de concaténation de liaison pour câble, y_{2j-1} et y_{2j} , une valeur de concaténation de 40 câbles, z_j , est générée de la manière suivante:

$$z_j = \left(\frac{y_{2j-1}^2 + y_{2j}^2}{2} \right)^{1/2} \quad (\text{III-2})$$

NOTE – On obtient ainsi 50 000 valeurs de z_j , ce qui constitue un nombre convenable.

Calculer la probabilité de dépasser DGD_{\max} sur la j^{e} concaténation de 40 liaisons, p_j , de la manière suivante:

$$p_j = 1 - \int_0^{P_{\max}/z_j} 2 \left(\frac{4}{\pi} \right)^{3/2} \frac{t^2}{\Gamma(3/2)} \exp \left[-\frac{4}{\pi} t^2 \right] dt \quad (\text{III-3})$$

ExcellTM définit une fonction, GAMMADIST (X, ALPHA, BETA, Cumulative), qui permet de calculer p_j . Il convient d'appeler cette fonction de la manière suivante:

$$PJ = 1 - \text{GAMMADIST}(4 * PMAX * PMAX / (PI() * ZI * ZI), 1.5, 1, \text{TRUE}) \quad (\text{III-4})$$

La probabilité de dépasser DGD_{\max} , P_F , est donnée par:

$$P_F = \frac{1}{50000} \sum_j p_j \quad (\text{III-5})$$

Si la probabilité P_F est inférieure à la valeur spécifiée, la distribution satisfait à la Méthode 2.

Appendice IV

Bibliographie

- [1] Publication 61282-3 de la CEI: (projet en cours), *Directives et procédures d'essai des systèmes pour tenir compte de la dispersion en mode polarisé dans les systèmes analogiques et numériques à fibres optiques monodales.*

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

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