

Union internationale des télécommunications

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.691

(03/2006)

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

Caractéristiques des supports de transmission –
Caractéristiques des composants et sous-systèmes
optiques

**Interfaces optiques pour les systèmes STM-64
et autres systèmes SDH monocanaux à
amplificateurs optiques**

Recommandation UIT-T G.691

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
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
DONNÉES SUR COUCHE TRANSPORT – ASPECTS GÉNÉRIQUES	G.7000–G.7999
ASPECTS RELATIFS AU PROTOCOLE ETHERNET SUR COUCHE TRANSPORT	G.8000–G.8999
RÉSEAUX D'ACCÈS	G.9000–G.9999

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

Recommandation UIT-T G.691

Interfaces optiques pour les systèmes STM-64 et autres systèmes SDH monocanaux à amplificateurs optiques

Résumé

La présente Recommandation fournit des paramètres et valeurs pour les interfaces optiques des systèmes monocanaux à longue distance STM-4, STM-16 et STM-64 qui utilisent des préamplificateurs optiques et des amplificateurs de puissance optiques. En outre, elle fournit des paramètres d'interface optique pour les systèmes monocanaux "dans un bureau" et à courte distance sans amplification optique.

Source

La Recommandation UIT-T G.691 a été approuvée le 29 mars 2006 par la Commission d'études 15 (2005-2008) de l'UIT-T selon la procédure définie dans la Recommandation UIT-T A.8.

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 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 2006

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 normatives.....	1
3	Termes et définitions	2
	3.1 Définitions	2
	3.2 Termes définis dans d'autres Recommandations.....	2
4	Abréviations.....	3
5	Classification des interfaces optiques.....	4
	5.1 Applications.....	4
	5.2 Configuration de référence et configurations physiques.....	7
6	Définitions des paramètres	8
	6.1 Plage des longueurs d'onde de fonctionnement des systèmes.....	8
	6.2 Emetteur	8
	6.3 Trajet optique.....	12
	6.4 Récepteur.....	15
7	Valeurs des paramètres optiques	16
8	Approche de technique optique	23
	8.1 Hypothèses de conception	23
	8.2 Non-linéarités	23
	8.3 Adaptation de dispersion	23
	8.4 Amplificateurs autonomes.....	27
	8.5 Considérations d'évolutivité	27
	8.6 Considérations de sécurité optique.....	28
Annexe A – Pénalités de taux d'extinction et de diagramme en œil.....		28
	A.1 Paramètres de mesure	28
	A.2 Pénalité de taux d'extinction.....	29
	A.3 Pénalité de diagramme en œil.....	30
	A.4 Sensibilité du récepteur	30
Appendice I – Dispersion modale de polarisation		31
	I.1 Distribution statistique de la dispersion modale de polarisation.....	31
	I.2 La pénalité de trajet due à la dispersion modale de polarisation (PMD).....	32
Appendice II – Description de la modulation autophase comme accommodation de la dispersion.....		34
	II.1 Fondamentaux de la modulation autophase (SPM).....	34
	II.2 Modulation autophase comme technique d'accommodation de la dispersion.....	34
	II.3 Rupture de SPM	35
	II.4 Valeurs de paramètres optiques pour les applications.....	35
	II.5 Type de source.....	35

	Page
II.6 Diagramme en œil	35
II.7 Récepteur	36
Appendice III – Adaptation de dispersion à l'aide de transmission à dispersion (DST).....	36
III.1 Introduction	36
III.2 Principe de la technique de transmission à dispersion (DST).....	36
III.3 Diagramme en œil de récepteur optique après une transmission par fibre dispersive.....	37
III.4 Définitions des paramètres	38
III.5 Valeurs de paramètres optiques.....	41
Appendice IV – Mesure du paramètre de modulation α du signal optique émis.....	42
IV.1 Montage de mesure.....	42
IV.2 Prescriptions techniques relatives aux équipements de mesure	43
IV.3 Etalonnage	44
IV.4 Procédure de mesure.....	44
IV.5 Traitement des données	45
IV.6 Exemples et interprétation de données.....	45
Appendice V – Considérations d'évolutivité.....	47

Recommandation UIT-T G.691

Interfaces optiques pour les systèmes STM-64 et autres systèmes SDH monocanaux à amplificateurs optiques

1 Domaine d'application

La présente Recommandation a pour objectif de fournir des spécifications d'interface optique afin de permettre la compatibilité transversale (multiconstructeur) des systèmes monocanaux STM-4, STM-16 et STM-64 "entre les bureaux" utilisant des préamplificateurs optiques et/ou des amplificateurs de puissance optiques. Elle contient également des spécifications pour la mise en œuvre de systèmes monocanaux STM-64 "dans un bureau" et à courte distance qui ne nécessitent pas d'amplification optique et qui présentent une compatibilité transversale.

L'utilisation d'amplificateurs de ligne ne s'inscrit pas dans le cadre de la présente Recommandation.

La présente Recommandation est basée sur l'utilisation d'une fibre pour chaque sens.

2 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.

- [1] Recommandation UIT-T G.652 (2005), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes.*
- [2] Recommandation UIT-T G.653 (2003), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes à dispersion décalée.*
- [3] Recommandation UIT-T G.655 (2006), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques monomodes à dispersion décalée non nulle.*
- [4] Recommandation UIT-T G.662 (2005), *Caractéristiques génériques des dispositifs et sous-systèmes amplificateurs à fibres optiques.*
- [5] Recommandation UIT-T G.663 (2000), *Aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques.*
- [6] Recommandation UIT-T G.664 (2006), *Procédures et prescriptions de sécurité optique applicables aux systèmes de transport optiques.*
- [7] Recommandation UIT-T G.671 (2005), *Caractéristiques de transmission des composants et sous-systèmes optiques.*
- [8] Recommandation UIT-T G.693 (2005), *Interfaces optiques pour les connexions locales.*
- [9] Recommandation UIT-T G.707/Y.1322 (2003), *Interface de nœud de réseau pour la hiérarchie numérique synchrone.*
- [10] Recommandation UIT-T G.955 (1996), *Systèmes de ligne numériques des hiérarchies à 1544 kbit/s et à 2048 kbit/s sur câbles à fibres optiques.*

- [11] Recommandation UIT-T G.957 (2006), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone*.
- [12] Recommandation UIT-T G.959.1 (2006), *Interfaces de couche Physique du réseau optique de transport*.

3 Termes et définitions

3.1 Définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1.1 trajet (optique) principal: liaison en fibre entre le point S de l'équipement émetteur et le point R de l'équipement récepteur. Le trajet principal ne comporte aucun trajet auxiliaire.

3.1.2 interfaces de trajet principal: interfaces avec la liaison en fibre spécifiée dans la présente Recommandation.

3.1.3 trajet (optique) auxiliaire: interconnexion optique entre un émetteur ou récepteur non amplifié et un dispositif optique (autonome) de préamplification ou d'amplification de puissance. Un trajet auxiliaire n'est pas compris dans le trajet principal.

3.1.4 transpondeur; émetteur-récepteur (optique): combinaison émetteur-récepteur, avec ou sans mise en forme et resynchronisation des impulsions, qui convertit un signal optique en un autre signal optique via une conversion dans le domaine électrique.

3.2 Termes définis dans d'autres Recommandations

La présente Recommandation utilise les termes suivants définis dans d'autres Recommandations UIT-T:

amplificateur de puissance:	(Rec. UIT-T G.662)
amplificateur à fibre dopée à l'erbium:	(Rec. UIT-T G.661)
technique de raccordement:	(Rec. UIT-T G.957)
compatibilité longitudinale:	(Rec. UIT-T G.955)
dispositif amplificateur optique:	(Rec. UIT-T G.662)
sous-système amplificateur optique:	(Rec. UIT-T G.662)
amplificateur optique:	(Rec. UIT-T G.662)
amplificateur à fibre optique:	(Rec. UIT-T G.662)
affaiblissement d'adaptation optique:	(Rec. UIT-T G.957)
récepteur à amplification optique:	(Rec. UIT-T G.662)
émetteur à amplification optique:	(Rec. UIT-T G.662)
préamplificateur:	(Rec. UIT-T G.662)
points de référence S/R:	(Rec. UIT-T G.955)
compatibilité transversale:	(Rec. UIT-T G.957)

4 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

APD	photodiode à avalanche (<i>avalanche photo diode</i>)
ASE	émission spontanée amplifiée (<i>amplified spontaneous emission</i>)
ASK	modulation par déplacement d'amplitude (<i>amplitude shift keying</i>)
BER	taux d'erreur sur les bits (<i>bit error ratio</i>)
DA	adaptation de dispersion (<i>dispersion accommodation</i>)
DGD	temps de propagation de groupe différentiel (<i>differential group delay</i>)
DST	transmission à dispersion (<i>dispersion supported transmission</i>)
EX	taux d'extinction (<i>extinction ratio</i>)
FEC	correction d'erreur directe (<i>forward error correction</i>)
ffs	à étudier
FM	modulation de fréquence (<i>frequency modulation</i>)
FSK	modulation par déplacement de fréquence (<i>frequency shift keying</i>)
FSR	intervalle spectral libre (<i>free spectral range</i>)
FWHM	largeur spectrale à mi-hauteur (<i>full width at half maximum</i>)
I	dans un bureau (<i>intra-office</i>)
IM	modulation d'intensité (<i>intensity modulation</i>)
L	longue distance
MLM	mode multilongitudinal (<i>multi-longitudinal mode</i>)
MPI	interface principale sur le trajet (<i>main path interface</i>)
MPN	bruit de répartition des modes (<i>mode partition noise</i>)
NA	non applicable
NRZ	non-retour à zéro (<i>non-return to zero</i>)
ORL	perte de retour optique (<i>optical return loss</i>)
PCH	prémodulation (<i>prechirp</i>)
PDC	compensateur passif de dispersion (<i>passive dispersion compensator</i>)
PIN	"type p" – intrinsèque – "type n"
PMD	dispersion modale de polarisation (<i>polarization mode dispersion</i>)
PRBS	séquence binaire pseudo-aléatoire (<i>pseudo-random binary sequence</i>)
PSP	états principaux de polarisation (<i>principal state of polarization</i>)
RMS	écart quadratique moyen (<i>root mean square</i>)
S	à courte distance (<i>short-haul</i>)
SDH	hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SLM	mode monolongitudinal (<i>single-longitudinal mode</i>)
SMSR	taux de suppression de modes latéraux (<i>side mode suppression ratio</i>)
SNR	rapport signal/bruit (<i>signal to noise ratio</i>)

SOP	état de polarisation (<i>state of polarization</i>)
SPM	modulation autophase (<i>self phase modulation</i>)
STM-N	module de transport synchrone de niveau N (<i>synchronous transport module of order N</i>)
U	ultra longue distance (<i>ultra long-haul</i>)
V	très longue distance (<i>very long-haul</i>)
WDM	multiplex par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplex</i>)

5 Classification des interfaces optiques

5.1 Applications

La présente Recommandation définit des interfaces optiques pour les systèmes de ligne "entre les bureaux" à monocanal pour des applications terrestres à longue distance à partir du module STM-4 jusqu'au module STM-64. Elle est une extension de la Rec. UIT-T G.957 fondée sur l'addition d'amplificateurs optiques et des débits de données des modules STM-64. Les systèmes avec amplificateurs de ligne ne s'inscrivent pas dans le cadre de la présente Recommandation.

Les définitions des codes d'application de la Rec. UIT-T G.957 sont étendues de la manière suivante:

Application – niveau STM. suffixe numérique,

où "application" correspond à la distance visée: I (dans un bureau), S (à courte distance), L (à longue distance), V (à très longue distance) et U (à ultralongue distance).

Le suffixe numérique désigne:

- 1 l'utilisation de sources nominalement à 1310 nm sur une fibre (standard) de la Rec. UIT-T G.652;
- 2 l'utilisation de sources nominalement à 1550 nm sur une fibre de la Rec. UIT-T G.652;
- 3 l'utilisation de sources nominalement à 1550 nm sur une fibre (à dispersion décalée) de la Rec. UIT-T G.653;
- 5 l'utilisation de sources nominalement à 1550 nm sur une fibre (à dispersion décalée non nulle) de la Rec. UIT-T G.655.

Pour certains codes I-64, on ajoute une lettre "r" après le suffixe numérique pour indiquer une distance cible réduite. Ces codes d'application qui appartiennent à la famille "dans un bureau" sont à dispersion limitée. La même distance cible peut être obtenue aux moyens d'autres solutions technologiques, qui appellent un complément d'étude (par exemple: une approche d'interface parallèle).

Les distances cibles sont basées sur des intervalles d'environ 40 km pour 1550 nm et de 20 km pour 1310 nm, excepté pour les applications à très courte portée et à l'intérieur d'un bureau. Les distances cibles sont à utiliser pour la classification uniquement et non pour la spécification. Elles sont estimées avec l'hypothèse d'une perte de 0,275 dB/km dans la fibre installée, y compris les épissures et marges de câbles, pour les systèmes à 1550 nm et de 0,55 dB/km pour les systèmes à 1310 nm. D'un point de vue pratique, on a défini des affaiblissements par distance de 11 dB/20 km à 1310 nm et de 11 dB/40 km à 1550 nm, excepté pour les applications à très courte portée et "dans un bureau". Dans la pratique, il est possible que ces valeurs ne s'appliquent pas à tous les câbles à fibres, auquel cas les distances réalistes que l'on peut atteindre peuvent être plus courtes.

Les spécifications principales sont la plage d'atténuation et la tolérance de dispersion maximale du système. La distance cible sert principalement à définir la tolérance de dispersion, que l'on calcule

comme le produit de la dispersion maximale de la fibre par la distance cible. On applique ainsi une tolérance additionnelle aux systèmes et cela permet la pleine utilisation des installations de fibres à affaiblissement faible. Les Tableaux 1a, 1b et 1c récapitulent les codes d'application décrits dans la présente Recommandation.

Tableau 1a/G.691 – Classification des interfaces optiques basée sur des applications et indiquant des codes d'application I

Applications						
Longueur d'onde nominale de la [nm] source	1310	1310	1550	1550	1550	1550
Type de fibre	G.652	G.652	G.652	G.652	G.653	G.655
Distance cible [km]	0.6	2	2	25	25	25
STM-64	I-64.1r	I-64.1	I-64.2r	I-64.2	I-64.3	I-64.5
Paramètres donnés dans	G.693	G.693	G.693	G.959.1	G.959.1	G.959.1
Selon le code	VSR600-2R1	VSR2000-2R1	VSR2000-2L2	P1I1-2D2	P1I1-2D3	P1I1-2D5
NOTE 1 – Les distances cibles sont approximatives et sont à utiliser pour la classification uniquement et non pour la spécification.						
NOTE 2 – Les codes I, S et L pour les modules STM-1, 4 et 16 sont définis dans la Rec. UIT-T G.957.						

Tableau 1b/G.691 – Classification des interfaces optiques basée sur des applications et indiquant des codes d'application S et L

Applications						
Longueur d'onde nominale de la [nm] source	1310	1550	1550	1550	1310	1550
Type de fibre	G.652	G.652	G.653	G.655	G.652	G.652
Distance cible [km]	20	40	40	40	40	80
STM-64	S-64.1	S-64.2	S-64.3	S-64.5	L-64.1	L-64.2
Paramètres donnés dans	G.959.1	G.959.1	G.959.1	G.959.1	G.959.1	Tableau 5c
Selon le code	P1S1-2D1	P1S1-2D2	P1S1-2D3	P1S1-2D5	P1L1-2D1	Tableau 5c
NOTE 1 – Les distances cibles sont approximatives et sont à utiliser pour la classification uniquement et non pour la spécification.						
NOTE 2 – Les codes I, S et L pour les modules STM-1, 4 et 16 sont définis dans la Rec. UIT-T G.957.						

Tableau 1c/G.691 – Classification des interfaces optiques basée sur des applications et indiquant les codes d'application V et U

Applications					
Longueur d'onde nominale de la source [nm]	1310	1550	1550	1550	1550
Type de fibre	G.652	G.652	G.653	G.652	G.653
Distance cible [km]	60	120	120	160	160
STM-1	–	–	–	–	–
STM-4	V-4.1	V-4.2	V-4.3	U-4.2	U-4.3
Paramètres donnés dans	Tableau 3	Tableau 3	Tableau 3	Tableau 3	Tableau 3
Distance cible [km]	60	120	120	160	160
STM-16	–	V-16.2	V-16.3	U-16.2	U-16.3
Paramètres donnés dans		Tableau 4	Tableau 4	G.959.1	G.959.1
Sous le code				P1U1-1A2	P1U1-1A3
Distance cible [km]	60	120	120		
STM-64	–	V-64.2	V-64.3	–	–
Paramètres donnés dans		Tableau 5d	Tableau 5d		
NOTE – Les distances cibles sont approximatives et sont à utiliser pour la classification uniquement et non pour la spécification.					

5.2 Configuration de référence et configurations physiques

Le point central de la présente Recommandation est de spécifier les interfaces principales sur le trajet (MPI, *main path interface*). Les MPI sont les interfaces avec l'installation de fibre à longue distance. Les propriétés de l'interface principale sur le trajet fixent les prescriptions sur les équipements terminaux. En principe, les équipements terminaux peuvent être organisés de différentes façons afin de satisfaire aux spécifications exigées pour les interfaces MPI. Cela concerne des aspects tels que le niveau d'intégration, la méthode d'accommodation de la dispersion ou l'utilisation d'amplificateurs optiques autonomes.

Par suite de la multiplicité des équipements actifs et passifs présents dans le trajet optique (amplificateurs, multiplexeurs, etc.) qui sont mentionnés dans les Recommandations relatives aux systèmes mono et multicanaux avec amplificateurs optiques, il faut interpréter dans un sens générique les points de référence S et R et les détailler pour chaque système. Afin de distinguer les points de référence S et R des MPI des autres points de référence (par exemple: S dans la Rec. UIT-T G.957), on désigne respectivement les extrémités émettrice et réceptrice de l'interface principale sur le trajet comme MPI-S et MPI-R, lorsqu'on les utilise dans un sens général.

Les trajets d'interconnexion optique (cordons de connexion) entre tous les dispositifs optiques dans les équipements terminaux, le cas échéant, sont appelés "trajets auxiliaires". Dans la présente Recommandation, on peut donc représenter les interfaces des systèmes de lignes à fibres optiques de la manière indiquée dans la Figure 1.

Dans la Figure 1, le côté émetteur est illustré en utilisant un émetteur relié par un trajet auxiliaire à un dispositif amplificateur optique autonome, alors que, sur le côté récepteur, un récepteur à amplification optique présente une interface directe avec le trajet principal.

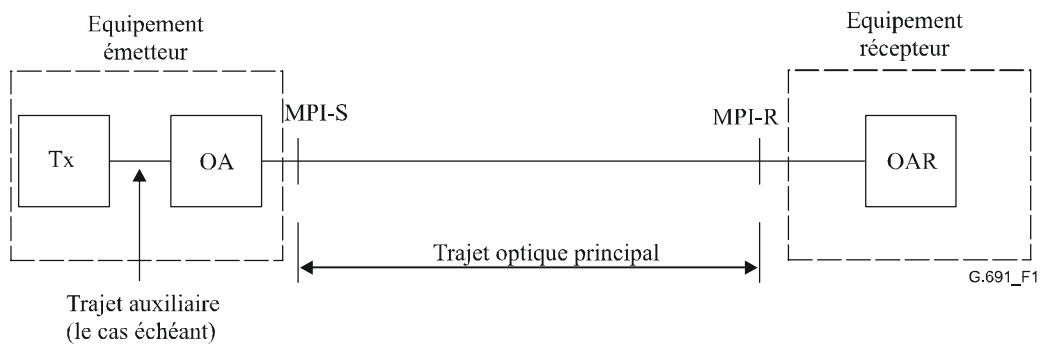


Figure 1/G.691 – Exemple de liaison optique avec les points de référence définis dans la présente Recommandation

6 Définitions des paramètres

Toutes les valeurs de paramètres sont des valeurs correspondant au cas le plus défavorable et sont supposées satisfaites dans la plage des conditions normales de fonctionnement (à savoir plages de température et d'humidité), les effets du vieillissement y étant inclus. Les paramètres sont spécifiés par rapport à un objectif de conception d'une section optique ayant un taux d'erreur sur les bits (BER, *bit error ratio*) meilleur que 10^{-12} pour n'importe quelle combinaison de paramètres dans les plages indiquées dans les tableaux pour chaque système spécifié.

Le codage de ligne optique utilisé pour les interfaces de système jusqu'au module STM-64 compris est binaire sans retour à zéro (NRZ, *non-return to zero*), brouillé conformément à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322.

6.1 Plage des longueurs d'onde de fonctionnement des systèmes

La plage des longueurs d'onde de fonctionnement est la plage maximale admissible pour la longueur d'onde de la source. Dans cette plage, on peut sélectionner la longueur d'onde de la source pour différentes implémentations d'amplificateur et différentes dégradations liées aux fibres. Le récepteur doit présenter la plage minimale des longueurs d'onde de fonctionnement qui correspond à la plage maximale admissible pour la longueur d'onde de la source.

La plage des longueurs d'onde de fonctionnement des systèmes de transmission à fibres optiques est fondamentalement déterminée par les caractéristiques d'affaiblissement et de dispersion des divers types de fibres et de sources. On trouvera un exposé détaillé de ces aspects dans la Rec. UIT-T G.957. Dans les systèmes de longue distance avec amplificateurs optiques qui sont pris en compte dans la présente Recommandation, la plage des longueurs d'onde de fonctionnement est encore plus restreinte par ces amplificateurs optiques eux-mêmes.

NOTE – Lorsqu'on utilise avant le récepteur un filtre à longueur d'onde fixe ou réglable afin d'éliminer l'émission spontanée amplifiée (ASE, *amplified spontaneous emission*), il est possible que la bande de la longueur d'onde de fonctionnement soit limitée et la compatibilité transversale ne peut pas être garantie.

6.2 Emetteur

6.2.1 Caractéristiques spectrales

On ne s'attend pas à ce que les mesures spectrales seules puissent garantir la compatibilité transversale et il convient de considérer ces paramètres comme nécessaires mais non suffisants pour cela. Actuellement, quelques valeurs des paramètres spectraux sont indiquées. Tant que ces valeurs ne sont pas disponibles, la compatibilité transversale ne peut pas être garantie pour ces systèmes.

6.2.1.1 Largeur spectrale maximale pour les sources de mode monolongitudinal SLM

Pour les sources de mode monolongitudinal (SLM, *single-longitudinal mode*), la largeur spectrale est définie comme étant la pleine largeur de la crête spectrale la plus grande, mesurée à 20 dB en dessous de l'amplitude maximale de la crête.

La moyenne temporelle maximale de la largeur spectrale est principalement utilisée pour se prémunir d'une modulation excessive dans les lasers modulés directement. De telles sources sont principalement destinées aux applications à faible dispersion (par exemple: le module STM-4 et les systèmes sur la fibre de la Rec. UIT-T G.653), mais elles peuvent également être utilisées dans un certain nombre de systèmes à haute dispersion.

Les systèmes à haute dispersion (principalement STM-16 ou STM-64 sur une fibre G.652) utilisent habituellement des sources de modulation. En particulier, les systèmes STM-64 sur la fibre G.652 fonctionnent à proximité de la limite de dispersion type ou à cette limite elle-même. Par conséquent, il est nécessaire par définition que leurs spectres de puissance source soient pratiquement idéals. La définition de la largeur spectrale maximale, bien que toujours valide, devient moins utile et le paramètre le plus important pour les sources de modulation devient la paramètre de modulation (*chirp*).

6.2.1.2 Largeur spectrale maximale pour les sources de mode multilongitudinal (MLM)

L'écart quadratique moyen (r.m.s.) maximale de la largeur ou l'écart type σ (en nm) de la distribution spectrale d'un laser en mode multilongitudinal (MLM, *multi-longitudinal mode*) prend en compte tous les modes de laser qui ne sont pas à plus de 20 dB en dessous du mode de crête. Seul un système doté d'un laser MLM à 1310 nm nécessite cette spécification.

6.2.1.3 Paramètres de modulation (Chirp)

Le paramètre de modulation de la fréquence source (également appelé paramètre α) est défini de la manière suivante:

$$\alpha = \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{1}{2P} \cdot \frac{dP}{dt}}$$

où φ est la phase optique du signal et P sa puissance. Il convient de noter qu'avec cette définition, le paramètre de modulation (*chirp*) n'est pas constant pendant une impulsion. Par conséquent, une impulsion peut présenter une valeur moyenne nulle du paramètre de modulation et ne pas être exempte de modulation (*chirp*).

Un paramètre de modulation (*chirp*) positif correspond à un décalage positif de la fréquence (décalage vers le violet) dans le front montant d'une impulsion et à un décalage négatif de la fréquence (décalage vers le rouge) dans le front descendant de l'impulsion. Un modulateur a généralement un paramètre de modulation (*chirp*) de -1 rad à $+1$ rad alors qu'un transitoire d'établissement pour un laser standard peut présenter un facteur de compression (*chirp*) de 10 rad à 100 rad.

Sachant que plusieurs systèmes dans la présente Recommandation fonctionnent à proximité de la limite de dispersion type ou à cette limite elle-même, il est nécessaire que leurs spectres de source soient proche de l'idéal. La spécification relative à la modulation de fréquence est nécessaire pour commander et décrire le comportement du signal quant à la phase, ce qui est difficile à voir dans le spectre de puissance défini par les autres paramètres.

Le comportement du signal quant à la phase peut être utilisé afin d'amener la performance d'un système à une crête, par exemple en utilisant une compression d'impulsion induite par une modulation. Il peut également être utilisé pour modifier le comportement de non-linéarités induites

par la puissance. Cette interaction est complexe et, par conséquent, les plages autorisées pour ce paramètre peuvent varier en fonction du code d'application et d'autres paramètres du système.

Une méthode de test de la modulation de la source est exposée dans l'Appendice IV.

6.2.1.4 Taux de suppression de modes latéraux

Le taux de suppression de modes latéraux (SMSR, *side mode suppression ratio*) est défini comme étant le rapport entre le pic du spectre source total le plus grand et le second pic le plus grand. La résolution spectrale de la mesure doit être meilleure que (c'est-à-dire que la largeur de bande du filtre optique doit être inférieure à) la largeur spectrale maximale telle qu'elle est définie plus haut. Le second pic le plus grand peut se trouver à proximité du pic principal ou s'en trouver très éloigné.

NOTE – Dans le cadre de cette définition, les pics spectraux qui sont séparés du plus grand pic par la fréquence d'horloge ne sont pas considérés comme étant des modes latéraux.

La spécification du taux SMSR vise à minimiser l'occurrence de dégradations du taux BER dues au bruit de répartition des modes (MPN, *mode partition noise*). Etant donné que le bruit MPN est un effet transitoire de faible probabilité, les mesures de taux SMSR sur des séquences binaires pseudo-aléatoires (PRBS, *pseudo-random binary sequence*) ou des signaux continus peuvent sous-estimer le bruit MPN. La spécification du taux SMSR n'est appropriée que pour les sources laser en mode monolongitudinal (SLM).

6.2.1.5 Densité de puissance spectrale maximale

La densité de puissance spectrale (optique) maximale est définie comme la plus forte moyenne temporelle du niveau de puissance par intervalle de 10 MHz, tout le long du spectre modulé du signal. La mesure doit donc être effectuée avec une résolution meilleure que (c'est-à-dire que la largeur de bande de filtre optique doit être inférieure à) 10 MHz de largeur à mi-hauteur (FWHM).

Ce paramètre sert à éviter l'entrée dans un régime de diffusion de Brillouin pour les sources de forte puissance ayant des largeurs de ligne intrinsèques potentiellement étroites, telles que des combinaisons laser-modulateur-amplificateur. La spécification s'applique toutefois à tous les types de sources.

6.2.2 Puissance injectée moyenne

La puissance injectée moyenne au point MPI-S est la puissance moyenne d'une séquence de données pseudo-aléatoires couplée dans la fibre par l'émetteur. On lui a attribué une plage afin de permettre quelque optimisation de coûts et pour couvrir des provisions pour le fonctionnement dans les conditions normales, les dégradations des connecteurs de l'émetteur, les tolérances de mesure et les effets du vieillissement. Ces valeurs permettent le calcul de valeurs pour la sensibilité et le point de surcharge relatifs au récepteur au point de référence MPI-R.

En cas de défauts dans les équipements de l'émetteur, il convient de limiter la puissance injectée et la durée maximale possible d'exposition du personnel pour des raisons de sécurité liées aux fibres optiques et au laser.

6.2.3 Taux d'extinction

La valeur minimale admise pour le taux d'extinction (EX) est définie de la manière suivante:

$$EX = 10 \times \log_{10}(A/B)$$

Dans la définition précédente, A est la moyenne du niveau de puissance optique au centre d'un "1" logique et B la moyenne du niveau de puissance optique au centre d'un "0" logique. La convention adoptée pour les niveaux logiques optiques est la suivante:

- émission de lumière pour un "1" logique;
- pas d'émission de lumière pour un "0" logique.

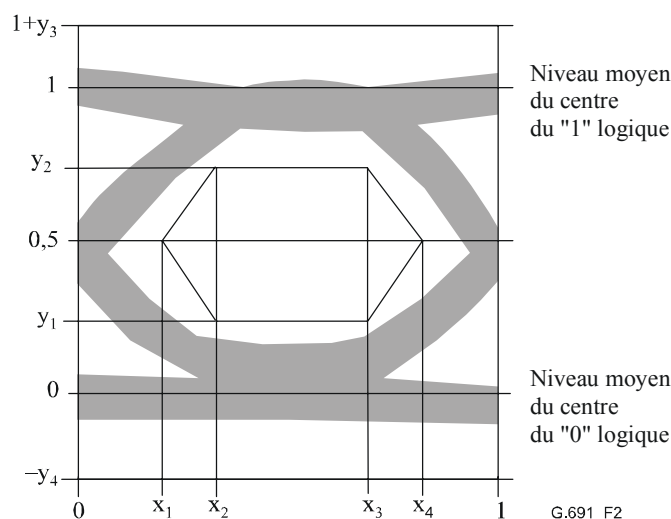
6.2.4 Diagramme en œil

Dans la présente Recommandation, des caractéristiques générales de la forme de la pulsation de l'émetteur (y compris le temps de montée, de descente, la suroscillation des impulsions, leur sous-oscillation et l'oscillation transitoire qu'il convient de tous maîtriser pour empêcher une dégradation excessive de la sensibilité du récepteur) sont spécifiées sous la forme d'un diagramme en œil du récepteur au point MPI-S. Pour les besoins d'évaluation du signal émis, il est important de prendre en compte non seulement l'ouverture de l'œil mais également les limitations de suroscillation et de sous-oscillation. Les paramètres spécifiant le diagramme en œil de l'émetteur sont illustrés dans la Figure 2. L'Annexe A prend en compte d'autres aspects des définitions de diagramme en œil.

Pour des systèmes qui utilisent des techniques d'accommodation de la dispersion fondées sur une déformation préalable du signal, le diagramme en œil dans son acception fournie ci-dessus ne peut être défini qu'en des points présentant des signaux non déformés. Toutefois, ces points ne coïncident pas avec les interfaces de trajet principal et donc peuvent même ne pas être accessibles. Cette définition est l'objet d'un complément d'étude.

Pour des systèmes qui utilisent des effets non linéaires pour l'accommodation de la dispersion (actuellement L-64.2b et V-64.2b), le diagramme en œil peut être différent de celui des systèmes linéaires.

En outre, pour des systèmes qui sont soumis à la modulation autophase (SPM, *self phase modulation*) due à des puissances élevées, une spécification du temps minimal de montée afin d'éviter la panne de SPM est nécessaire. Le temps minimal de montée (10% à 90% de la valeur d'une impulsion unique) pour des systèmes dont les niveaux de puissance d'émetteur vont de +12 dBm à +15 dBm doit être de 30 ps. Pour des niveaux de puissance plus faibles allant de +10 dB à +13 dB, cette valeur ainsi que la modulation (*chirp*) du signal sont objet d'un complément d'étude.



	STM-4	STM-16	STM-64 (a, c) (Notes 2 et 3)	STM-64 (b) (Notes 2 et 4)
x_1/x_4	0,25/0,75	–	ffs	–
x_2/x_3	0,40/0,60	–	ffs	–
x_3-x_2	–	0,2	ffs	0,2
y_1/y_2	0,20/0,80	0,25/0,75	ffs	$\Delta + 0,25/\Delta + 0,75$ avec Δ variable $-0,25 < \Delta < +0,25$
y_3/y_4	0,20/0,20	0,25/0,25	ffs	0,25/0,25

NOTE 1 – Dans le cas des systèmes STM-16 et STM-64, il n'est pas nécessaire que x_2 et x_3 du diagramme en œil rectangulaire soient équidistants par rapport aux axes verticaux à 0 UI et 1 UI. L'étendue de cet écart est l'objet d'un complément d'étude. En considérant les fréquences impliquées dans les systèmes STM-16 et STM-64 ainsi que les difficultés correspondantes à fabriquer ce filtre (se reporter à l'Annexe A), il peut être nécessaire de réviser légèrement les valeurs de paramètres pour les modules STM-16 et STM-64 à la lumière de l'expérience.

NOTE 2 – a, b et c se rapportent aux techniques d'accommodation de la dispersion utilisées pour les applications indiquées dans les Tableaux 5c et 5d.

NOTE 3 – Contient L-64.2a, L-64.2c et V-64.2a.

NOTE 4 – Contient L-64.2b, L-64.3, V-64.2b et V-64.3.

Figure 2/G.691 – Diagramme en œil pour un signal optique émis

6.3 Trajet optique

Afin d'assurer le bon fonctionnement du système pour chacune des applications mentionnées dans le Tableau 1, il est nécessaire de spécifier les caractéristiques d'atténuation et de dispersion du trajet optique entre les points MPI-S et MPI-R.

6.3.1 Affaiblissement

Dans la présente Recommandation, l'atténuation pour chaque application est spécifiée sous forme de plage, caractéristique des grandes distances d'application indiquée dans le Tableau 1. Les spécifications d'atténuation sont supposées être des valeurs correspondant au cas le plus défavorable qui comprennent les pertes dues aux épissures, aux connecteurs, aux affaiblisseurs optiques (le cas échéant) ou à d'autres dispositifs optiques passifs ainsi que toute marge supplémentaire sur les câbles afin de couvrir les provisions pour:

- 1) de futures modifications apportées à la configuration des câbles (épissures supplémentaires, longueurs accrues de câble, etc.);
- 2) des variations de fonctionnement des câbles à fibres provoquées par des facteurs environnementaux;

- 3) des dégradations de tout connecteur, affaiblisseur optique ou autre dispositif optique passif entre les points MPI-S et MPI-R, le cas échéant.

6.3.2 Dispersion

6.3.2.1 Dispersion chromatique maximale

Tous les systèmes pris en compte dans la présente Recommandation sont sensibles à la dispersion. Un certain nombre de ces systèmes fonctionnent même au-delà de la limite "classique" de la dispersion chromatique au moyen de certaines méthodes de compensation appelées "techniques d'accommodation de la dispersion" (se reporter au § 8.3). Ce paramètre définit la valeur non compensée maximale de la dispersion chromatique du trajet principal que le système doit être à même de tolérer.

La tolérance de dispersion maximale requise dans les systèmes est fixée à une valeur égale à la distance visée multipliée par 20 ps/km × nm pour les fibres G.652 et par 3,3 ps/nm × km pour les fibres G.653 dans la région des 1550 nm ainsi que pour les fibres G.652 dans la région des 1310 nm. Il s'agit d'une valeur de dispersion correspondant au cas le plus défavorable pour ce qui concerne les types de fibre pertinents. L'approche de cas le plus défavorable pour ce paramètre vise à fournir certaines marges sur un paramètre sensible et à rendre possible l'allongement des distances de transmission pour les installations de fibres à faible affaiblissement.

La pénalité admise pour le trajet optique prend en compte tous les effets déterministes dus à la dispersion chromatique ainsi que la pénalité due à la dispersion modale de polarisation (PMD, *polarization mode dispersion*) moyenne. Toutefois, les variations statistiques de la dispersion PMD du premier et du second ordre ne sont pas incluses dans cette pénalité sur le trajet (se reporter au § 6.4.3 et à l'Appendice I).

6.3.2.2 Dispersion chromatique minimale

Les systèmes qui utilisent une forme quelconque de compensation de la dispersion par des moyens passifs ou actifs peuvent exiger qu'une certaine dispersion minimale existe sur le trajet.

La valeur minimale de la dispersion chromatique est la valeur de dispersion la plus faible avec laquelle il est nécessaire que le système fonctionne. Cela n'exclut pas des systèmes susceptibles de fonctionner à une dispersion encore plus faible ou à dispersion nulle. Etant donné que l'exacte longueur d'onde de fonctionnement est inconnue, la valeur est déterminée comme étant la valeur minimale pour les fibres G.652 sur la région de longueur d'onde de fonctionnement du système.

6.3.2.3 Temps de propagation de groupe différentiel maximal

Le temps de propagation de groupe différentiel (DGD, *differential group delay*) est la différence temporelle entre les fractions d'une impulsion qui sont émises dans les deux états principaux de polarisation d'un signal optique. Pour des distances supérieures à plusieurs km, et en admettant un couplage (fort) du mode de polarisation aléatoire, le temps DGD dans une fibre peut être modélisé statistiquement comme ayant une distribution de Maxwell.

Dans la présente Recommandation, le temps de propagation de groupe différentiel maximal est défini comme étant la valeur du temps DGD que le système doit tolérer avec une dégradation maximale de sensibilité de 1 dB.

Par suite de la nature statistique de la dispersion PMD, la relation entre le temps de propagation de groupe différentiel maximal et le temps de propagation de groupe différentiel moyen ne peut être définie que de manière probabiliste. La probabilité que le temps DGD instantané dépasse une valeur donnée peut être déduite de ses statistiques maxwelliennes. Donc, connaissant le temps DGD maximal que le système peut tolérer, on peut en déduire le temps DGD moyen équivalent en divisant par le rapport maximum sur moyenne qui correspond à une probabilité acceptable. Un certain nombre d'exemples de rapports sont fournis dans le Tableau 2 ci-après.

Tableau 2/G.691 – Probabilités et moyennes relatives au temps DGD

Rapport maximal sur moyenne	Probabilité de dépasser le maximum
3,0	$4,2 \times 10^{-5}$
3,5	$7,7 \times 10^{-7}$
4,0	$7,4 \times 10^{-9}$

6.3.3 Compensation de la dispersion

La limite de dispersion usuelle pour les systèmes STM-64 fonctionnant sur une fibre G.652 est d'environ 60 km lorsque l'on utilise un spectre source (limité par sa transformée) idéal. Plusieurs systèmes de la présente Recommandation fonctionnent au-delà de cette limite au moyen de certaines techniques appelées "techniques d'adaptation de dispersion (DA, *dispersion accommodation*)". Une technique DA est toute méthode utilisée pour appliquer sur un certain type de fibre des distances plus longues que les distances qu'il est possible d'obtenir lorsque l'on utilise un signal idéal à modulation d'intensité. Ces méthodes ne sont utilisées que dans les systèmes STM-64. Des descriptions plus détaillées des techniques DA figurent au § 8.3 et dans les Appendices didactiques III à V.

6.3.4 Réflexions

Les réflexions sont provoquées par des discontinuités d'indice de réfraction le long du trajet optique. Si elles ne sont pas maîtrisées, elles peuvent dégrader le bon fonctionnement des systèmes par leur effet perturbateur sur le fonctionnement de la source ou amplificateur optique ainsi que par des réflexions multiples qui provoquent un bruit interférométrique au niveau du récepteur. Dans la présente Recommandation, les réflexions provenant du trajet optique sont maîtrisées en spécifiant:

- la perte de retour optique (ORL, *optical return loss*) minimale de l'installation de câble au point MPI-S, y compris les éventuels connecteurs;
- le facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R.

Le facteur de réflexion indique la réflexion à partir de chaque point unitaire de réflexion discrète, tandis que la perte de retour est la puissance totale renvoyée à partir de toute la fibre, y compris les réflexions discrètes et la rétrodiffusion répartie telle que la diffusion de Rayleigh.

Des méthodes de mesure des réflexions sont décrites dans l'Appendice I/G.957. Pour les besoins des mesures de facteur de réflexion et de perte de retour, on admet implicitement que les points MPI-S et MPI-R coïncident avec la face extrême de chaque fiche de connexion. On admet que cela n'inclut pas la performance réelle en matière de réflexion des connecteurs correspondants dans le système opérationnel. Ces réflexions sont supposées avoir la valeur nominale de réflexion pour le type spécifique de connecteurs utilisés.

Le nombre maximal de connecteurs ou de points de réflexion discrète qui peuvent être inclus dans le trajet optique (par exemple pour des répartiteurs ou pour des composants de multiplexage par répartition en longueur d'onde) doit permettre d'obtenir la perte de retour optique globale spécifiée. Si cela ne peut pas être obtenu avec des connecteurs qui satisfont aux réflexions discrètes maximales indiquées dans les Tableaux 3 à 5, il faut utiliser des connecteurs ayant une meilleure performance en matière de réflexion. En variante, il faut réduire le nombre de connecteurs. Il peut être également nécessaire de limiter le nombre de connecteurs ou d'utiliser des connecteurs ayant une qualité de fonctionnement améliorée en matière de facteur de réflexion afin d'éviter les dégradations inacceptables provoquées par des réflexions multiples.

Dans les Tableaux 3 à 5, la valeur pour le facteur de réflexion discrète maximale de -27 dB entre les points MPI-S et MPI-R vise à réduire à un minimum les effets des réflexions multiples (par exemple le bruit interférométrique). La valeur du facteur de réflexion maximale du récepteur a été choisie pour assurer des pénalités acceptables dues aux réflexions multiples, pour toutes les

configurations de systèmes semblables qui comprennent plusieurs connecteurs, etc. Les systèmes qui utilisent moins de connecteurs ou des connecteurs de performance meilleure produisent moins de réflexions multiples et, donc, sont à même de tolérer des récepteurs présentant un facteur de réflexion supérieur.

6.4 Récepteur

6.4.1 Sensibilité

La sensibilité du récepteur est définie comme étant la valeur minimale de la moyenne de la puissance reçue au point MPI-R afin d'obtenir un taux d'erreur sur les bits (BER) de 1×10^{-12} . Elle doit être atteinte au moyen d'un émetteur avec des valeurs correspondant au cas le plus défavorable pour le diagramme en œil de l'émetteur, pour le taux d'extinction, pour la perte de retour optique au point MPI-S, pour les dégradations des connecteurs du récepteur et pour les tolérances de mesure. La définition de la sensibilité du récepteur dans les conditions correspondant au cas le plus défavorable est l'objet d'un exposé plus approfondi dans l'Annexe A.

La sensibilité du récepteur n'a pas à être atteinte en cas de dispersion ou de réflexions dues au trajet optique. Ces effets sont spécifiés séparément dans l'attribution de la pénalité maximale du trajet optique.

NOTE – La sensibilité du récepteur n'as pas à être atteinte en cas de dépassement de la gigue de l'émetteur par rapport à la limite appropriée de production de gigue (par exemple, la limite définie dans la Rec. UIT-T G.783 pour les signaux optiques affluents en hiérarchie numérique synchrone).

Les effets du vieillissement ne sont pas spécifiés séparément car ils sont généralement négociés entre le fournisseur de réseau et le constructeur d'équipements.

Il est souhaitable que les marges types entre un récepteur à température nominale en début de vie et sa contrepartie correspondant au cas le plus défavorable en fin de vie soient comprises dans la plage de 2 dB à 4 dB. Les sensibilités de récepteur spécifiées dans les Tableaux 3 à 5 sont des valeurs de fin de vie correspondant au cas le plus défavorable.

6.4.2 Surcharge

La surcharge du récepteur est la valeur maximale acceptable de la puissance moyenne reçue au point MPI-R pour obtenir un taux d'erreur sur les bits (BER) de 1×10^{-12} .

6.4.3 Pénalité de trajet

La pénalité de trajet est la réduction apparente de sensibilité de récepteur provoquée par une distorsion de la forme d'onde des signaux pendant leur émission le long du trajet. Elle se manifeste par un décalage des courbes de taux d'erreur sur les bits (BER) du système vers les niveaux de puissance d'entrée supérieurs. Il s'agit d'une pénalité de trajet positive. Des pénalités de trajet négatives peuvent exister dans certaines circonstances mais il convient qu'elles soient faibles. (Une pénalité de trajet négative indique qu'un œil d'émetteur pas tout à fait parfait a été partiellement amélioré par les distorsions dépendant du trajet.) Idéalement, il convient que les courbes BER ne soient que translatées mais les variantes de forme ne sont pas rares et peuvent indiquer l'émergence de planchers pour les taux d'erreur sur les bits (BER). Etant donné que la pénalité de trajet est une modification de la sensibilité du récepteur, elle est mesurée à un niveau de taux BER de 10^{-12} .

Une pénalité de trajet maximale de 1 dB pour les systèmes à faible dispersion et de 2 dB pour ceux à dispersion élevée est autorisée. Les pénalités de trajet ne sont pas rendues proportionnelles aux distances visées afin d'éviter des systèmes fonctionnant avec des pénalités élevées.

Pour des systèmes qui utilisent des techniques d'accommodation de la dispersion fondées sur une déformation préalable du signal, la pénalité de trajet dans son acception fournie ci-dessus ne peut être définie qu'entre des points présentant des signaux non déformés. Toutefois, ces points ne

coïncident pas avec les interfaces de trajet principal et, donc, peuvent même ne pas être accessibles. Pour ce cas, la définition de la pénalité de trajet est l'objet d'un complément d'étude.

La valeur moyenne des pénalités de dispersion aléatoires dues à la dispersion modale de polarisation est incluse dans la pénalité de trajet autorisée. A cet égard, il est exigé que la combinaison émetteur/récepteur tolère un temps de propagation de groupe différentiel effectif d'une période de 0,3 bit avec une dégradation maximale de sensibilité de 1 dB (avec 50% de puissance optique dans chacun des états principaux de polarisation). Pour un récepteur bien conçu, cela correspond à une pénalité de 0,1 dB à 0,2 dB pour un temps de propagation de groupe différentiel d'une période de 0,1 bit. Le temps de propagation de groupe différentiel effectif que l'on peut rencontrer en exploitation est une propriété de fibre/câble qui varie de manière aléatoire et il ne peut pas être spécifié dans la présente Recommandation. Ce sujet fait l'objet d'un exposé plus poussé dans l'Appendice I.

Il convient de noter qu'une réduction du rapport signal/bruit due à une amplification optique n'est pas considérée comme une pénalité de trajet.

6.4.4 Facteur de réflexion

Les réflexions partant du récepteur pour revenir sur l'installation de câbles sont spécifiées par le facteur de réflexion admissible maximal du récepteur mesuré au point de référence MPI-R.

7 Valeurs des paramètres optiques

Les valeurs des paramètres optiques pour les applications du Tableau 1 sont indiquées dans les Tableaux 3 à 5. Les définitions sont fournies dans le paragraphe 6. Un certain nombre de méthodes de mesure sont exposées dans les annexes et les appendices. Ces tableaux n'excluent pas l'utilisation de systèmes qui satisfont aux prescriptions relatives à plusieurs codes d'application.

En principe, les équipements terminaux peuvent être organisés de différentes façons afin de satisfaire aux prescriptions relatives au trajet principal. Il existe également différentes options qui augmentent la flexibilité du code d'application de base et elles sont indiquées dans des notes.

On peut utiliser des plages de niveaux de puissance plus élevées ou plus basses afin de satisfaire à des prescriptions spécifiques telles que l'évolutivité, la prise en charge de pertes supérieures ou la parade contre les non-linéarités optiques. Pour l'instant, ces niveaux de puissance ne sont pas spécifiés dans la présente Recommandation.

Actuellement, les valeurs de paramètres optiques de la présente Recommandation sont obtenues sans appliquer la correction d'erreur directe (FEC, *forward error correction*) dans la bande conformément à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322.

Tableau 3/G.691 – Paramètres spécifiés pour les interfaces optiques des modules STM-4

Code d'application (Tableau 1)	Unité	V-4.1	V-4.2	V-4.3	U-4.2	U-4.3
		(Note 1)	(Note 2)	(Note 2)	(Note 3)	(Note 3)
Emetteur au point de référence MPI-S						
Plage des longueurs d'onde de fonctionnement	nm	1290 à 1330	1530 à 1565	1530 à 1565	1530 à 1565	1530 à 1565
Puissance injectée moyenne						
– maximale	dBm	4	4	4	15	15
– minimale	dBm	0	0	0	12	12
Caractéristiques spectrales						
– largeur maximale à –20 dB	nm	ffs	ffs	ffs	ffs	ffs
– paramètre de modulation, α	rad	NA	NA	NA	NA	NA
– densité de puissance spectrale maximale	mW/ 10 MHz	ffs	ffs	ffs	ffs	ffs
– taux SMSR minimal	dB	ffs	ffs	ffs	ffs	ffs
EX minimal	dB	10	10	10	10	10
Trajet optique principal, de MPI-S à MPI-R						
Plage d'affaiblissement						
– maximale	dB	33	33	33	44	44
– minimale	dB	22	22	22	33	33
Dispersion chromatique						
– maximale	ps/nm	200	2400	400	3200	530
– minimale	ps/nm	NA	NA	NA	NA	NA
DGD maximal	ps	480	480	480	480	480
ORL mini. de l'installation de câble au point MPI-S, y compris tous les connecteurs éventuels	dB	24	24	24	24	24
Facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R	dB	–27	–27	–27	–27	–27
Récepteur au point de référence MPI-R						
Sensibilité minimale (taux BER de 1×10^{-12})	dBm	–34	–34	–34	–34	–33
Surcharge minimale	dBm	–18	–18	–18	–18	–18
Pénalité de trajet optique maximale	dB	1	1	1	2	1
Facteur de réflexion maximale du récepteur, mesuré au point MPI-R	dB	–27	–27	–27	–27	–27
NOTE 1 – La distance cible n'est obtenue qu'avec un affaiblissement des fibres installées, y compris les épissures et les marges pour câbles, inférieur ou égal à 0,55 dB/km.						
NOTE 2 – Avec les hypothèses indiquées au § 8.4, un émetteur et récepteur G.957, avec un amplificateur de puissance, fournit une performance de système similaire.						
NOTE 3 – Le préamplificateur optique spécifié par exemple pour les systèmes U-16.x ou V-64.x peut être utilisé à la place d'un amplificateur de puissance optique. Ce système peut présenter une plage d'affaiblissement quelque peu plus basse.						

Tableau 4/G.691 – Paramètres spécifiés pour les interfaces optiques des modules STM-16

Code d'application (Tableau 1)	Unité	V-16.2	V-16.3	U-16.2	U-16.3
		(Notes 1, 2)	(Notes 1, 2)		
Émetteur au point de référence MPI-S					
Plage des longueurs d'onde de fonctionnement	nm	1530 à 1565	1530 à 1565		
Puissance injectée moyenne					
– maximale	dBm	13	13		
– minimale	dBm	10	10		
Caractéristiques spectrales					
– largeur maximale à –20 dB	nm	ffs	ffs		
– paramètre de modulation, α	rad	ffs	ffs		
– densité de puissance spectrale maximale	mW/ 10 MHz	ffs	ffs		
– taux SMSR minimal	dB	ffs	ffs		
EX minimal	dB	8,2	8,2		
Trajet optique principal, de MPI-S à MPI-R					
Plage d'affaiblissement					
– maximale	dB	33	33		
– minimale	dB	22	22		
Dispersion chromatique					
– maximale	ps/nm	2400	400		
– minimale	ps/nm	NA	NA		
DGD maximal	ps	120	120		
ORL mini. de l'installation de câble au point MPI-S, y compris tous les connecteurs éventuels	dB	24	24		
Facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R	dB	–27	–27		
Récepteur au point de référence MPI-R					
Sensibilité minimale (taux BER de 1×10^{-12})	dBm	–25	–24		
Surcharge minimale	dBm	–9	–9		
Pénalité de trajet optique maximale	dB	2	1		
Facteur de réflexion maximale du récepteur, mesuré au point MPI-R	dB	–27	–27		
NOTE 1 – Le préamplificateur optique spécifié par exemple pour les systèmes U-16.x ou V-64.x peut être utilisé à la place d'un amplificateur de puissance optique. Ce système peut présenter une plage d'affaiblissement quelque peu plus basse.					
NOTE 2 – Avec les hypothèses indiquées au § 8.4, un émetteur et récepteur G.957, avec un amplificateur de puissance, fournit une performance de système similaire.					

Paramètres donnés dans la Rec. UIT-T G.959.1 selon le code PIU1-1A2

Paramètres donnés dans la Rec. UIT-T G.959.1 selon le code PIU1-1A3

Tableau 5a/G.691 – Paramètres spécifiés pour les interfaces optiques des modules STM-64

Code d'application (Tableau 1)	Unité	I-64.1r	I-64.1	I-64.2r	I-64.2	I-64.3	I-64.5
Emetteur au point de référence MPI-S							
Type de source							
Plage des longueurs d'onde de fonctionnement	nm						
Puissance injectée moyenne							
– maximale	dBm						
– minimale	dBm						
Caractéristiques spectrales							
– écart quadratique maximal de la largeur (σ)	nm						
– largeur maximale à –20 dB	nm						
– paramètre de modulation, α	rad						
– densité de puissance spectrale maximale	mW/ 10 MHz						
– taux SMSR minimal	dB						
EX minimal	dB						
Trajet optique principal, de MPI-S à MPI-R							
Plage d'affaiblissement							
– maximale	dB						
– minimale	dB						
Dispersion chromatique							
– maximale	ps/nm						
– minimale	ps/nm						
Compensation passive de dispersion							
– Maximale	ps/nm						
– Minimale	ps/nm						
Temps DGD maximal	ps						
ORL mini. de l'installation de câble au point MPI-S, y compris tous les connecteurs éventuels	dB						
Facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R	dB						
Récepteur au point de référence MPI-R							
Sensibilité minimale (taux BER de 1×10^{-12})	dBm						
Surcharge minimale	dBm						
Pénalité de trajet optique maximale	dB						
Facteur de réflexion maximale du récepteur, mesuré au point MPI-R	dB						
NOTE – Toutes les applications de la présente Recommandation utilisent des lasers en mode monolongitudinal (SLM) comme sources, à l'exception de l'application I-64.1r qui utilise des lasers en mode multilongitudinal (MLM).							

Tableau 5b/G.691 – Paramètres spécifiés pour les interfaces optiques des modules STM-64

Code d'application (Tableau 1)	Unité	S-64.1	S-64.2a	S-64.2b	S-64.3a	S-64.3b	S-64.5a	S-64.5b
Émetteur au point de référence MPI-S								
Plage des longueurs d'onde de fonctionnement	nm							
Puissance injectée moyenne								
– maximale	dBm							
– minimale	dBm							
Caractéristiques spectrales								
– largeur maximale à –20 dB	nm							
– paramètre de modulation, α	rad							
– densité de puissance spectrale maximale	mW/10MHz							
– taux SMSR minimal	dB							
EX minimal	dB							
Trajet optique principal, de MPI-S à MPI-R								
Plage d'affaiblissement								
– maximale	dB							
– minimale	dB							
Dispersion chromatique								
– maximale	ps/nm							
– minimale	ps/nm							
Compensation passive de dispersion								
– maximale	ps/nm							
– minimale	ps/nm							
DGD maximal	ps							
ORL mini. de l'installation de câble au point MPI-S, y compris tous les connecteurs éventuels	dB							
Facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R	dB							
Récepteur au point de référence MPI-R								
Sensibilité minimale (taux BER de 1×10^{-12})	dBm							
Surcharge minimale	dBm							
Pénalité de trajet optique maximale	dB							
Facteur de réflexion maximale du récepteur, mesuré au point MPI-R	dB							
NOTE – S-64.2a, 3a et 5a ont des niveaux de puissance d'émetteur appropriés pour les récepteurs APD; S-64.2b, 3b et 5b ont des niveaux de puissance d'émetteur appropriés pour les récepteurs PIN.								

Tableau 5c/G.691 – Paramètres spécifiés pour les interfaces optiques des modules STM-64

Code d'application (Tableau 1)	Unité	L-64.1	L-64.2a	L-64.2b	L-64.2c	L-64.3
			(Notes 1, 2)	(Note 1)	(Note 1)	
Emetteur au point de référence MPI-S						
Plage des longueurs d'onde de fonctionnement	nm		1530 à 1565	1530 à 1565	1530 à 1565	1530 à 1565
Puissance injectée moyenne						
– maximale	dBm		+2	13	+2	13
– minimale	dBm		-2	10	-2	10
Caractéristiques spectrales						
– largeur maximale à -20 dB	nm		ffs	ffs	ffs	ffs
– paramètre de modulation, α	rad		ffs	ffs	ffs	ffs
– densité de puissance spectrale maximale	mW/10MHz		ffs	ffs	ffs	ffs
– taux SMSR minimal	dB		ffs	ffs	ffs	ffs
EX minimal	dB		10	8,2	10	8,2
Trajet optique principal, de MPI-S à MPI-R						
Plage d'affaiblissement						
– maximale	dB		22	22	22	22
– minimale	dB		11	16	11	16
Dispersion chromatique						
– maximale	ps/nm		1600	1600	1600	260
– minimale	ps/nm		ffs	ffs	ffs	NA
Compensation passive de dispersion						
– maximale	ps/nm		ffs	NA	NA	NA
– minimale	ps/nm		ffs	NA	NA	NA
DGD maximal	ps		30	30	30	30
ORL mini. de l'installation de câble au point MPI-S, y compris tous les connecteurs éventuels	dB		24	24	24	24
Facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R	dB		-27	-27	-27	-27
Récepteur au point de référence MPI-R						
Sensibilité minimale (taux BER de 1×10^{-12})	dBm		-26	-14	-26	-13
Surcharge minimale	dBm		-9	-3	-9	-3
Pénalité de trajet optique maximale	dB		2	2	2	1
Facteur de réflexion maximale du récepteur, mesuré au point MPI-R	dB		-27	-27	-27	-27
NOTE 1 – L-64.2a utilise une compensation PDC comme DA, L-64.2b utilise une automodulation SPM comme DA, et L-64.2c utilise une prémodulation (<i>prechirp</i>) comme DA.						
NOTE 2 – Se reporter au § 8.3.2 concernant les valeurs et emplacement du compensateur passif de dispersion (PDC).						

Paramètres donnés dans la Rec. UIT-T G.959.1 selon le code PIL1-2D1

Tableau 5d/G.691 – Paramètres spécifiés pour les interfaces optiques des modules STM-64

Code d'application (Tableau 1)	Unité	V-64.2a	V-64.2b	V-64.3
		(Notes 1, 2)	(Note 2)	
Emetteur au point de référence MPI-S				
Plage des longueurs d'onde de fonctionnement	nm	1530 à 1565	1530 à 1565	1530 à 1565
Puissance injectée moyenne				
– maximale	dBm	13	15	13
– minimale	dBm	10	12	10
Caractéristiques spectrales				
– largeur maximale à –20 dB	nm	ffs	ffs	ffs
– paramètre de modulation, α	rad	ffs	ffs	ffs
– densité de puissance spectrale maximale	mW/ 10 MHz	ffs	ffs	ffs
– taux SMSR minimal	dB	ffs	ffs	ffs
EX minimal	dB	10	8,2	8,2
Trajet optique principal, de MPI-S à MPI-R				
Plage d'affaiblissement				
– maximale	dB	33	33	33
– minimale	dB	22	22	22
Dispersion chromatique				
– maximale	ps/nm	2400	2400	400
– minimale	ps/nm	ffs	ffs	NA
Compensation passive de dispersion				
– maximale	ps/nm	ffs	ffs	NA
– minimale	ps/nm	ffs	ffs	NA
DGD maximal	ps	30	30	30
ORL mini. de l'installation de câble au point MPI-S, y compris tous les connecteurs éventuels	dB	24	24	24
Facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R	dB	–27	–27	–27
Récepteur au point de référence MPI-R				
Sensibilité minimale (taux BER de 1×10^{-12})	dBm	–25	–23	–24
Surcharge minimale	dBm	–9	–7	–9
Pénalité de trajet optique maximale	dBm	2	2	1
Facteur de réflexion maximale du récepteur, mesuré au point MPI-R	dB	–27	–27	–27
NOTE 1 – Se reporter au § 8.3.2 concernant les valeurs et emplacement du compensateur passif de dispersion (PDC).				
NOTE 2 – V-64.2a utilise une compensation PDC comme DA et V-64.2b utilise une combinaison d'automodulation SPM et de compensation PDC comme DA.				

8 Approche de technique optique

8.1 Hypothèses de conception

Le présent paragraphe expose les aspects liés à la conception introduits dans la présente Recommandation du fait, par exemple, des amplificateurs optiques et de l'accommodation de la dispersion. On trouvera un exposé général sur les approches de cas le plus défavorable et de conception statistique dans la Rec. UIT-T G.957.

8.2 Non-linéarités

Du fait de l'introduction d'amplificateurs optiques, des puissances optiques suffisamment élevées peuvent être utilisées de sorte que des effets significatifs dus aux non-linéarités optiques peuvent apparaître. On trouvera dans la Rec. UIT-T G.663 un exposé détaillé de ces non-linéarités.

8.3 Adaptation de dispersion

La limite de dispersion usuelle pour les systèmes STM-64 fonctionnant sur une fibre G.652 est d'environ 60 km lorsque l'on utilise un spectre source (limité par sa transformée) idéal. Plusieurs systèmes de la présente Recommandation fonctionnent au-delà de cette limite au moyen de certaines techniques appelées "techniques d'adaptation de dispersion (DA)". Une technique DA est toute méthode utilisée pour appliquer sur un certain type de fibre des distances plus longues que les distances qu'il est possible d'obtenir lorsque l'on utilise un signal idéal à modulation d'intensité. Ces méthodes ne sont utilisées que dans les systèmes STM-64.

Actuellement, la présente Recommandation comprend l'adaptation DA par compensation de dispersion passive (PDC), par modulation autophase (SPM), par prémodulation (PCH, *prechirp*) et par transmission à dispersion (DST, *dispersion supported transmission*). Le choix préférentiel de la méthode est à étudier.

8.3.1 Principe de conception

L'adaptation de dispersion est requise au-dessus de 50 km à 60 km d'une fibre G.652 aux débits de données des modules STM-64. Les systèmes S-64.2 se situent en dessous de cette limite et n'utilisent pas d'adaptation de dispersion (DA). Pour les systèmes L-64.2, on applique une certaine forme de DA pour compenser la dispersion supplémentaire encourue dans la plage de 40 km à 80 km. Cette adaptation de dispersion peut revêtir différentes formes.

Des méthodes actives et passives sont utilisées pour les systèmes L-64.2. La méthode passive utilise une compensation PDC pour compenser la dispersion inhérente à la fibre. Par contre, les méthodes actives (SPM, PCH et DST) taillent les paramètres d'interface de telle sorte que la dispersion est éliminée par équilibrage. Pour les systèmes V-64.2, on ajoute une adaptation DA passive supplémentaire pour compenser les 40 km de fibre supplémentaires.

Dans la pratique, tous les schémas actuellement proposés pour l'adaptation de dispersion compensent la dispersion sur une plage plus restreinte que la plage allant de zéro à la longueur totale de la liaison. Ces systèmes peuvent dépendre de la présence dans la liaison d'une certaine dispersion minimale. C'est pourquoi le paramètre "dispersion chromatique minimale" a été introduit. Lorsque l'on soumet des systèmes de DA à un essai en boucle, il peut être nécessaire, pour certains systèmes, d'introduire une dispersion minimale dans le montage d'essai. Ceci est analogue à l'utilisation d'affaiblisseurs afin de ne pas surcharger un récepteur pendant un essai en boucle.

Toutes les méthodes doivent présenter une compatibilité transversale à l'intérieur de leur code d'application. Toutefois la compatibilité transversale ne peut pas être garantie tant que l'on n'a pas défini les caractéristiques spectrales et les méthodes de mesures. La compatibilité transversale entre des méthodes de DA différentes est à étudier.

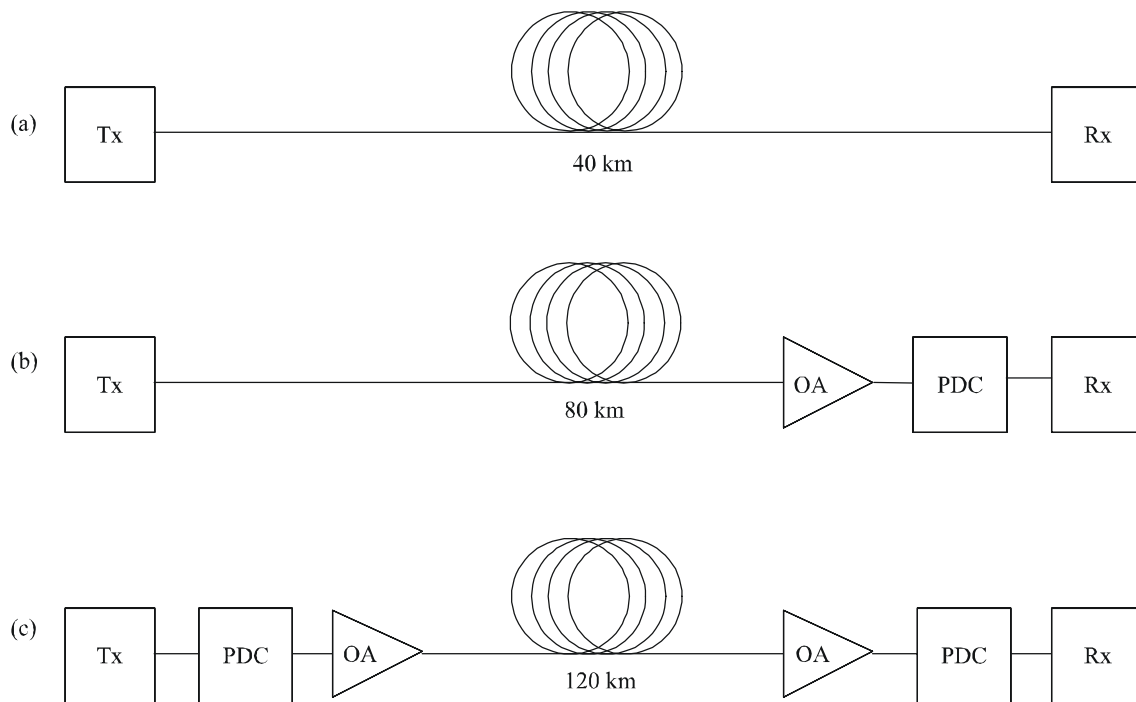
8.3.2 Compensation passive de dispersion

Une méthode pour surmonter la limite de dispersion consiste à ajouter un compensateur passif de dispersion (PDC) à l'émetteur, au récepteur ou aux deux. La présente Recommandation a pour but de couvrir tous les types de compensateurs passifs de dispersion.

On admet implicitement que le compensateur PDC n'est pas inséré dans le trajet principal car la perte par insertion du dispositif (plusieurs dB en l'occurrence) diminuerait la plage d'affaiblissement du système. Par contre, le compensateur PDC est normalement ajouté avant un amplificateur de puissance optique ou après un préamplificateur optique. On utilise le gain des amplificateurs pour compenser la perte par insertion du compensateur PDC sans altérer le bilan de puissance du système.

Cette description n'implique pas de niveau particulier d'intégration de l'émetteur ou du récepteur, c'est-à-dire qu'ils peuvent être réalisés en tant que dispositifs autonomes ou en tant qu'émetteurs ou récepteurs intégrés à amplification optique.

Le principe directeur pour l'utilisation des compensateurs PDC dans les systèmes STM-64 est que les systèmes S à 40 km sont conçus sans accommodation de dispersion. Pour chaque code d'application plus long, à savoir L-64.2 et V-64.2, on ajoute un compensateur PDC par 40 km supplémentaires (se reporter à la Figure 3). La valeur nominale de dispersion pour chaque compensateur PDC est alors de -680 ps/nm à 1550 nm. La valeur exacte et la question de savoir s'il convient que le compensateur PDC crée une surcompensation ou une sous-compensation sont l'objet d'un complément d'étude. En théorie, le compensateur PDC pour un système L-64.2 n'a besoin de compenser que la différence entre la distance cible et la limite de dispersion type. Cependant, cela donnerait de faibles marges de fonctionnement; la présente approche facilite également l'utilisation de blocs de construction d'équipement identiques qui sont employés dans tous les systèmes. Les compensateurs PDC sont spécifiés dans la Rec. UIT-T G.671.



G.691_F3

NOTE – Les valeurs et emplacement du compensateur PDC sont à étudier.

Figure 3/G.691 – Schéma de compensation passive de dispersion pour systèmes sans amplificateurs de ligne

S'il est utilisé du côté émetteur, le compensateur PDC crée une distorsion préalable du signal avant qu'il ne soit envoyé sur le trajet optique. Les diagrammes en œil de l'émetteur, spécifiés au § 6.2.4, ne sont pas alors disponibles au point MPI-S. Si le signal non déformé est disponible, les spécifications relatives aux diagrammes en œil sont valides en ce point. La spécification relative au diagramme en œil au point MPI-S pour les systèmes à distorsion préalable est à étudier.

Etant donné que l'utilisation d'un compensateur PDC du côté émetteur implique l'utilisation d'un amplificateur de puissance optique afin de compenser l'affaiblissement du compensateur PDC, les niveaux de puissance seront suffisamment élevés pour générer une modulation autophase et probablement d'autres effets non linéaires dans le signal. Le compensateur PDC est toutefois un compensateur de dispersion linéaire et une distorsion non linéaire du signal émis peut dégrader la compensation de dispersion linéaire si elle est appliquée à l'émetteur.

Pour le système L-64.2, l'emplacement spécifié du compensateur PDC se trouve donc au niveau du récepteur, ce qui conduit à l'utilisation d'un préamplificateur optique et d'un émetteur non amplifié et fournit un système qui ne fonctionne pas en régime non linéaire.

Pour le système V-64.2, où l'utilisation d'un amplificateur de puissance est nécessaire, il se peut qu'il faille prendre des mesures plus poussées pour garantir que les effets non linéaires ne dégradent pas excessivement la compensation de dispersion linéaire si elle est appliquée du côté émetteur. Cette question est à étudier.

Si un compensateur PDC est placé dans l'installation de fibre, on le considère comme appartenant au trajet et il "convertit" normalement un trajet G.652 en un trajet du type G.653 si la puissance émise est inférieure à environ +10 dBm et le comportement du trajet optique est linéaire. Le système lui-même est considéré être un système X-xx.3, et les codes d'application X-xx.3 fournissent les prescriptions du système relatives à l'affaiblissement du trajet et à la dispersion. La

compensation partielle d'un trajet est considérée comme une technique de raccordement et n'est pas traitée dans la présente Recommandation.

8.3.3 Modulation autophase

La modulation autophase (SPM) utilise l'effet Kerr non linéaire dans la fibre G.652 afin d'obtenir une compression d'impulsion qui augmente la distance de transmission. L'Appendice II fournit une description didactique de la technique.

Etant donné que cette technique exige que le niveau de puissance du signal soit dans le régime non linéaire de la fibre, l'effet de compensation de la dispersion par SPM est provoqué par la puissance émise et se produit dans la fibre de transmission à proximité de l'émetteur, tant que la puissance du signal se trouve au-dessus du seuil de non-linéarité. Lorsque le signal s'est propagé sur une distance de l'ordre de 15 km à 40 km (avec les puissances utilisées dans les systèmes L-64.2 et V-64.2), il a été affaibli de telle sorte qu'il ne se trouve plus dans le régime non linéaire. Le reste de la propagation est donc linéaire. On a ainsi la possibilité de combiner la modulation SPM du côté émetteur avec une compensation PDC du côté récepteur.

La propagation de l'impulsion est également influencée par la modulation (*chirping*) de fréquence de l'impulsion, qui peut être également utilisée pour la compression d'impulsions. Il est donc nécessaire de spécifier le paramètre de modulation. Afin de ne pas surcompenser la dispersion, il convient que le paramètre de modulation (*chirping*) soit proche de zéro lorsque l'on utilise la modulation SPM.

La modulation autophase non linéaire dépend également de la forme de l'impulsion, ce qui peut conduire à différents diagrammes en œil pour les systèmes qui utilisent la modulation SPM par rapport aux systèmes linéaires. Cette question est à étudier.

8.3.4 Prémodulation (*prechirp*)

Une autre méthode utilise la prémodulation (*prechirp*) dans l'émetteur afin d'obtenir un effet de compression de l'impulsion et augmenter ainsi la distance de transmission. Toutefois, dans ce cas, l'utilisation d'un émetteur de puissance élevée produirait simultanément une prémodulation (*prechirp*) et une automodulation SPM. Cette combinaison conduirait à une surcompensation du système pour le code d'application L-64.

Le schéma de prémodulation (*prechirp*) est donc utilisé avec un émetteur de faible puissance et un récepteur optiquement préamplifié. Cela conduit toutefois à des puissances émises nécessaires de -1 dBm, ce qui peut ne pas être facile à obtenir actuellement avec tous les types d'émetteurs. Les paramètres d'interface des émetteurs et des récepteurs pour ce code d'application sont à étudier.

8.3.5 Combinaisons de techniques

La seule combinaison de techniques de DA actuellement spécifiée consiste à utiliser une modulation d'autophase SPM avec un compensateur PDC dans un système V-64.2. La modulation SPM est utilisée pour accommoder la dispersion dans les premiers 80 km, comme dans le système de base fondé sur la modulation SPM du L-64.2b, et les 40 km ajoutés sont entièrement compensés par un compensateur PDC. Cette dernière compensation se produit dans le régime linéaire et il convient qu'elle ne soit pas influencée par la technique non linéaire employée dans la partie initiale de la liaison.

D'une manière similaire, un système DST conçu pour une distance cible de 80 km (DST L-64.2) peut être combinée avec un compensateur PDC dans un système V-64.2 si les 40 km ajoutés sont entièrement compensés par un compensateur PDC.

8.3.6 Transmission à dispersion

Une méthode supplémentaire, la transmission à dispersion (DST), utilise une combinaison de modulation d'intensité et de fréquence au lieu de la modulation d'intensité pour annihiler la

dispersion. L'Appendice III fournit une description didactique et une spécification pour la méthode DST, telle qu'elle est appliquée dans les systèmes L-64.2 et V-64.2.

8.4 Amplificateurs autonomes

Un amplificateur autonome (dispositif amplificateur optique) peut être utilisé dans de nouvelles installations ou comme trajet supérieur. Dans tous les cas, un amplificateur de puissance ou un préamplificateur autonome présente une interface avec le trajet principal, comme le spécifie la présente Recommandation, sur un côté et un système non amplifié (G.957, S-64.x, etc.) sur l'autre côté. Etant donné que l'amplificateur autonome a pour but d'augmenter la distance de transmission, il faut que l'intégrateur du système s'assure que les propriétés du système non amplifié interfacé sont telles qu'il puisse fonctionner sur la distance allongée. Cela peut exiger des plages de longueurs d'onde et des caractéristiques spectrales comme il est suggéré aux § 6.1/G.957 et 6.2.2/G.957 ainsi que des valeurs de paramètres additionnelles en conformité avec la présente Recommandation.

Si le système de départ ne possède pas les propriétés nécessaires pour un fonctionnement sur des longues distances, la fonctionnalité de l'amplificateur autonome peut être étendue pour adapter ces paramètres et les rendre compatibles avec la présente Recommandation. On peut, par exemple, implémenter quelque technique d'adaptation de dispersion comme il est décrit au § 8.3 ou utiliser un transpondeur pour conversion spectrale.

La surveillance des amplificateurs de puissance/préamplificateurs autonomes peut être réalisée par le biais d'une interface électrique avec des équipements SDH ou par le biais d'un accès direct au système de gestion.

8.5 Considérations d'évolutivité

On s'attend à ce que les prescriptions relatives à la capacité de transmission pour les systèmes couverts par la présente Recommandation augmentent dans un futur proche. L'évolutivité est la clé pour traiter cette évolution.

Par amélioration, on entend toute modification apportée aux équipements afin d'augmenter la performance qui ne nécessite pas de nouvelles fibres ou de nouvelles constructions. La plupart des améliorations exigent un remplacement des équipements et, en l'occurrence, l'amélioration est par définition hors service. La commutation de secours peut toutefois être utilisée pour maintenir le système en fonctionnement pendant que des parties spécifiques sont hors service. En général, on ne sacrifie pas la performance du système à l'évolutivité.

La correction d'erreur directe (FEC, *forward error correction*) peut améliorer à la fois le taux d'erreur sur les bits (BER) et la marge supplémentaire du système. Pour les systèmes SDH traités dans la présente Recommandation, seule la correction FEC dans la bande est applicable conformément à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322. Cependant, les valeurs de paramètres optiques spécifiées pour les codes d'application sont applicables lorsque la correction FEC est désactivée. Une modification possible des valeurs de paramètres optiques lorsque la correction FEC est activée est à étudier.

Divers types d'améliorations sont divisés en catégories au § 8.5.1 suivies par des directives relatives aux améliorations au § 8.5.2.

8.5.1 Types d'améliorations

8.5.1.1 Améliorations vers des distances plus grandes

En général, les améliorations vers des distances plus grandes signifient "réutilisation ou remplacement d'équipements" car les distances plus longues nécessitent une distance d'affaiblissement plus longue et des tolérances plus serrées sur les propriétés spectrales, par exemple.

8.5.1.2 Améliorations vers des débits plus élevés

L'extension de la capacité vers un débit plus élevé signifie également un remplacement d'équipements et mène à une interruption du service si aucune mesure supplémentaire n'est prise (commutation de secours, par exemple). A l'intérieur d'une bande de longueurs d'onde, les distances cibles pour des systèmes entre les bureaux sont à des pas égaux dans chaque bande de longueur d'onde (40 km pour la bande de 1550 nm et 20 km pour celle de 1310 nm).

L'Appendice V fournit des informations supplémentaires sur les améliorations vers des systèmes à débit plus élevé.

8.5.1.3 Améliorations pour passer de systèmes monocanaux à des systèmes multicanaux

Une amélioration pour passer d'un système monocanal à un système multicanal est un type d'amélioration hors service avec réutilisation des équipements. Si l'extension de la capacité en service est exigée, il convient d'utiliser un système multicanal dès le départ.

8.5.1.4 Améliorations utilisant des amplificateurs optiques autonomes

Lorsque l'on utilise un amplificateur autonome à des fins d'améliorations, les mêmes considérations qu'au § 8.4 s'appliquent.

8.5.2 Directives relatives aux améliorations

Les améliorations relatives aux systèmes monocanaux et multicanaux sans amplificateurs de ligne peuvent ne pas présenter d'avantage car il est nécessaire de modifier de manière significative l'émetteur et le récepteur à amplification optique ou même de les renouveler en vue d'une amélioration du débit binaire, alors que seules des fibres sont réutilisées.

Les améliorations avec passage de systèmes monocanaux à des systèmes multicanaux peuvent ne pas présenter d'avantage. La raison en est que les philosophies de leur conception sont très différentes du point de vue de plusieurs éléments, y compris la conception et le contrôle d'amplificateur de fibres, le bilan de puissance et, pour ce qui est de la dispersion, la non-linéarité des fibres ainsi que les rapports signal/bruit.

8.6 Considérations de sécurité optique

Se reporter à la Rec. UIT-T G.664 pour les considérations de sécurité optique.

Annexe A

Pénalités de taux d'extinction et de diagramme en œil

A.1 Paramètres de mesure

La spécification de la mesure de diagramme en œil est groupée en deux parties; une pour les interfaces STM-4 et STM-16, et une autre pour les interfaces STM-64.

- i) Pour les modules STM-4/STM-16, on admet implicitement une procédure de mesure de diagramme en œil et un récepteur de référence comme le souligne l'Annexe B/G.957, à savoir un filtre de Bessel-Thomson du quatrième ordre avec les fréquences de coupure appropriées pour le débit binaire en question. Les valeurs de tolérance de ce récepteur de référence sont fournies dans le Tableau A.1.
- ii) Pour le module STM-64 aussi, on admet implicitement une procédure de mesure de diagramme en œil et un récepteur de référence optique comme le souligne l'Annexe B/G.957, à savoir un filtre de Bessel-Thomson du quatrième ordre avec les fréquences de coupure appropriées pour le module STM-64. Pour ce débit, toutefois, la

fonction de récepteur de référence optique est définie comme la réponse en fréquence totale de toute combinaison d'éléments fonctionnels de photodétecteur, de filtre passe-bas et d'oscilloscope, ainsi que de toute interconnexion de ces éléments. Les valeurs des tolérances de cette fonction de transfert sont indiquées dans la dernière colonne (STM-64) du Tableau A.1.

Tableau A.1/G.691 – Valeurs de tolérance de l'affaiblissement du récepteur de référence optique

f/fr	Δa [dB]		
	STM-4	STM-16	STM-64
0,001 à 1	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,85$
1 à 2 (Note)	$\pm 0,3$ à $\pm 2,0$	$\pm 0,5$ à $\pm 3,0$	$\pm 0,85$ à $\pm 4,0$

NOTE – Il convient d'interpoler linéairement les valeurs intermédiaires de Δa sur une échelle de fréquence logarithmique.

La Figure A.1 illustre les pénalités susceptibles de se produire par suite d'imperfections dans le diagramme en œil et dans le taux d'extinction (EX). Dans cette figure, le taux EX est le rapport a/b , et l'ouverture relative de l'œil est le rapport d/c . Dans l'idéal, le taux EX est infini et l'œil est complètement ouvert et symétrique. Toute la puissance optique est alors disponible pour la modulation et les pénalités de taux EX et de diagramme en œil sont égales à 0 dB.

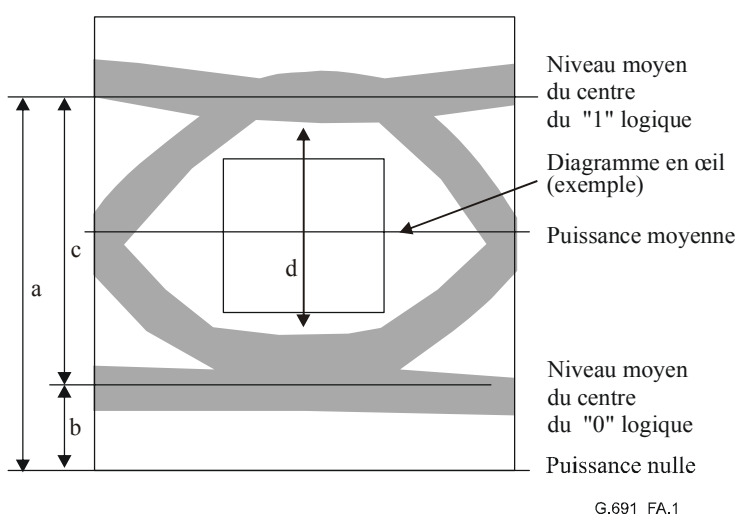


Figure A.1/G.691 – Pénalités de diagramme en œil et de taux d'extinction

A.2 Pénalité de taux d'extinction

Le taux d'extinction conduit à ce qu'une certaine fraction de la puissance optique n'est pas disponible pour la modulation; il correspond à une pénalité de sensibilité du récepteur. La pénalité exacte dépend de l'application ainsi que du choix de l'implémentation du récepteur.

A.3 Pénalité de diagramme en œil

En plus du taux EX limité, l'œil peut être fermé à partir des ses niveaux "0" et "1" moyens du fait d'imperfections du signal transitoire telles que les temps de montée et de descente, la suroscillation, etc. Si l'ouverture relative de l'œil d/c est inférieure à un, une pénalité est encourue. La pénalité de diagramme en œil, P_{EM} peut s'écrire:

$$P_{EM} = 10 \log_{10} \left(\frac{d}{c} \right) \quad [\text{dB}]$$

et correspond à la perte de sensibilité du récepteur par rapport à un signal ayant un œil complètement ouvert.

Etant donné que le taux BER est une fonction à pente extrêmement forte, une imperfection unique peut déterminer le taux BER en entier. Ce sont donc les lignes les plus internes de l'œil (l'œil ouvert) qui déterminent le taux BER. Même des lignes qui sont si rares qu'on ne les visualise pas facilement dans une mesure de diagramme d'œil (du fait de la limitation dans le temps de mesure) peuvent avoir des effets importants sur le taux BER.

Le présent diagramme en œil prévoit une fermeture de l'œil pouvant atteindre 50% de l'ouverture d'œil. La pénalité réelle du système associée à la fermeture de l'œil dépend de l'implémentation du système. Dans une situation donnée, la pénalité de diagramme en œil peut être raisonnablement estimée comme étant l'ouverture d'œil relative (verticale) au point de décision du récepteur.

Afin d'évaluer la pénalité de diagramme en œil, il convient que le filtre de mesure et la procédure de mesure du diagramme en œil correspondent au comportement du récepteur utilisé. Etant donné que cette question n'est pas spécifiée dans le détail, la pénalité de diagramme en œil ne constitue pas une pénalité précise de récepteur. Toutefois, la correspondance est tout à fait bonne en général car la plupart des conceptions de récepteur sont raisonnablement similaires à la procédure de mesure des diagrammes en œil.

A.4 Sensibilité du récepteur

La pénalité de taux d'extinction et celle de diagramme en œil sont additives en dB. Par exemple, si la pénalité de taux EX est de 1,3 dB et celle de diagramme en œil de 3 dB, le signal correspondant au cas le plus défavorable présentera une sensibilité inférieure de 4,3 dB à celle du cas où l'on utilise un récepteur idéal.

Conformément à sa définition, il convient que la sensibilité de récepteur soit mesurée dans les conditions correspondant au cas le plus défavorable. S'il n'en est pas ainsi, une correction de la sensibilité de récepteur du fait d'un mesurage dans des conditions trop favorables peut être estimée à partir du taux EX et de l'ouverture relative d'œil de l'émetteur soumis à l'essai. Cette estimation peut être préférée à un essai avec un signal correspondant strictement au cas le plus défavorable, qui peut être difficile à générer.

Appendice I

Dispersion modale de polarisation

I.1 Distribution statistique de la dispersion modale de polarisation

Comme il est décrit au § 6.3.2.3, le temps de propagation de groupe différentiel (DGD, *differential group delay*) entre les états de polarisation dans une fibre préservant la non-polarisation est une variable aléatoire. On admet souvent que sa distribution est maxwellienne avec la fonction de densité de probabilité suivante:

$$f(\Delta\tau) = 32 \frac{\Delta\tau^2}{\pi^2 \langle \Delta\tau \rangle^3} \exp\left(-\frac{4\Delta\tau^2}{\pi \langle \Delta\tau \rangle^2}\right)$$

où $\Delta\tau$ est le temps DGD, $\langle \Delta\tau \rangle$ est le temps DGD moyen. La Figure I.1 illustre la fonction de densité de probabilité $f(\Delta\tau)$. Toutefois, à un instant donné, le système présentera un temps DGD spécifique, τ , qui est une certaine réalisation de la distribution aléatoire des valeurs de temps DGD, la moyenne étant fournie par la dispersion PMD de la liaison. Un train d'impulsions peut ainsi souffrir d'une différence temporelle supérieure ou inférieure à la dispersion PMD moyenne de la liaison.

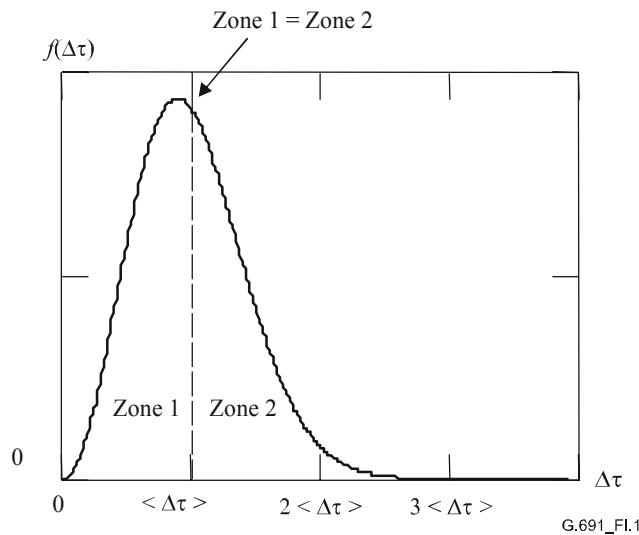


Figure I.1/G.691 – Fonction de distribution de Maxwell (illustration) – Fonction de densité de probabilité $f(\Delta\tau)$ en fonction du temps de propagation de groupe différentiel, $\Delta\tau$

L'intégration de cette fonction de densité de probabilité de $\Delta\tau_1$ à $+\infty$ donne la probabilité $P(\Delta\tau \geq \Delta\tau_1)$:

$$P(\Delta\tau \geq \Delta\tau_1) = \int_{\Delta\tau_1}^{\infty} f(\Delta\tau) d(\Delta\tau)$$

Cette probabilité $P(\Delta\tau \geq \Delta\tau_1)$ est décrite dans la Figure I.2.

Par exemple, si le temps DGD est supérieure à 3 fois la moyenne des temps DGD, $\Delta\tau_1 = 3 \langle \Delta\tau \rangle$, on peut lire sur la Figure I.2 que $P(\Delta\tau \geq 3 \langle \Delta\tau \rangle) \approx 4 \times 10^{-5}$.

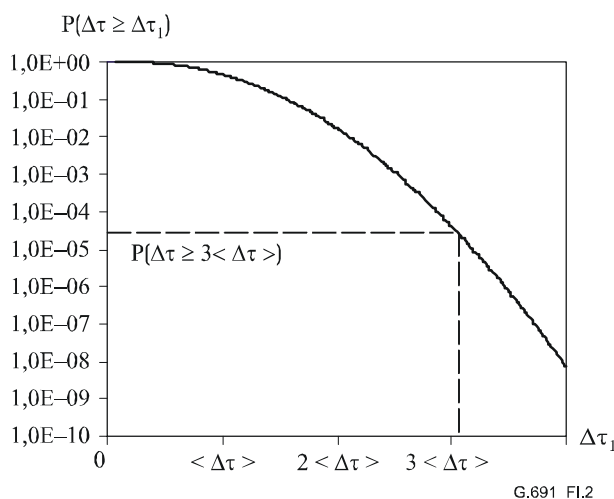


Figure I.2/G.691 – Probabilité $P(\Delta\tau \geq \Delta\tau_1)$

Les variations de temps DGD dépendent des états de polarisation excités dans la fibre, des contraintes dans les différentes parties de la fibre, des variations de température, etc. et, de ce fait, varient plutôt lentement. En admettant que le temps DGD met un jour à changer de manière significative, la probabilité ci-dessus correspond à une période de 70 ans entre les instances où la dispersion PMD augmente pour atteindre trois fois la valeur de sa moyenne.

Toutefois, la durée caractéristique des variations de PMD est fortement influencée par l'environnement de la fibre et, par exemple, les câbles aériens peuvent avoir des durées de variation plus courtes. Si, par contre, on admet que la durée caractéristique est d'une minute, la dispersion PMD montera à trois fois sa moyenne environ une fois tous les 17 jours.

La "durée d'interruption" pendant laquelle la pénalité de chemin due à la dispersion PMD est élevée sera également de l'ordre de la durée caractéristique, à savoir respectivement un jour et une minute dans les deux exemples précédents.

I.2 La pénalité de trajet due à la dispersion modale de polarisation (PMD)

Etant donné que la dispersion PMD est une propriété de la fibre, elle ne peut pas être spécifiée dans la présente Recommandation. Par contre, il y est pris en compte la quantité totale de PMD dans la liaison qui correspond à la pénalité de trajet de cas le plus défavorable de 1 dB. Le cas le plus défavorable est fondé sur un temps DGD d'une période de 0,3 bit conjointement à l'hypothèse que tous les deux états principaux de polarisation (PSP, *principal state of polarization*) portent la même puissance optique.

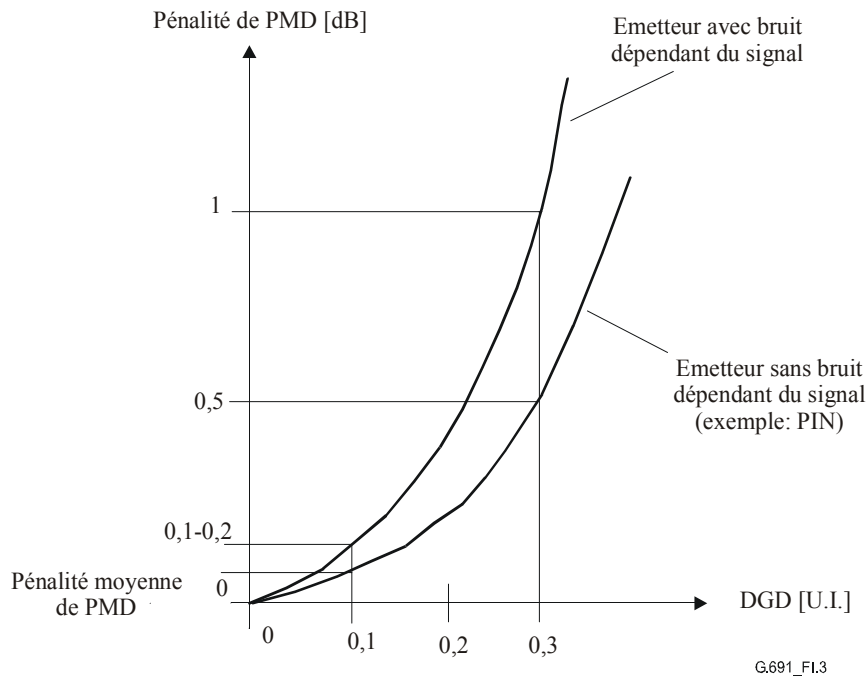


Figure I.3/G.691 – Pénalité de récepteur en fonction du temps DGD réel (illustration)

On admet une fonction de distribution de Maxwell pour le temps DGD (se reporter à la Figure I.1). La relation entre le temps DGD (en coïncidence directe avec l'élargissement de la largeur de l'impulsion du signal induite par la dispersion PMD si on suppose la même puissance optique dans les deux états PSP) et la pénalité de chemin correspondante est une caractéristique du récepteur et elle est illustrée dans la Figure I.3. Moyennant des hypothèses réalistes et un récepteur bien conçu, on peut déduire qu'un temps DGD réel d'une période de 0,3 bit (et 50% de puissance optique dans les deux états PSP) fournira une pénalité d'environ 0,5 dB pour un récepteur avec un bruit indépendant du signal (récepteur PIN) pouvant atteindre 1 dB pour un récepteur avec un bruit dépendant du signal (photodiode APD ou préamplificateur).

La dispersion de fibre PMD maximale admissible correspondante dépend de plusieurs éléments dont:

- la distribution statistique du temps de propagation de groupe différentiel (DGD);
- la probabilité tolérable que la pénalité puisse être supérieure à 0,5 dB (PIN) ou à 1 dB (par exemple une photodiode APD);
- la corrélation entre les fluctuations spatiales des états PSP et les fluctuations du temps DGD;
- l'orientation de l'état de polarisation (SOP, *state of polarization*) d'entrée de la lumière émise par l'émetteur laser, par rapport à l'orientation des états PSP.

Une corrélation réaliste entre la dispersion PMD admissible maximale et l'impulsion maximale du signal avec élargissement est à étudier. Une première estimation peut être déduite avec l'exemple illustratif suivant: une dispersion PMD maximale d'une période de 0,1 bit indique une probabilité de 4×10^{-5} pour une pénalité de trajet plus grande qu'un 1 dB (se reporter aux Figures I.2 et I.3). Toutefois, on s'attend à ce que sa probabilité soit bien inférieure à 4×10^{-5} pour une pénalité de trajet >1 dB dans cet exemple pour la raison suivante: lorsque le temps DGD est modifié (par une contrainte ou par une variation de température, par exemple), l'orientation spatiale des états PSP est en général également modifiée. En conséquence, l'orientation de l'état de polarisation (SOP)

d'entrée de la lumière de l'émetteur laser par rapport à l'orientation des états PSP sera modifiée. Donc, les états PSP en fluctuations spatiales ne porteront généralement pas la même puissance optique, ce qui aboutit à une pénalité moindre au niveau du récepteur (car la probabilité de 4×10^{-5} n'est valable que dans l'hypothèse d'une puissance égale dans les deux états principaux de polarisation (PSP)). Il est vraisemblable qu'une probabilité tolérable de 4×10^{-5} pour une pénalité de trajet plus grande qu'un 1 dB permettra une dispersion PMD maximale supérieure à une période de 0,1 bit et vice versa.

Appendice II

Description de la modulation autophase comme accommodation de la dispersion

II.1 Fondamentaux de la modulation autophase (SPM)

Lorsque l'on utilise des émetteurs de haute puissance, tels que les systèmes de transmission à longue distance sans répéteur, des effets non linéaires tels que la modulation d'autophase (SPM) jouent un rôle important dans la qualité de transmission. Dans les systèmes à modulation d'intensité, une modulation de l'indice de réfraction de la fibre optique est introduite à des puissances d'émission élevées, donnant naissance à des indices de réfraction différents dans un "1", comparé à un "0" dans les bits. On appelle "effet Kerr" la modulation de l'indice de réfraction par modification des niveaux de puissance.

La variation d'intensité optique d'une impulsion donnée module l'indice de réfraction de la fibre qui, à son tour, conduit à une modulation de la phase de l'onde optique. C'est le procédé appelé "modulation d'autophase" (SPM). La dérivée de la phase par rapport au temps est la fréquence et le signal optique présentera un écart asymétrique de fréquence par rapport à son point milieu de sorte que les composantes spectrales du front montant de l'impulsion subissent un décalage de fréquence vers le bas (décalage vers le rouge) alors que les composantes spectrales au front descendant de l'impulsion subissent un décalage de fréquence vers le haut (décalage vers le violet).

Dans la fibre G.652 à 1550 nm, les composantes décalées vers le rouge se déplacent plus lentement alors que celles décalées vers le violet se déplacent plus vite les unes par rapport aux autres. La vitesse de propagation des composantes spectrales vers l'arrière de l'impulsion est donc plus rapide que celle des composantes spectrales à l'avant. Ce phénomène conduit à une réduction de l'effet net de la dispersion chromatique (ou compression d'impulsion) et retarde le début de la limitation de distance de la transmission induite par la dispersion chromatique.

Le décalage maximal de phase introduit par la modulation SPM est proportionnel à la puissance optique injectée par l'émetteur et inversement proportionnel au coefficient d'atténuation et à la surface efficace du coeur de la fibre de transmission.

II.2 Modulation autophase comme technique d'accommodation de la dispersion

La compression d'impulsion obtenue par la modulation SPM annihile l'élargissement de l'impulsion provoquée par la dispersion de la fibre. C'est donc que la modulation SPM peut être utilisée comme technique d'adaptation de dispersion (DA). La SPM utilisée comme technique d'adaptation de dispersion dépend des paramètres suivants: la puissance de sortie d'émetteur, le coefficient d'atténuation de la fibre, la surface du coeur de la fibre, l'indice de non-linéarité de la fibre, la longueur d'onde de l'émetteur, la prémodulation (*prechirp*) de l'émetteur et la dispersion chromatique de la fibre.

Dans les systèmes de 10 Gbit/s avec une distance cible de 80 km et avec des fibres à dispersion non décalée, la modulation SPM peut être utilisée comme une technique d'adaptation de dispersion avec des puissances de sortie d'émetteur jusqu'à +17 dBm, et, avec des fibres à dispersion décalée, jusqu'à +13 dBm et une pénalité inférieure à 1,5 dB.

II.3 Rupture de SPM

Il existe une limite supérieure à la puissance de sortie d'émetteur et elle est fournie par la rupture de SPM. Le niveau de puissance de rupture de SPM est défini comme la puissance émise pour laquelle le front avant et le front arrière d'une impulsion coïncident. Si la puissance émise est augmentée au-dessus du niveau de rupture de SPM, elle provoque une augmentation considérable de pénalité.

Les paramètres dominants dans la détermination du niveau de puissance de rupture de SPM sont les temps de montée et de descente ainsi que le taux d'extinction. Ces deux paramètres servent à contrôler la dérivée par rapport au temps de la puissance optique et donc la modulation SPM. Les autres paramètres (par exemple le coefficient d'affaiblissement de la fibre, la surface efficace du cœur de la fibre, etc.) ont une influence mineure sur la puissance de rupture de SPM par rapport à ces paramètres.

II.4 Valeurs de paramètres optiques pour les applications

Conformément au principe de la modulation de phase pour les systèmes STM-64, une description du comportement spectral plus précise que la valeur de la largeur spectrale pure du signal optique émis est en principe requise. Le paramètre supplémentaire le plus important est la modulation (*chirp*) de la source, principalement décrit comme le paramètre α dans le cas des sources à modulation directe. Il faut noter que si cette valeur est spécifiée, cela doit être fait non seulement pour le fonctionnement d'un signal faible mais aussi pour celui d'un grand signal dans le régime optique non linéaire des fibres.

Il existe des méthodes de mesure de ce paramètre. Cependant, la méthode la plus simple consiste à mesurer le comportement en transmission en association avec le trajet optique correspondant. Cela signifie, en principe, qu'il n'est pas réellement nécessaire de spécifier ce paramètre mais qu'il est nécessaire de spécifier un tableau où les valeurs du récepteur et de l'émetteur sont prises en considération en même temps que le trajet. C'est donc que le comportement spectral de l'émetteur est défini indirectement en association avec la sensibilité du récepteur et les caractéristiques du trajet, à savoir la dispersion et l'affaiblissement, en l'occurrence.

II.5 Type de source

Le type de source optique pour signaux à modulation d'intensité des types L et V de 10 Gbit/s peut normalement être un laser indirectement modulé, où des implémentations de Mach-Zehnder ou de modulateur d'électro-absorption peuvent être utilisées. Intégré avec l'émetteur optique, un amplificateur de puissance est normalement utilisé pour atteindre les puissances d'émission nécessaires. Toutefois, les implémentations ne sont pas objet de normalisation et les seules valeurs pertinentes sont celles qui sont spécifiées dans les Tableaux 4 et 5. Outre ces valeurs, la définition du diagramme en œil est nécessaire afin d'obtenir la compatibilité transversale.

II.6 Diagramme en œil

Il convient de spécifier sous forme d'un diagramme en œil la caractéristique générale de forme de l'impulsion émise, y compris les temps de montée et de descente ainsi que la suroscillation et la sous-oscillation de l'impulsion qu'il convient de maîtriser afin d'éviter la dégradation. Ce diagramme en œil est valide au point de référence MPI-S.

II.7 Récepteur

On peut utiliser des implémentations de récepteur à détection directe pour ces systèmes qui implémentent un schéma de modulation d'intensité. Toutefois, cette implémentation n'est pas objet de normalisation. Les valeurs requises de sensibilité et de facteur de réflexion sont indiquées dans les Tableaux 4 et 5.

Appendice III

Adaptation de dispersion à l'aide de transmission à dispersion (DST)

III.1 Introduction

La transmission à dispersion (DST) est une technique active d'adaptation de dispersion (DA) technique. L'émetteur génère un signal optique qui comprend une modulation appropriée de la fréquence optique. La dispersion chromatique d'une fibre de transmission est utilisée pour convertir la modulation de fréquence optique en une modulation d'intensité au niveau du récepteur. En utilisant cet effet, la transmission au-delà de la limite de dispersion type (pour la modulation ASK classique avec un spectre de source idéal limité par sa transformée) est possible. Le présent appendice traite d'une description didactique de la technique de DST ainsi que des paramètres et valeurs des systèmes DST.

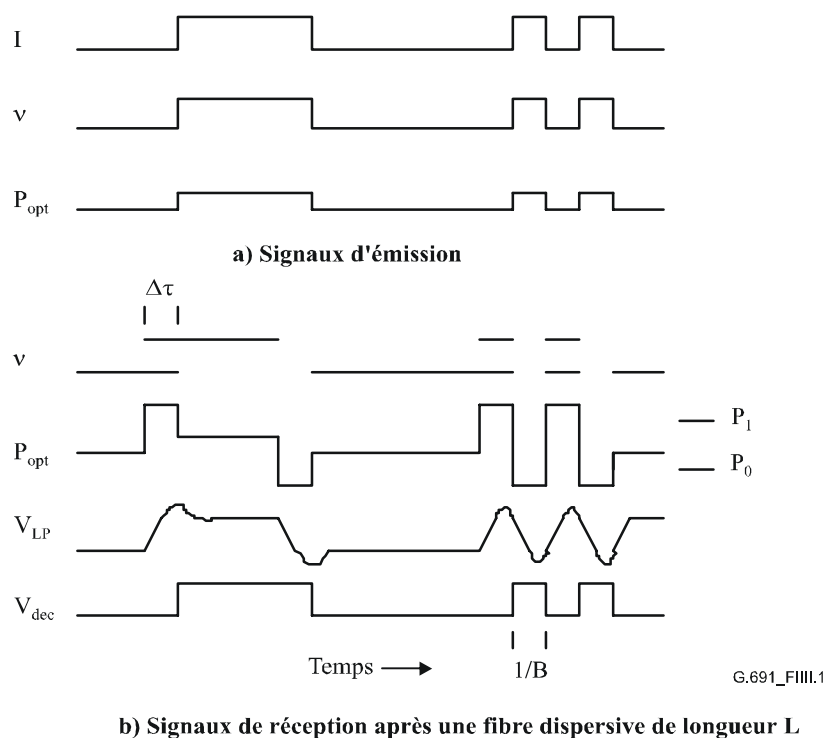
III.2 Principe de la technique de transmission à dispersion (DST)

L'émetteur optique génère un signal de sortie optique à modulation FSK/ASK (ou à modulation optique FSK pure) dans le nouveau schéma de transmission. La fibre dispersive est utilisée pour convertir la partie à modulation FSK du signal, du côté émetteur, en une partie à modulation ASK du signal du côté récepteur. Puis le signal complet à modulation est détecté par le récepteur optique.

Au moyen du signal binaire entrant, la fréquence optique ν est commutée entre deux valeurs avec le décalage de fréquence $\Delta\nu$, qui correspond au décalage de longueur d'onde: $\Delta\lambda = \Delta\nu\lambda^2/c$. En raison de la dispersion de la fibre, les différentes composantes du signal avec des longueurs d'onde différentes arrivent à des instants différents à la sortie de la fibre de longueur L . La différence temporelle $\Delta\tau$ est donnée par $\Delta\tau = \Delta\lambda D L$. Un signal de niveau 4 (ou 3) est généré du côté récepteur. Le signal d'origine peut être récupéré par:

- a) un filtre passe-bas et un circuit de décision à seuil unique;
- b) une détection à double seuil avec les seuils P_1 et P_0 et une mémoire.

Dans la Figure III.1, le principe "transmission à dispersion" est illustré pour des signaux d'émission a) et des signaux de réception b), où I désigne l'impulsion de synchronisation d'émission, ν la fréquence optique, P_{opt} la puissance d'entrée optique, V_{LP} la tension à la sortie du filtre passe-bas (LP, *low-pass filter*) et V_{dec} la tension à la sortie du circuit de décision.



**Figure III.1/G.691 – Principe de la transmission à dispersion;
transmission optique à modulation FSK/ASK**

Le principe de la transmission à dispersion (DST) peut également être décrit à l'aide de l'analyse de faibles signaux dans le domaine de fréquence: la modulation adiabatique (modulation de fréquence optique) du signal optique émis en combinaison avec l'effet de la dispersion chromatique de la fibre aboutit à une caractéristique de transfert du type passe-haut pour les basses fréquences. La réponse peut être égalisée dans le domaine électrique à l'aide, par exemple, d'un filtre passe-bas ("filtre DST") dans le récepteur.

III.3 Diagramme en œil de récepteur optique après une transmission par fibre dispersive

Contrairement à un diagramme en œil de récepteur à 2 niveaux pour un signal optique pur à modulation ASK, un signal optique pur à modulation FSK présente un diagramme en œil de récepteur à 3 niveaux et un signal à modulation combinée FSK/ASK un diagramme en œil de récepteur à 4 niveaux après une transmission par fibre dispersive comme l'indiquent respectivement les Figures III.2 a) et b).

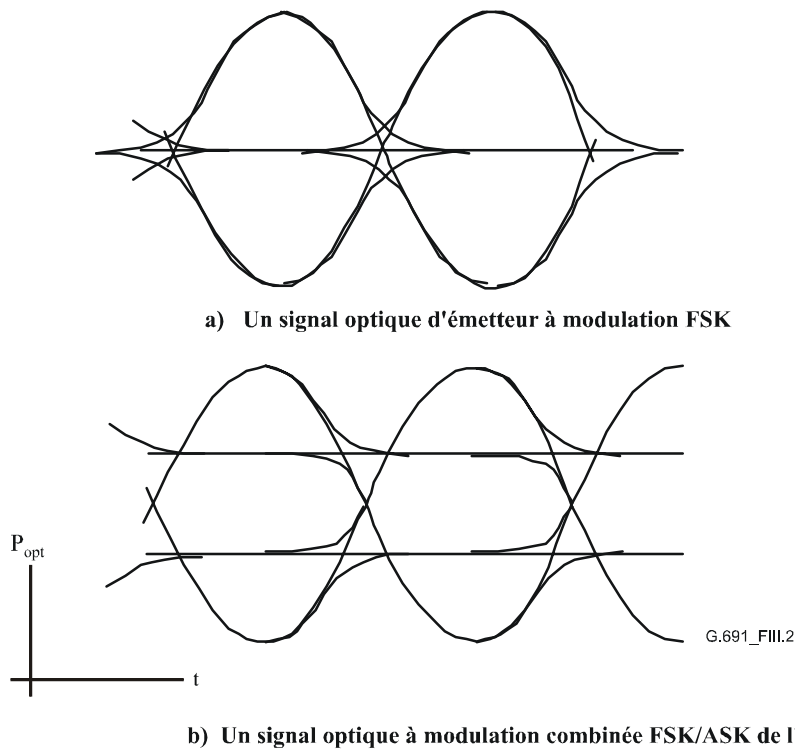


Figure III.2/G.691 – Diagrammes en œil de récepteur après une fibre dispersive

III.4 Définitions des paramètres

Seuls les paramètres dont les définitions s'appliquent exclusivement à la transmission à dispersion (DST), ou qui autrement appellent des commentaires, sont définis ici. D'autres paramètres sont définis au § 6 et s'appliquent totalement à la méthode DST si aucune autre définition n'est fournie dans le présent paragraphe.

III.4.1 Emetteur au point de référence MPI-S

III.4.1.1 Déviation de fréquence

La déviation de fréquence sert à assurer que le signal émis présente la quantité appropriée de modulation de fréquence optique pour la plage de transmission en question.

La déviation de fréquence $\Delta\nu$ d'un signal optique émis au point de référence MPI-S est définie par $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_0$, où ν_1 est la fréquence optique ν pendant la transmission d'un signal représentant un symbole logique "1" (ce qui correspond également à une puissance optique élevée) et ν_0 est la fréquence optique pendant la transmission d'un signal représentant un symbole logique "0" (ce qui correspond également à une puissance optique basse).

III.4.1.1.1 Méthode de mesure

On peut appliquer le montage de mesure décrit dans l'Appendice IV. Les variables $V^+(t)$ et $V^-(t)$ sont évaluées comme il est décrit dans l'Appendice IV. La modulation de fréquence à résolution temporelle $\nu_c(t) = \nu(t) - \nu_r$ est donnée par:

$$\nu_c(t) = (2\pi)^{-1} \text{FSR} \arcsin\left(\frac{V^-(t)}{V^+(t)}\right)$$

$\nu_c(t)$ est calculée et représentée graphiquement avec $P(t)$, comparer avec la Figure IV.4

$v_1 - v_r$ est évaluée à partir de $v_c(t)$ au milieu du troisième bit de l'octet A1 (11110110)

$v_{\tilde{0}} - v_r$ est évaluée à partir de $v_c(t)$ au milieu du dernier bit de l'octet A2 (00101000)

La déviation de fréquence est évaluée à partir de $\Delta v = v_1 - v_{\tilde{0}} = (v_1 - v_r) - (v_{\tilde{0}} - v_r)$.

(Une autre évaluation de la déviation de fréquence à l'aide du schéma d'essai illustré dans la Figure II.1/G.957 est l'objet d'un complément d'étude.)

III.4.1.2 Diagramme en œil de l'émetteur

Quant aux systèmes à modulation IM pure, le diagramme en œil de l'émetteur est utilisé pour spécifier des caractéristiques et dégradations de la forme des impulsions émises. Etant donné que les systèmes DST utilisent les deux techniques de modulation d'intensité et de modulation de fréquence pour acheminer les informations, on utilise deux techniques de mesure de diagramme en œil afin de caractériser le signal d'émission optique au point de référence MPI-S.

III.4.1.2.1 Diagramme en œil IM

La définition du diagramme en œil IM spécifie la partie à modulation d'intensité du signal et elle est identique à la définition et à l'utilisation du diagramme en œil IM indiquée au § 6.2.4. Le Tableau III.1 ci-après fournit des valeurs pour le diagramme en œil IM tel que défini au § 6.2.4, Figure 2:

Tableau III.1/G.691 – Valeurs de diagramme en œil IM pour les systèmes DST

Diagramme en œil IM pour les modules STM-64 (DST)	
x_1/x_4	–
x_2/x_3	–
x_3-x_2	0,2
y_1/y_2	0,3/0,6

III.4.1.2.2 Diagramme en œil FM/IM

Le diagramme en œil FM/IM a la fonction correspondante pour la modulation de fréquence utilisée afin d'annihiler la dispersion de la liaison. Pour visualiser également la partie FM du signal, le test de diagramme FM/IM inclut une conversion spécifiée FM en IM et une réponse en fréquence spécifiée pour le récepteur de référence dans le montage de mesure du diagramme en œil. Le montage de mesure du diagramme en œil FM/IM est décrit ci-après.

Le montage de mesure est similaire au montage décrit dans la Figure B.1/G.957. De plus, le nouveau montage de mesure comprend:

- i) un élément dispersif qui présente une dispersion chromatique équivalant à une longueur définie de fibre conformément à la Rec. UIT-T G.652;
- ii) un préamplificateur optique pour la compensation de l'affaiblissement de l'élément dispersif.

Les équipements supplémentaires i) et ii) sont situés entre l'émetteur soumis à l'essai et l'entrée optique du récepteur de référence. La fonction de transfert $H(p)$ du récepteur de référence optique est définie par (se reporter à la Figure B.2/G.957):

$$H(p) = \frac{U_0}{2U_2}$$

Pour la mesure du diagramme en œil FM/IM, on utilise la fonction de transfert suivante du récepteur de référence:

$$H = H_B \cdot H_D$$

où H_B représente une réponse de Bessel-Thomson du quatrième ordre conformément à l'Annexe B/G.957 et H_D un filtre passe-bas du premier ordre donné par:

$$H_D = \left(1 + j \frac{f}{f_g}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{f_r}{f_g} p\right)^{-1} = \left(1 + 0,75 \frac{f_0}{f_g} p\right)^{-1} = \left(1 + \frac{0,75}{2,114} \frac{f_0}{f_g} y\right)^{-1}$$

où:

$$p = j \frac{\omega}{\omega_r}, y = 2,114 p, \omega_r = 1,5\pi f_0, f_0 = \text{débit binaire}, f_r = 0,75 f_0$$

avec une fréquence de coupure f_g .

Ce filtre peut être réalisé sous forme matérielle. En variante, on propose de réaliser ce filtre sous forme logicielle en utilisant par exemple un PC ou un analyseur de diagramme en œil; cette question est à étudier.

Le Tableau III.2 ci-après fournit les valeurs caractéristiques de l'élément dispersif ayant une dispersion chromatique équivalant à une longueur définie de fibre conformément à la Rec. UIT-T G.652 ainsi que la fréquence de coupure du filtre du récepteur f_g utilisée dans le montage de mesure:

Tableau III.2/G.691 – Valeurs de filtres DST

	Unité	DST L-64.2/1	DST L-64.2/2	DST V-64.2
Fréquence de coupure du filtre	MHz	2500	2500	1400
Longueur équivalente de fibre (Rec. UIT-T G.652)	km	80	80	120

Après conversion du signal dans l'élément dispersif et incorporation de la réponse en fréquence modifiée du récepteur de référence pour la mesure du diagramme en œil, la définition et la procédure sont identiques à la définition et à l'utilisation du diagramme en œil IM indiquées au § 6.2.4.

Des valeurs de diagramme en œil FM/IM sont indiquées dans le Tableau III.3:

Tableau III.3/G.691 – Valeurs de diagramme en œil FM/IM pour systèmes DST

Diagramme en œil FM/IM pour STM-64 (DST)	
x_1/x_4	–
x_2/x_3	–
x_3-x_2	0,2
y_1/y_2	0,3/0,6

III.4.2 Récepteur au point de référence MPI-R

III.4.2.1 Sensibilité minimale

La sensibilité du récepteur est définie comme étant la valeur minimale acceptable de la moyenne de la puissance reçue au point MPI-R afin d'obtenir un taux d'erreur sur les bits (BER) de 1×10^{-12} . Dans les systèmes DST, la définition de la sensibilité du récepteur inclut un élément dispersif entre les points MPI-S et MPI-R. La dispersion chromatique de cet élément dispersif est égale à la dispersion chromatique minimale définie pour la distance cible considérée et les valeurs sont fournies dans le Tableau III.4. Toutes les autres prescriptions relatives à la sensibilité du récepteur, comme au § 6.4.1, s'appliquent également au récepteur DST.

Dans le corps principal de la présente Recommandation, il n'est pas fourni de détails sur la réalisation du récepteur, comme par exemple une spécification pour une fonction spécifique de transfert d'un filtre. Seule la fonction de transfert de filtre pour le montage de mesure du diagramme en œil d'émetteur est normalisée dans l'Annexe B/G.957. Cela n'implique pas que le récepteur optique dans le système de transmission possède la même fonction de transfert de filtre.

La même stratégie s'applique pour les systèmes DST: seules les fonctions de transfert de filtre des récepteurs de référence pour les mesures de diagramme en œil d'émetteur sont normalisées. La fonction de transfert de filtre dans le récepteur optique du système de transmission n'est pas l'objet de normalisation. Toutefois, on peut appliquer un filtre passe-bas dans le récepteur et également utiliser une approche différente avec un circuit de décision spécialisé capable de détecter des diagrammes en œil de niveau multiple.

III.4.2.2 Pénalité de trajet optique maximale

La définition de la pénalité de trajet est fournie au § 6.4.3. Cette définition est également appliquée aux systèmes DST, en tenant compte de la définition de la sensibilité du récepteur pour les systèmes DST indiquée précédemment.

III.5 Valeurs de paramètres optiques

Des valeurs de paramètre optiques sont indiquées dans le Tableau III.4.

Tableau III.4/G.691 – Valeurs de paramètres pour les interfaces optiques STM-64 qui utilisent la transmission à dispersion (DST)

Code d'application	Unité	DST L-64.2/1	DST L-64.2/2	DST V-64.2
Emetteur au point de référence MPI-S				
Plage des longueurs d'onde de fonctionnement	nm	1530 à 1565	1530 à 1565	1530 à 1565
Puissance injectée moyenne				
– maximale	dBm	3	13	17
– minimale	dBm	0	10	14
Caractéristiques spectrales				
– paramètre de modulation maximal α	rad	3,5	3,5	3,5
– déviation de fréquence maximale	GHz	8	8	6
– déviation de fréquence minimale	GHz	7	7	5
– densité de puissance spectrale maximale	mW/MHz	0,02	0,02	0,02
– taux SMSR minimal	dB	35	35	35

Tableau III.4/G.691 – Valeurs de paramètres pour les interfaces optiques STM-64 qui utilisent la transmission à dispersion (DST)

Code d'application	Unité	DST L-64.2/1	DST L-64.2/2	DST V-64.2
EX minimal	dB	3	3	2
Trajet optique principal, de MPI-S à MPI-R				
Plage d'affaiblissement				
– maximale	dB	22	22	33
– minimale	dB	11	16	22
Dispersion chromatique				
– maximale	ps/nm	1600	1600	2400
– minimale	ps/nm	800	800	1600
Compensation passive de dispersion				
– maximale	ps/nm	NA	NA	NA
– minimale	ps/nm	NA	NA	NA
Temps DGD maximal	ps	30	30	30
ORL mini. de l'installation de câble au point MPI-S, y compris tous les connecteurs éventuels	dB	24	24	24
Facteur de réflexion discret maximal entre les points MPI-S et MPI-R.	dB	-27	-27	-27
Récepteur au point de référence MPI-R				
Sensibilité minimale	dBm	-24	-14	-21
Surcharge minimale	dBm	-8	-3	-5
Pénalité de trajet optique maximale	dB	2	2	2
Facteur de réflexion maximale du récepteur, mesuré au point MPI-R	dB	-27	-27	-27

Appendice IV

Mesure du paramètre de modulation α du signal optique émis

Cette méthode de mesure du paramètre de modulation α est fondée sur la mesure directe dans le domaine temporel de la puissance et de la déviation de fréquence du signal optique émis.

IV.1 Montage de mesure

Le montage recommandée pour la mesure du paramètre de modulation est basé sur un interféromètre optique à deux faisceaux (par exemple: un interféromètre de Michelson ou de Mach-Zehnder), un convertisseur optique à large bande et un oscilloscope numérique à large bande (se reporter à la Figure IV.1).

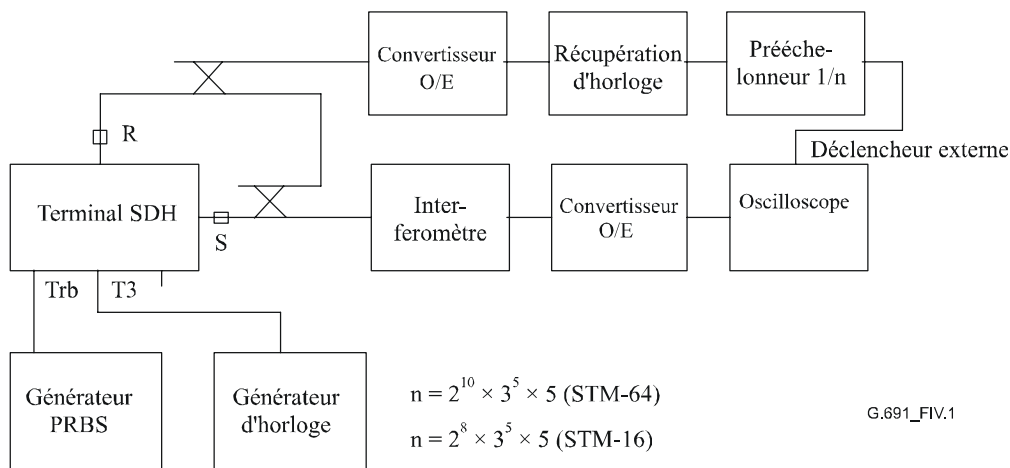


Figure IV.1/G.691 – Montage de mesure

La sortie optique de l'émetteur soumis à l'essai est connectée, au point de référence S, à un interféromètre à deux faisceaux. La sortie de l'interféromètre est connectée au convertisseur optique et le signal électrique en sortie du convertisseur est enregistré par un oscilloscope numérique à large bande. L'oscilloscope est déclenché par un signal de synchronisation de trame généré en prééchantonnant une horloge récupérée du signal reçu optiquement.

Afin de maintenir l'émetteur en marche pendant la mesure, une fraction de la lumière dirigée vers l'interféromètre est couplée à l'accès du récepteur optique des équipements d'émetteur. Un générateur de données PRBS $2^{23}-1$ est relié aux ports tributaires, qui sont configurés en mode de bouclage.

IV.2 Prescriptions techniques relatives aux équipements de mesure

Interféromètre à deux faisceaux

Intervalle spectral libre (FSR, *free spectral range*): au moins quatre fois plus grand que la modulation de l'émetteur.

Emetteur

Longueur d'onde de décalage: réglable. La plage doit être supérieure ou égale à l'intervalle spectral libre de l'interféromètre.

Il faut que l'interféromètre à deux faisceaux ait un circuit de commande qui le verrouille au signal d'entrée. Il convient que ce circuit de commande permette le verrouillage de l'interféromètre au signal d'entrée au point de quadrature A ainsi qu'au point de quadrature B (se reporter à la Figure IV.2).

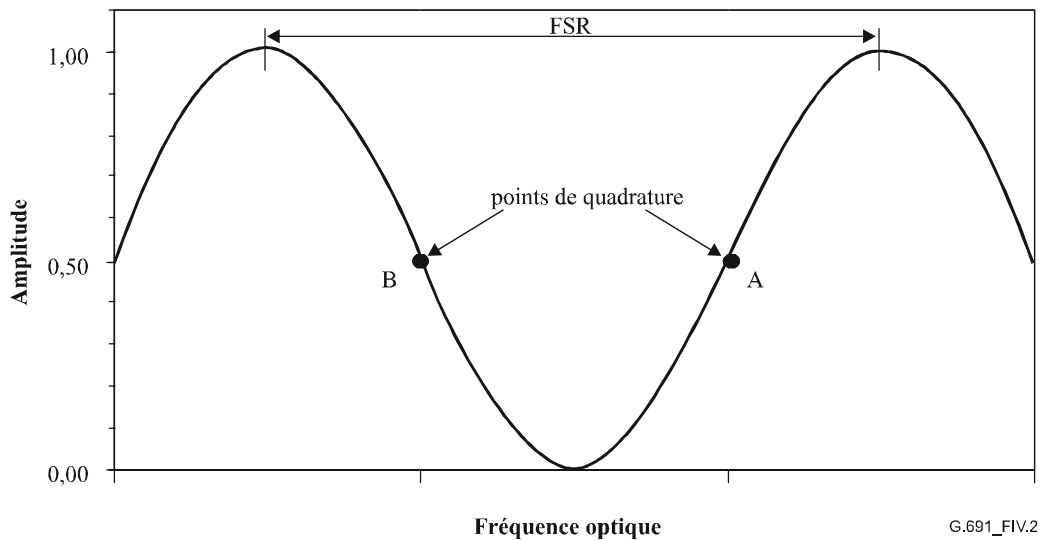


Figure IV.2/G.691 – Croquis de la fonction de transfert pour l'interféromètre à deux faisceaux, indiquant les points de quadrature A et B et définissant l'intervalle spectral libre

Réponse en fréquence combinée pour le convertisseur optique et l'oscilloscope

Basse fréquence de coupure à -3 dB: <100 kHz

Haute fréquence de coupure à -3 dB: >20 GHz

L'oscilloscope doit avoir une capacité de mémorisation d'au moins quatre courbes et doit pouvoir appliquer des fonctions mathématiques avancées sur ces courbes ou avoir la capacité de transférer les courbes de données mesurées à un ordinateur en vue d'un traitement plus poussé.

IV.3 Etalonnage

L'intervalle spectral libre de l'interféromètre est déterminé par le temps t_d lié aux deux trajets optiques présents à l'intérieur de l'interféromètre:

$$FSR = \frac{1}{t_d}$$

t_d peut être mesuré directement en détectant la différence temporelle d'arrivée des données depuis chaque faisceau à l'aide d'un oscilloscope ou il peut être mesuré indirectement à l'aide d'une règle et en calculant l'écart. On peut également trouver l'intervalle spectral libre en mesurant la fonction de transfert de l'interféromètre à l'aide d'un analyseur de composantes d'une onde lumineuse. Le premier zéro dans la fonction de transfert se produit à une fréquence égale à $FSR/2$.

Le point de quadrature de l'interféromètre est réglé pour correspondre à la longueur d'onde d'émission en réglant avec précision l'intervalle spectral libre. La position exacte est identifiée en suivant la puissance moyenne du signal d'émission SDH à travers l'interféromètre comme une fonction du réglage précis de l'intervalle spectral libre. Le point de quadrature est l'endroit où la puissance moyenne à travers l'interféromètre est à mi-chemin entre la puissance maximale et la puissance minimale sur une échelle linéaire. L'interféromètre doit être verrouillé au signal d'émission en cet endroit.

IV.4 Procédure de mesure

- 1) Disposer les équipements comme indiqué dans la Figure IV.1. Appliquer au signal au niveau du récepteur un affaiblissement suffisant pour éviter la surcharge.

- 2) Configurer l'entrée tributaire de l'émetteur dans le mode de bouclage et connecter le générateur PRBS au premier port tributaire.
- 3) Synchroniser l'émetteur avec l'horloge récupérée en configurant la source de temporisation pour obtenir le signal composite en tant que T3 (entrée d'itérateur périphérique).
- 4) Etalonner l'interféromètre à deux faisceaux conformément au § IV.3. Verrouiller l'interféromètre au point de quadrature A.
- 5) Régler le temps de propagation sur l'oscilloscope numérique jusqu'à ce que les octets de verrouillage de trames A1 A2 de la redondance SDH soient affichés sur l'oscilloscope. Enregistrer la courbe de la transition de l'octet A1 à A2 (11110110 à 00101000) et mémoriser la courbe comme $V_A(t)$.
- 6) Verrouiller l'interféromètre au point de quadrature B.
- 7) Mémoriser la courbe de données sur l'oscilloscope comme étant $V_B(t)$.

IV.5 Traitement des données

Le paramètre de modulation est déterminé par la somme et la différence de $V_A(t)$ et $V_B(t)$. Par conséquent, les variables $V^+(t)$ et $V^-(t)$ sont définies:

$$V^+(t) = \frac{V_A(t) + V_B(t)}{2}$$

$$V^-(t) = \frac{V_A(t) - V_B(t)}{2}$$

L'intensité $P(t)$ de l'émetteur, variable en fonction du temps, est proportionnelle à $V^+(t)$. Le paramètre de modulation est calculé par:

$$\alpha(t) = 2 \times FSR \times \frac{V^+(t) \times \arcsin \frac{V^-(t)}{V^+(t)}}{\frac{\partial V^+(t)}{\partial t}}$$

$P(t)$ et $\alpha(t)$ sont calculés et représentés sur le même graphique. Le paramètre de modulation de l'émetteur est défini comme étant la valeur de $\alpha(t)$ calculé à l'instant où l'intensité $P(t)$ est à mi-chemin entre le niveau représentant les symboles "0" et "1" des données.

IV.6 Exemples et interprétation de données.

La Figure IV.3 illustre un exemple de résultat mesuré des deux courbes $V_A(t)$ et $V_B(t)$ mesurées sur un signal PRBS au débit de 10 Gbit/s.

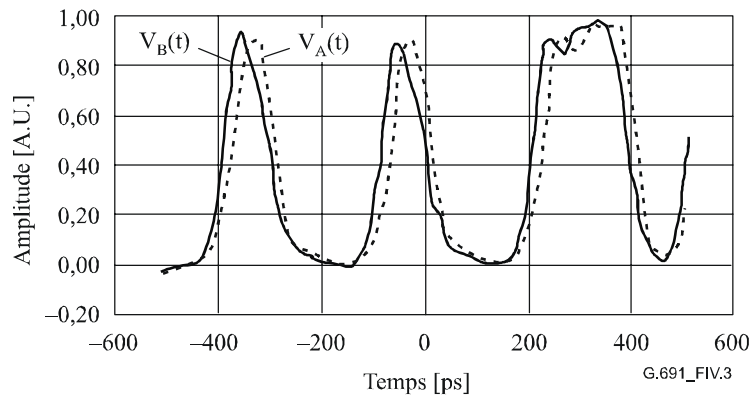


Figure IV.3/G.691 – Courbes de données d'un signal PRBS à 10 Gbit/s mesuré à l'aide de l'interféromètre réglé respectivement aux points de quadrature A et B

La Figure IV.4 illustre la représentation graphique du calcul de $P(t)$ et de $\alpha(t)$ tel qu'il a été décrit dans le paragraphe IV.5.

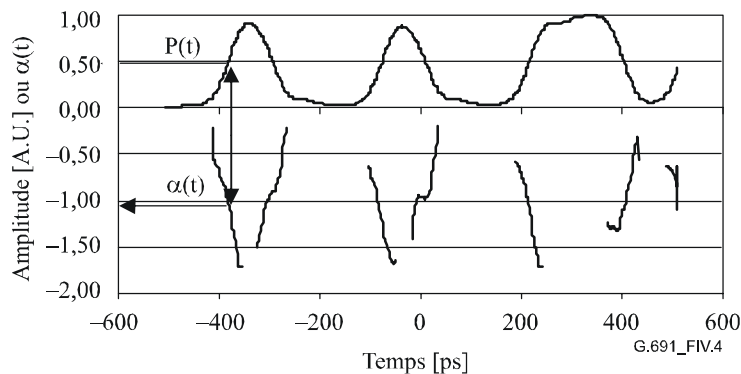


Figure IV.4/G.691 – Représentation graphique des valeurs calculées de $P(t)$ et de $\alpha(t)$; les flèches montrent comment trouver le paramètre de modulation.

Le paramètre de modulation peut être calculé sur le bord avant et le bord arrière des impulsions de données. La Figure IV.4 illustre l'identification du paramètre de modulation pour le premier bord avant des impulsions sur la courbe. Le paramètre de modulation varie légèrement en fonction de la position de l'impulsion sur la courbe. Les paramètres de modulation minimaux et maximaux sur tout le diagramme doivent se situer dans les limites spécifiées pour le système.

La manière dont le paramètre de modulation influence la performance du système est l'objet d'un complément d'étude. Il en est de même pour la question de savoir s'il faut calculer le paramètre de modulation sur le bord avant ou arrière en tant que moyenne ou comme un cas le plus défavorable.

Appendice V

Considérations d'évolutivité

Un exemple d'améliorations vers des débits supérieurs est le passage d'un système monocanal à amplification de ligne STM-16 vers le module STM-64. On peut améliorer, par exemple, une distance de régénération STM-16 de 640 km de longueur comportant sept amplificateurs de ligne en remplaçant l'amplificateur de ligne situé au milieu par un régénérateur tout en maintenant inchangés les autres amplificateurs de ligne et leur distance. La Figure V.1 illustre cette évolution.

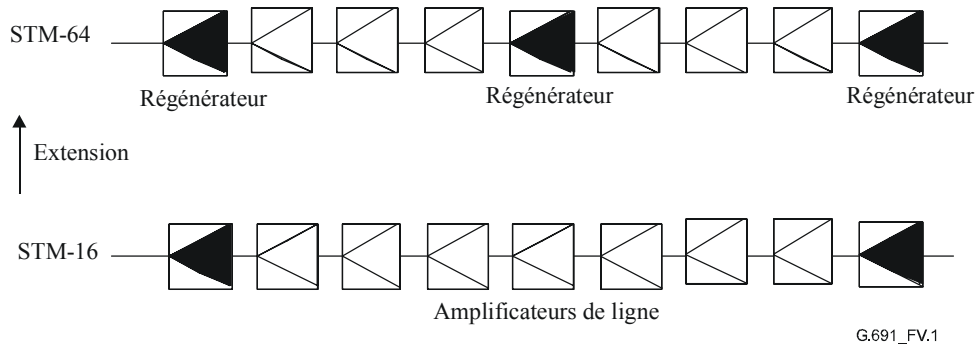


Figure V.1/G.691 – Exemple d'évolution de STM-16 vers STM-64

Les évolutions de STM-4 vers STM-16 ne présentent aucun avantage car les systèmes STM-4 avec amplificateurs de ligne ne sont pas rentables à moins de réduire considérablement le coût des amplificateurs de ligne.

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 prochaine génération
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication