

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.696.1

(07/2005)

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

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

**Applications de multiplexage par répartition
dense en longueur d'onde intradomaniales
longitudinalement compatibles**

Recommandation UIT-T G.696.1

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

CONNEXIONS ET CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX	G.100–G.199
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES COMMUNES À TOUS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	G.200–G.299
CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX À COURANTS PORTEURS SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.300–G.399
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX HERTZIENS OU À SATELLITES ET INTERCONNEXION AVEC LES SYSTÈMES SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.400–G.449
COORDINATION DE LA 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.696.1

Applications de multiplexage par répartition dense en longueur d'onde intradomaniales longitudinalement compatibles

Résumé

La présente Recommandation définit les spécifications de la couche Physique des applications de multiplexage par répartition dense en longueur d'onde (DWDM, *dense wavelength division multiplexing*) intradomaniales (IaD, *intra-domain*) pour réseau optique. Les applications longitudinalement compatibles dans un domaine administratif sont décrites pour des systèmes de ligne multicanaux point à point avec ou sans amplificateur de ligne. Les codes d'application figurant dans la présente Recommandation définissent un ensemble de catégories pour les systèmes de transmission DWDM et les liaisons par fibres optiques. L'objectif principal est de permettre à une multitude de vendeurs de concevoir des équipements de transmission DWDM pour des liaisons par fibres optiques qui soient conformes à la présente Recommandation.

Source

La Recommandation UIT-T G.696.1 a été approuvée le 14 juillet 2005 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 n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 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..... 1
2.1	Références normatives..... 1
2.2	Références informatives 2
3	Termes et définitions 3
3.1	Définitions 3
3.2	Termes définis dans d'autres Recommandations 3
4	Abréviations..... 3
5	Classification des interfaces optiques..... 4
5.1	Applications..... 4
5.2	Configurations de référence 4
5.3	Nomenclature 5
6	Compatibilité longitudinale 6
7	Paramètres..... 6
7.1	Affaiblissements maximal et minimal par tronçon 7
7.2	Type de fibre..... 7
7.3	Gamme de longueurs d'onde de fonctionnement..... 7
7.4	Dispersion chromatique minimale ou maximale par tronçon..... 8
7.5	Coefficient minimal de dispersion chromatique locale 9
7.6	Ecart maximal de dispersion chromatique 9
7.7	Temps maximal de propagation de groupe différentiel..... 9
7.8	Affaiblissement d'adaptation optique minimal au point MPI-S _M ou S _M 10
7.9	Réflectance discrète maximale entre les points MPI-S _M et MPI-R _M 11
8	Considérations relatives à la sécurité optique..... 11
Appendice I – Considérations relatives aux limites théoriques et à la conception des systèmes de multiplexage par répartition dense en longueur d'onde..... 11	
I.1	Technologies de base et leurs limites 12
I.2	Autres effets limitant la distance de transmission 15
I.3	Techniques utilisées pour atténuer les dégradations 18
I.4	Exemple concret 19
BIBLIOGRAPHIE 20	

Recommandation UIT-T G.696.1

Applications de multiplexage par répartition dense en longueur d'onde intradomaniales longitudinalement compatibles

1 Domaine d'application

La présente Recommandation définit les spécifications de la couche physique des applications de multiplexage par répartition dense en longueur d'onde (DWDM, *dense wavelength division multiplexing*) intradomaniales (IaD, *intra-domain*) pour réseau optique. Les présentes spécifications s'appliquent à des systèmes de ligne multicanaux point à point avec ou sans amplificateur de ligne. L'objectif est de faciliter les applications longitudinalement compatibles dans un domaine administratif. Le but principal est de permettre à une multitude de vendeurs de fournir des équipements de transmission pour des liaisons par fibres optiques qui soient conformes à la présente norme.

Afin d'offrir un cadre pour les spécifications des applications intradomaniales (IaD), la présente Recommandation comporte un modèle de référence générique pour les applications de la couche Physique. Les spécifications sont organisées en fonction des codes d'application, qui tiennent compte de paramètres tels que les gammes de longueurs d'onde de fonctionnement des amplificateurs optiques, les combinaisons de nombre de canaux, les classes client, la longueur des tronçons, le type de fibres et de configuration de systèmes.

Cette première version de la présente Recommandation est axée sur les applications IaD abstraction faite des éléments de commutation optique intermédiaires. Il est à prévoir que les versions ultérieures de la présente Recommandation et/ou les autres Recommandations nouvelles porteront sur des configurations de la couche Physique plus complexes et/ou autoriseront un plus haut niveau de compatibilité. Pour ces applications, différents paramètres outre ceux qui sont spécifiés pour une configuration point à point peuvent être nécessaires.

Dans la présente Recommandation, on suppose que les signaux optiques affluents transportés dans les canaux optiques sont numériques et non pas analogiques. Les spécifications des systèmes permettant le transport de signaux optiques affluents analogiques feront l'objet d'études ultérieures.

2 Références

2.1 Références normatives

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

- Recommandation UIT-T G.650.2 (2005), *Définitions et méthodes de test applicables aux attributs se rapportant aux caractéristiques statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes.*
- Recommandation UIT-T G.652 (2005), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes.*

- Recommandation UIT-T G.653 (2003), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques monomodes à dispersion décalée.*
- Recommandation UIT-T G.654 (2004), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée.*
- Recommandation UIT-T G.655 (2003), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques monomodes à dispersion décalée non nulle.*
- Recommandation UIT-T G.663 (2000), *Aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques plus Amendement 1 (2003), Amendements relatifs à l'Appendice II.*
- Recommandation UIT-T G.664 (2003), *Procédures et prescriptions de sécurité optique applicables aux systèmes de transport optiques plus Amendement 1 (2005).*
- Recommandation UIT-T G.665 (2005), *Caractéristiques génériques des amplificateurs Raman et des sous-systèmes à amplification Raman.*
- Recommandation UIT-T G.691 (2003), *Interfaces optiques pour les systèmes STM-64 et autres systèmes SDH monocanaux à amplificateurs optiques plus Amendement 1 (2005).*
- Recommandation UIT-T G.707/Y.1322 (2003), *Interface de nœud de réseau pour la hiérarchie numérique synchrone plus Amendement 1 (2004) et Corrigendum 1 (2004).*
- Recommandation UIT-T G.709/Y.1331 (2003), *Interfaces pour le réseau de transport optique plus Amendement 1 (2003).*
- Recommandation UIT-T G.872 (2001), *Architecture des réseaux de transport optiques plus Amendement 1 (2003) et Corrigendum 1 (2005).*
- Recommandation UIT-T G.957 (1999), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone plus Amendement 1 (2003) et Amendement 2 (2005).*
- Recommandation UIT-T G.959.1 (2003), *Interfaces de couche Physique du réseau optique de transport.*
- CEI 60825-1:2001, *Sécurité des appareils à laser – Partie 1: Classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur.*
- CEI 60825-2:2005, *Sécurité des appareils à laser – Partie 2: Sécurité des systèmes de télécommunication par fibres optiques (STFO).*
- CEI/TR 61292-4 (2004), *Optical amplifiers – part 4: Maximum permissible optical power for the damage-free and safe use of optical amplifiers, including Raman amplifiers.*

2.2 Références informatives

- Recommandation UIT-T G.975.1 (2004), *Correction directe d'erreur pour les systèmes sous-marins à haut débit et à multiplexage par répartition dense en longueurs d'onde.*
- Recommandations UIT-T de la série G – Supplément 39 (2003), *Considérations sur la conception et l'ingénierie des systèmes optiques.*

3 Termes et définitions

3.1 Définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1.1 classe client: classe de débits binaires du signal client d'un signal optique affluent placé dans un canal optique pour être transporté à travers le réseau optique. Dans le cadre de la présente Recommandation, le débit client est le débit binaire d'un signal numérique continu avant que des octets FEC supplémentaires aient été ajoutés. Dans le cas d'un signal conforme à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322, il s'agira du débit de l'unité ODUk.

3.1.2 classe client 1,25G: s'applique à un signal numérique continu de débit client nominal compris entre 622 Mbit/s et 1,25 Gbit/s. Cette classe inclut les signaux de débit STM-4 conformément à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322.

3.1.3 classe client 2,5G: s'applique à un signal numérique continu de débit client nominal compris entre 622 Mbit/s et 2,5 Gbit/s. Cette classe inclut les signaux de débit STM-16 conformément à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322 et les signaux de débit ODU1 conformément à la Rec. UIT-T G.709/Y.1331.

3.1.4 classe client 10G: s'applique à un signal numérique continu de débit client nominal compris entre 2,4 Gbit/s et 10,5 Gbit/s. Cette classe inclut les signaux de débit STM-64 conformément à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322 et les signaux de débit ODU2 conformément à la Rec. UIT-T G.709/Y.1331.

3.1.5 classe client 40G: s'applique à un signal numérique continu de débit client nominal compris entre 9,9 Gbit/s et 42 Gbit/s. Cette classe inclut les signaux de débit STM-256 conformément à la Rec. UIT-T G.707/Y.1322 et les signaux de débit ODU3 conformément à la Rec. UIT-T G.709/Y.1331.

3.2 Termes définis dans d'autres Recommandations

La présente Recommandation utilise les termes suivants définis dans la Rec. UIT-T G.872:

- interface intradomainale (IaDI, *intra-domain interface*);
- régénération 3R (*3R regeneration*).

La présente Recommandation utilise le terme suivant défini dans la Rec. UIT-T G.709/Y.1331:

- unité de données de canal optique d'ordre k (ODUk, *optical channel data unit k*)

La présente Recommandation utilise le terme suivant défini dans la Rec. UIT-T G.959.1:

- signal optique affluent (*optical tributary signal*).

4 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

3R	(régénération) réamplification, reformation et resynchronisation (<i>(regeneration) re-amplification, reshaping and retiming</i>)
ASE	émission spontanée amplifiée (<i>amplified spontaneous emission</i>)
BER	taux d'erreur sur les bits (<i>bit error ratio</i>)
DCM	module de compensation de dispersion (<i>dispersion compensation module</i>)
DEMUX	démultiplexeur
DGD	temps de propagation de groupe différentiel (<i>differential group delay</i>)

DRA	amplification Raman répartie (<i>distributed Raman amplification</i>)
DWDM	multiplexage par répartition dense en longueur d'onde (<i>dense wavelength division multiplexing</i>)
EDFA	amplificateur à fibre dopée à l'erbium (<i>erbium doped fibre amplifier</i>)
FEC	correction d'erreur directe (<i>forward error correction</i>)
FWM	mélange de quatre ondes (<i>four-wave mixing</i>)
IaD	intradomanial (<i>intra-domain</i>)
IaDI	interface intradomaniale (<i>intra-domain interface</i>)
MPI	interface principale sur le trajet (<i>main path interface</i>)
MUX	multiplexeur
NCG	gain de codage net (<i>net coding gain</i>)
NRZ	non-retour à zéro (<i>non-return to zero</i>)
OA	amplificateur optique (<i>optical amplifier</i>)
ODU _k	unité de données de canal optique d'ordre k (k = 1, 2 ou 3) (<i>optical channel data unit</i>)
OPM	contrôleur de puissance optique (<i>optical power monitor</i>)
OSA	analyseur de spectre optique (<i>optical spectrum analyzer</i>)
OSNR	rapport signal/bruit optique (<i>optical signal-to-noise ratio</i>)
PDG	variation du gain en fonction de la polarisation (<i>polarization-dependent gain</i>)
PDL	affaiblissement dû à la polarisation (<i>polarization-dependent loss</i>)
PMD	dispersion modale de polarisation (<i>polarization mode dispersion</i>)
PMD _Q	paramètre statistique pour la dispersion PMD de liaison (<i>statistical parameter for link PMD</i>)
RZ	retour à zéro (<i>return to zero</i>)
SPM	modulation autophase (<i>self-phase modulation</i>)
VOA	affaiblisseur optique variable (<i>variable optical attenuator</i>)
WDM	multiplexage par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplexing</i>)
XPM	modulation transphase (<i>cross-phase modulation</i>)

5 Classification des interfaces optiques

5.1 Applications

La présente Recommandation traite des applications de multiplexage par répartition dense en longueur d'onde intradomaniales longitudinalement compatibles, avec ou sans amplificateurs de ligne optiques. Différents types d'amplificateur de ligne peuvent être utilisés, notamment les amplificateurs de ligne discrets décrits dans la Rec. UIT-T G.663 ou les amplificateurs Raman conformes à la Rec. UIT-T G.665.

5.2 Configurations de référence

Pour les besoins de la présente Recommandation, les points de référence appropriés applicables aux applications d'interface DWDM intradomaniales sont représentés sur la Figure 5-1.

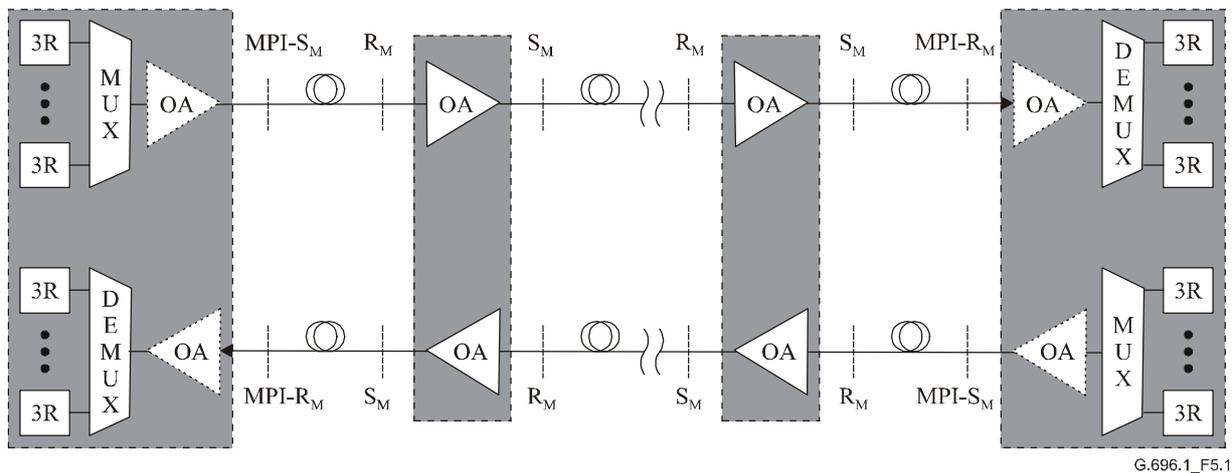


Figure 5-1/G.696.1 – Configuration de référence pour un système DWDM à plusieurs tronçons

Les points de référence représentés sur la Figure 5-1 sont définis comme indiqué ci-dessous selon la nomenclature de la Rec. UIT-T G.959.1:

- MPI-S_M est un point de référence (multicanal) sur la fibre optique juste après le connecteur optique de sortie de l'interface de transport d'un élément de réseau optique;
- MPI-R_M est un point de référence (multicanal) sur la fibre optique juste avant le connecteur optique d'entrée de l'interface de transport d'un élément de réseau optique;
- S_M est un point de référence juste après le connecteur optique de sortie d'amplificateur optique multicanal de ligne;
- R_M est un point de référence sur la fibre optique juste avant le connecteur optique d'entrée d'amplificateur optique multicanal de ligne.

5.3 Nomenclature

Le format du code d'application est le suivant:

n.B-xWF(s)

où:

- n** est le nombre maximal de canaux pris en charge par le code d'application,
- B** indique la classe client:
 - la classe client 1,25G indique un débit client compris entre 622 Mbit/s et 1,25 Gbit/s;
 - la classe client 2,5G indique un débit client compris entre 622 Mbit/s et 2,5 Gbit/s;
 - la classe client 10G indique un débit client compris entre 2,4 Gbit/s et 10,5 Gbit/s;
 - la classe client 40G indique un débit client compris entre 9,9 Gbit/s et 42 Gbit/s.
- x** est le nombre de tronçons qu'autorise le code d'application,

W est une lettre indiquant l'affaiblissement sur le tronçon, telle que:
S indiquant un tronçon court (jusqu'à 11 dB d'affaiblissement sur le tronçon),
L indiquant un tronçon long (jusqu'à 22 dB d'affaiblissement sur le tronçon),
V indiquant un tronçon très long (jusqu'à 33 dB d'affaiblissement sur le tronçon),

F est le type de fibre (dans tous ses détails), tel que G.652.A, ... G.652.D respectivement désignés par "652A" ... "652D" dans le code d'application,

s indique la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement en fonction des bandes spectrales (voir le Supplément UIT-T G.39):

s	Désignation	Gamme (nm)
O	Original (initiale)	1260 à 1360
E	Extended (étendue)	1360 à 1460
S	Short wavelength (ondes courtes)	1460 à 1530
C	Conventional (usuelle)	1530 à 1565
L	Long wavelength (ondes moyennes)	1565 à 1625

Si plusieurs bandes spectrales sont utilisées, s correspond alors aux lettres des bandes séparées par un signe plus (""). Par exemple, pour une application nécessitant l'utilisation de la bande C et de la bande L, s correspondra à "C+L". Dans les cas où plusieurs bandes spectrales sont utilisées, les lettres des bandes sont placées par ordre croissant des gammes de longueurs d'onde.

Dans le cas d'un système de transmission DWDM à amplificateur Raman, une lettre "R" sera ajoutée à la fin du code d'application qui se présentera comme suit:

n.B-xWF(s)R

Un exemple d'applications particulières pourrait se présenter comme suit:

40,10G-20L652A(C)R

Cette application indique un système de 40 canaux avec des signaux de la classe de charge utile 10G et 20 tronçons longs de fibre G.652A, dont l'utilisation avec des amplificateurs Raman est tout indiquée. La bande C est utilisée comme gamme de longueurs d'onde de fonctionnement.

6 Compatibilité longitudinale

Les applications visées dans la présente Recommandation sont longitudinalement compatibles, conformément à la définition de la compatibilité longitudinale qui est donnée dans le Supplément UIT-T G.39.

7 Paramètres

Les codes d'application utilisés dans la présente Recommandation (n.B-xWF(s)) sont constitués de deux parties dissociables. La première partie "n.B" se rapporte au système de transmission optique et la deuxième partie "xWF(s)" se rapporte à l'infrastructure en fibre.

Comme la présente Recommandation traite des systèmes longitudinalement compatibles, les paramètres contenus dans le Tableau 7-1 concernent uniquement l'infrastructure en fibre, sauf lorsque la partie du code d'application se rapportant au système de transmission a une incidence sur les fibres nécessaires.

Tableau 7-1/G.696.1 – Paramètres des fibres pour les applications DWDM intradomaniales

Paramètre	Paragraphe
Affaiblissement maximal par tronçon	7.1
Affaiblissement minimal par tronçon	7.1
Type de fibre	7.2
Gamme de longueurs d'onde de fonctionnement	7.3
Dispersion chromatique minimale par tronçon	7.4
Dispersion chromatique maximale par tronçon	7.4
Coefficient minimal de dispersion chromatique locale	7.5
Ecart maximal de dispersion chromatique	7.6
Temps maximal de propagation de groupe différentiel	7.7
Affaiblissement d'adaptation optique minimal au point MPI-S _M ou S _M	7.8
Réflectance discrète maximale entre les points MPI-S _M et MPI-R _M	7.9

7.1 Affaiblissements maximal et minimal par tronçon

Les affaiblissements maximal et minimal par tronçon sont indiqués dans le Tableau 7-2.

Tableau 7-2/G.696.1 – Affaiblissements maximal et minimal par tronçon

Paramètre	Unités	Valeur de "W" dans le code d'application		
		S	L	V
Affaiblissement maximal par tronçon	dB	11	22	33
Affaiblissement minimal par tronçon	dB	A étudier	11	22

7.2 Type de fibre

La présente Recommandation porte sur tous les types de fibres définis dans les Recommandations UIT-T de la série G.65x, c'est-à-dire, en l'état actuel des choses, tous les types indiqués dans le Tableau 7-3.

Tableau 7-3/G.696.1 – Types de fibre

G.652.A	G.653.A	G.654.A	G.655.A	G.656
G.652.B	G.653.B	G.654.B	G.655.B	
G.652.C		G.654.C	G.655.C	
G.652.D				

7.3 Gamme de longueurs d'onde de fonctionnement

La gamme de longueurs d'onde de fonctionnement comprend une ou plusieurs des gammes de longueurs d'onde définies dans le Supplément UIT-T G.39. Voir le Tableau 7-4.

Tableau 7-4/G.696.1 – Gammes de longueurs d'onde

s	Désignation	Gamme (nm)
O	Original (initiale)	1260 à 1360
E	Extended (étendue)	1360 à 1460
S	Short wavelength (ondes courtes)	1460 à 1530
C	Conventional (usuelle)	1530 à 1565
L	Long wavelength (ondes moyennes)	1565 à 1625

7.4 Dispersion chromatique minimale ou maximale par tronçon

La dispersion chromatique minimale ou maximale par tronçon (à l'exclusion de toute compensation de dispersion) peut soit être calculée au moyen des paramètres normalisés (de la série G.65x) relatifs aux fibres, soit être mesurée. Pour les systèmes 40G ainsi que pour les systèmes 10G comportant de nombreux tronçons, la mesure de la dispersion chromatique constitue souvent la solution la plus pratique.

On peut calculer la dispersion chromatique minimale ou maximale par tronçon au moyen des paramètres des Recommandations de la série G.65x relatifs aux fibres ainsi que des paramètres supplémentaires utilisés dans la présente Recommandation. Les modalités de calcul sont détaillées ci-dessous: la dispersion chromatique maximale par tronçon, $CD_{\max}^{(span)}$, est donnée par:

$$CD_{\max}^{(span)} = D_{\max}(s) \cdot L_{\max}^{(span)}$$

où:

$$L_{\max}^{(span)} = \frac{A_{\max}(W)}{\alpha(s)}$$

est la longueur maximale du tronçon dont l'affaiblissement maximal $A_{\max}(W)$ est défini par la lettre "W" (voir le Tableau 7-2), et le coefficient d'affaiblissement $\alpha(s)$ dans la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement "s" (voir le § 5.3), où $\alpha(s)$ est la "valeur type pour la liaison" indiquée dans des Recommandations UIT-T de la série G.65x. Le coefficient maximal de dispersion chromatique dans la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement "s" est désigné par $D_{\max}(s)$.

De même, la dispersion chromatique minimale par tronçon, $CD_{\min}^{(span)}$, est donnée par:

$$CD_{\min}^{(span)} = D_{\min}(s) \cdot L_{\min}^{(span)}$$

où:

$$L_{\min}^{(span)} = \frac{A_{\min}(W)}{\alpha(s)}$$

est la longueur minimale du tronçon dont l'affaiblissement minimal $A_{\min}(W)$ est défini par la lettre "W" (voir le Tableau 7-2), et le coefficient d'affaiblissement $\alpha(s)$ dans la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement "s" (voir le § 5.3), où $\alpha(s)$ est la "valeur type pour la liaison" indiquée dans des Recommandations UIT-T de la série G.65x. Le coefficient minimal de dispersion chromatique dans la gamme de longueurs d'onde de fonctionnement "s" est désigné par $D_{\min}(s)$.

Les coefficients de dispersion chromatique pour tout type de fibres peuvent être obtenus en utilisant les "attributs de liaison" des Recommandations UIT-T de la série G.65x. Les affaiblissements maximal et minimal sur le tronçon sont définis dans le Tableau 7-2.

7.5 Coefficient minimal de dispersion chromatique locale

Au regard de la performance des différents canaux d'un système de transmission comportant plusieurs tronçons, la dispersion chromatique résiduelle de bout en bout (compensation comprise) doit être maintenue dans des limites étroites pour assurer le fonctionnement satisfaisant du système.

Pour que les systèmes de transmission DWDM fonctionnent convenablement sur de longues distances avec un faible espacement des canaux (100 GHz, par exemple), toutefois, il faut aussi que le coefficient de dispersion locale de la fibre de transmission ait une valeur minimale afin d'éviter des effets non linéaires tels que le mélange de quatre ondes (FWM, *four-wave mixing*) et la modulation transphase (XPM, *cross-phase modulation*).

La valeur du coefficient de dispersion chromatique locale à retenir pour éviter les dégradations importantes dues à ces effets est fonction de divers paramètres de conception du système de transmission tels que l'espacement des canaux, le niveau de puissance, la longueur de la liaison, etc. et, par voie de conséquence, ne relève pas de la présente Recommandation.

De plus amples précisions sur ces effets non linéaires sont données dans la Rec. UIT-T G.663 et le Supplément UIT-T G.39 et plusieurs méthodes permettant d'atténuer ces effets sont examinées au § I.3.

7.6 Ecart maximal de dispersion chromatique

Les prescriptions applicables à l'écart maximal de dispersion chromatique appellent un complément d'étude.

7.7 Temps maximal de propagation de groupe différentiel

Le temps de propagation de groupe différentiel (DGD, *differential group delay*) maximal s'applique à l'intégralité de la liaison entre un émetteur ("3R" connecté à un multiplexeur (MUX) selon la Figure 5-1) et le récepteur correspondant ("3R" connecté au démultiplexeur (DEMUX) selon la Figure 5-1).

L'équation ci-après peut être utilisée pour calculer le temps DGD maximal d'une liaison (comportant plusieurs composants et sections de fibre), pour laquelle la probabilité de dépassement de ce temps est spécifiée.

$$DGD \max_{link} = \left[DGD \max_F^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2}$$

où:

$DGD \max_{link}$ est le temps DGD maximal de liaison (ps)

$DGD \max_F$ est le temps DGD maximal du câble à fibres optiques concaténées (ps)

S est le facteur d'ajustement de Maxwell (voir le Tableau 7-5)

PMD_{Ci} est la valeur de la dispersion du i^e composant (ps)

Dans cette équation, on suppose que la distribution des temps DGD instantanés peut être représentée approximativement par une distribution de Maxwell, la probabilité que les temps DGD instantanés dépassent le temps maximal de la liaison $DGD \max_{link}$ étant fonction de la valeur du facteur d'ajustement de Maxwell extraite du Tableau 7-5.

Tableau 7-5/G.696.1 – Valeurs S et probabilités

Rapport de la valeur maximale à la valeur moyenne (S)	Probabilité de dépassement de la valeur maximale	Rapport de la valeur maximale à la valeur moyenne (S)	Probabilité de dépassement de la valeur maximale
3	$4,2 \times 10^{-5}$	4	$7,4 \times 10^{-9}$
3,2	$9,2 \times 10^{-6}$	4,2	$9,6 \times 10^{-10}$
3,4	$1,8 \times 10^{-6}$	4,4	$1,1 \times 10^{-10}$
3,6	$3,2 \times 10^{-7}$	4,6	$1,2 \times 10^{-11}$
3,8	$5,1 \times 10^{-8}$		

Pour de plus amples précisions, voir les Recommandations UIT-T G.650.2 et G.691. La valeur de DGD_{max_F} (temps DGD maximal dû à la partie fibre) peut soit être mesurée ou, autre solution, une limite supérieure peut être calculée pour une longueur de fibre donnée au moyen du coefficient PMD_Q figurant dans la Recommandation traitant de cette fibre.

Les limites de temps DGD applicables à l'intégralité de la liaison sont indiquées dans le Tableau 7-6 pour les systèmes NRZ et dans le Tableau 7-7 pour les systèmes RZ.

Tableau 7-6/G.696.1 – Temps de propagation de groupe différentiel maximal sur la liaison pour les systèmes NRZ

Classe client	Unités	Valeur
1,25G	ps	240
2,5G	ps	120
10G	ps	30
40G	ps	7,5

Tableau 7-7/G.696.1 – Temps de propagation de groupe différentiel maximal sur la liaison pour les systèmes RZ

Classe client	Unités	Valeur
1,25G	ps	A étudier
2,5G	ps	A étudier
10G	ps	A étudier
40G	ps	A étudier

7.8 Affaiblissement d'adaptation optique minimal au point MPI-S_M ou S_M

Les réflexions sont causées par des discontinuités de l'indice de réfraction sur le trajet optique. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées, elles peuvent dégrader les performances du système par leur effet perturbateur sur le fonctionnement de la source ou de l'amplificateur optique, ou par les réflexions multiples qui induisent un bruit interférométrique au niveau du récepteur. Les réflexions sur le trajet optique sont contrôlées en spécifiant:

- l'affaiblissement d'adaptation optique minimal de l'installation en câble au point de référence émission (à savoir, MPI-S_M, S_M), y compris tous les connecteurs;
- la réflectance discrète maximale entre les points de référence émission (par exemple, MPI-S_M, S_M) et les points de référence réception (par exemple, MPI-R_M, R_M).

La réflectance correspond à la réflexion à partir de tout point de réflexion discret unique, tandis que l'affaiblissement d'adaptation optique est le rapport entre la puissance optique incidente et la puissance optique totale renvoyée par la fibre entière, y compris les réflexions discrètes et la rétrodiffusion répartie telle que la diffusion de Rayleigh.

Les méthodes de mesure pour les réflexions sont décrites à l'Appendice I/G.957. Pour la mesure de la réflectance et de l'affaiblissement d'adaptation, les points MPI-S et MPI-R sont supposés coïncider avec l'extrémité de chaque prise de connecteur. On admettra qu'il n'est pas tenu compte des performances réelles en termes de réflexion des connecteurs respectifs dans le système en fonctionnement. Ces réflexions sont supposées avoir la valeur nominale de réflexion pour le type spécifique de connecteurs utilisé.

L'affaiblissement d'adaptation optique minimal de l'installation en câble au point MPI-S_M ou S_M est limité à -24 dB.

7.9 Réflectance discrète maximale entre les points MPI-S_M et MPI-R_M

La réflectance optique est définie comme étant le rapport de la puissance optique réfléchie en un point donné à la puissance optique incidente en ce point. La limitation des réflexions est examinée dans le détail dans la Rec. UIT-T G.957. Le nombre maximal de connecteurs ou d'autres points de réflexion discrets qui peuvent être inclus dans le trajet optique (par exemple, des répartiteurs, ou des composants WDM) doit être tel qu'il permette d'atteindre l'affaiblissement d'adaptation optique global spécifié. Si ceci ne peut être fait en utilisant des connecteurs qui satisfont aux valeurs de réflectance discrète maximale mentionnées ici, on doit alors utiliser des connecteurs ayant de meilleures performances en termes de réflexion. Ou alors, on doit réduire le nombre de connecteurs. Il peut aussi être nécessaire de limiter le nombre de connecteurs ou d'utiliser des connecteurs ayant des performances améliorées en termes de réflectance afin d'éviter des dégradations inacceptables résultant de réflexions multiples.

La réflectance discrète maximale entre les points MPI-S_M et MPI-R_M est limitée à -27 dB.

8 Considérations relatives à la sécurité optique

Bien que la présente Recommandation porte sur l'infrastructure en fibre et qu'elle ne définisse pas les caractéristiques des systèmes de transmission optique utilisant cette infrastructure, ces systèmes peuvent parfaitement fonctionner à des niveaux de puissance optique relativement élevés. Pour de plus amples précisions sur les considérations relatives à la sécurité optique, voir la Rec. UIT-T G.664, les publications CEI 60825-1 et 60825-2 ainsi que le rapport technique CEI/TR 61292-4.

Appendice I

Considérations relatives aux limites théoriques et à la conception des systèmes de multiplexage par répartition dense en longueur d'onde

Le présent appendice indique quelques-uns des facteurs physiques et techniques qui limitent la longueur que peuvent atteindre les liaisons établies au moyen de systèmes de transmission optique avec multiplexage par répartition dense en longueur d'onde (DWDM) intradomaniaux.

Dans le paragraphe I.1, nous examinerons les limites fondamentales imposées par le bruit dû à l'émission spontanée amplifiée (ASE, *amplified spontaneous emission*), ainsi qu'à la dispersion modale de polarisation (PMD, *polarization mode dispersion*). Nous examinerons ensuite, dans le § I.2, les autres effets qui limitent la longueur des liaisons dans les systèmes utilisés dans la pratique

et passerons en revue, dans le § I.3, les techniques utilisées pour atténuer ces effets. Enfin, dans le § I.4, nous donnerons un exemple de la performance type que permet d'obtenir la technologie actuellement disponible.

I.1 Technologies de base et leurs limites

Le présent paragraphe indique quelques-uns des facteurs fondamentaux qui limitent la faisabilité technique des applications DWDM.

On part du principe que l'affaiblissement optique sur la liaison est compensé au moyen d'amplificateurs optiques et que la dispersion chromatique est compensée au moyen de compensateurs de dispersion chromatique.

Le bruit d'émission ASE et la dispersion PMD sont les dégradations les plus importantes qui limitent la capacité et la distance de transmission des applications DWDM.

Le paragraphe I.1 traite du codage de ligne NRZ, qui est généralement utilisé dans les applications DWDM. D'autres codages de ligne peuvent donner des résultats différents et peuvent être plus appropriés dans certains cas (différentes options en lieu et place du codage de ligne NRZ sont examinées dans le § I.3).

I.1.1 Bruit d'émission ASE

L'influence du bruit dû à l'émission spontanée amplifiée (ASE) est essentiellement caractérisée par le rapport OSNR. Comme indiqué dans le Supplément UIT-T G.39, le rapport OSNR d'un système de référence multicanal à x tronçons avec un suramplificateur, $x - 1$ amplificateurs de ligne et un préamplificateur, est obtenu par l'expression suivante:

$$\text{OSNR} = P_{\text{out}} - L - \text{NF}_{\text{eff}} - 10 \cdot \log \left(x + \frac{10^{\frac{G_{\text{BA}}}{10}}}{10^{\frac{L}{10}}} \right) - 10 \cdot \log [h \cdot \nu \cdot \nu_r] \quad (\text{I-1})$$

où P_{out} est la puissance de sortie (par canal) du suramplificateur et des amplificateurs de ligne en dBm, L est la perte d'un tronçon en dB (dont on suppose qu'elle est égale au gain G_{LA} des amplificateurs de ligne), G_{BA} est le gain du suramplificateur optique en dB, NF_{eff} est le facteur de bruit de l'amplificateur optique en dB, h est la constante de Planck (en mJ*s pour correspondre à P_{out} en dBm), ν est la fréquence optique en Hz, ν_r est la largeur de bande de référence en Hz, et $x - 1$ est le nombre total d'amplificateurs de ligne.

L'équation I-1 prend en compte le bruit de grenaille et le bruit de battement spontané-signal comme étant les contributions de bruit les plus importantes. D'autres contributions de bruit peuvent être prises en considération dans certains cas.

Cette équation indique que le bruit d'émission ASE en provenance de l'ensemble des $x + 1$ amplificateurs s'accumule.

Pour ce système de référence on fait les principales hypothèses suivantes:

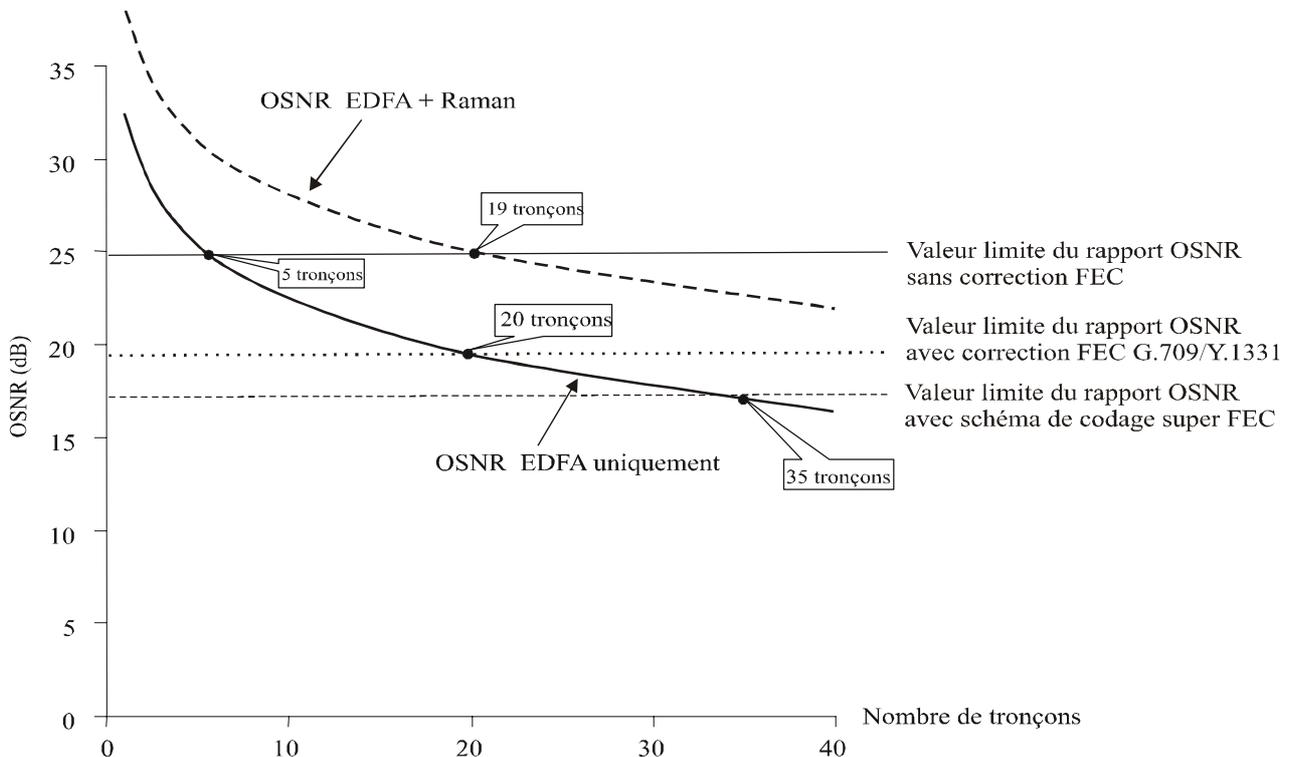
- tous les amplificateurs optiques dans la chaîne, y compris le suramplificateur et le préamplificateur, ont une même valeur de bruit;
- les pertes (par canal) de tous les tronçons sont égales;
- les puissances de sortie (par canal) du suramplificateur et des amplificateurs de ligne sont les mêmes.

Par exemple, dans l'hypothèse d'une puissance de sortie par canal optique P_{out} de 3 dBm, d'un facteur de bruit NF_{eff} de 6,5 dB, d'une largeur de bande de référence ν_r de 0,1 nm et d'une perte par tronçon L de 22 dB, on obtient la courbe en trait plein représentée sur la Figure I.1.

Pour un débit binaire de 10 Gbit/s et dans l'hypothèse d'un rapport OSNR limité à 25 dB pour un taux d'erreur sur les bits (BER) de 10^{-12} sans correction FEC, on obtient une distance limite théorique de 5 tronçons.

A supposer que l'on utilise la correction FEC G.709/Y.1331 avec un gain de codage net (NCG) de 5,6 dB, la valeur limite du rapport OSNR passe à 19,4 dB, valeur qui est atteinte pour 20 tronçons.

En utilisant une correction FEC plus puissante, par exemple un des schémas de codage FEC de l'Appendice I/G.975.1, un gain de codage net (NCG) d'environ 8 dB devient possible et la valeur limite du rapport OSNR passe à 17 dB, valeur qui est atteinte pour 35 tronçons.



G.696.1_FI.1

Figure I.1/G.696.1 – Valeurs limites du rapport OSNR pour un système de référence, le rapport OSNR étant fonction du nombre de tronçons avec et sans amplification Raman

L'amplification Raman répartie (DRA, *distributed Raman amplification*) est une autre option permettant d'étendre la distance de transmission. Le facteur d'amélioration du rapport OSNR censé découler de l'amplification DRA dans une configuration avec pompage vers l'arrière peut être calculé par le facteur de bruit effectif (NF_{eff}) qui peut être exprimé par l'équation I-2 [1].

$$NF_{eff} = 10 \cdot \log \left(\left(NF'_{LA} + \frac{P_{ASE,Raman}}{h \cdot \nu \cdot \nu_r} \right) \cdot \frac{1}{G'_{Raman}} \right) \quad (I-2)$$

où NF'_{LA} est le facteur de bruit linéaire de l'amplificateur de ligne discret, G'_{Raman} est le gain linéaire de l'amplification DRA, $P_{ASE,Raman}$ est la puissance d'émission ASE découlant de l'amplification DRA et ν_r est la largeur de bande de référence. L'équation $NF_{LA} = 10 \cdot \log(NF'_{LA})$ est valable lorsque NF_{LA} est le facteur de bruit de l'amplificateur de ligne discret en dB.

$P_{ASE,Raman}$ et $G_{Raman} = 10 \log \cdot (G'_{Raman})$ peut être évalué de manière analytique [2].

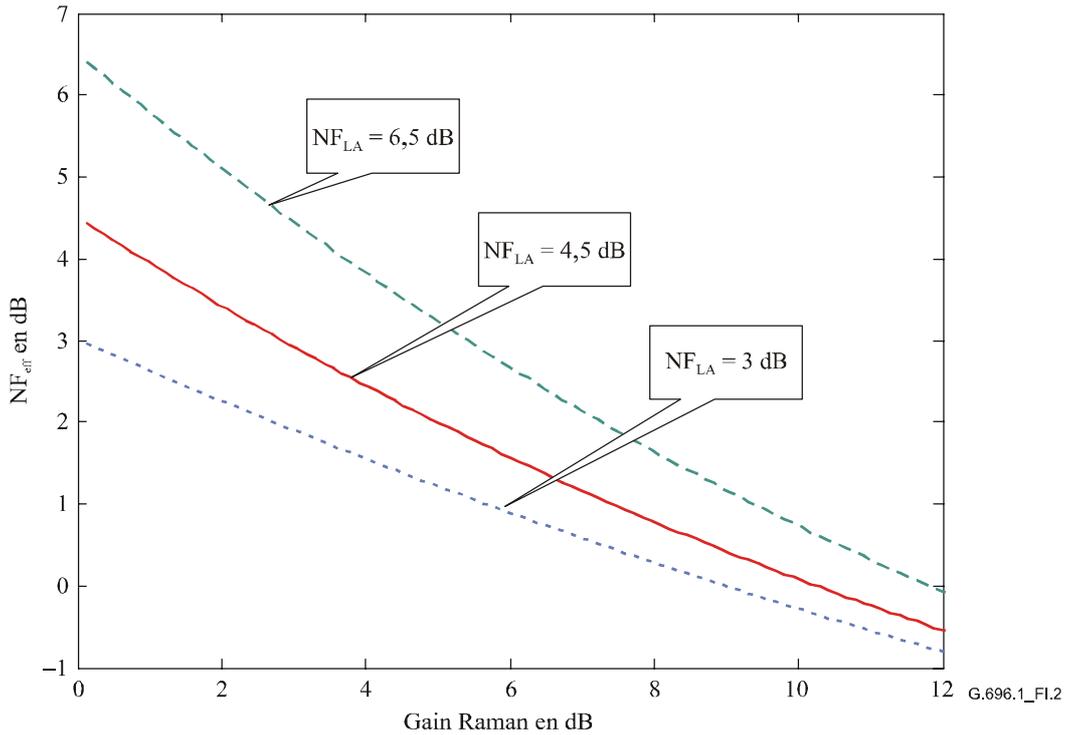


Figure I.2/G.696.1 – Facteur de bruit effectif NF_{eff} en fonction du gain Raman

Le facteur de gain effectif NF_{eff} en fonction du gain Raman G_{Raman} est représenté sur la Figure I.2. Les paramètres retenus ici par hypothèse sont les suivants: longueur de fibre de 80 km, coefficient d'affaiblissement de 0,275 dB/km pour la longueur d'onde du signal et de 0,3 dB/km pour la longueur d'onde de pompage, surface effective de la fibre de 80 μm^2 et coefficient de gain Raman $3.1E-14$. Les facteurs de bruit de l'amplificateur EDFA sont respectivement de 3 dB, 4,5 dB et 6,5 dB. La distance de transmission maximale avec des amplificateurs mixtes Raman – EDFA peut être évaluée en insérant le facteur de bruit effectif NF_{eff} de l'équation I-2 dans l'équation OSNR I-1 et en utilisant $L = G_{Raman} + G_{LA}$, où, ici encore, G_{LA} est le gain de l'amplificateur de ligne en dB.

Dans l'hypothèse d'un gain Raman d'environ 9,3 dB et d'un facteur de bruit de l'amplificateur EDFA NF_{LA} de 6,5 dB, on obtient un facteur de bruit effectif NF_{eff} de 1 dB, ce qui correspond à la courbe tirée représentée sur la Figure I.1.

Dans ces conditions, la portée limite théorique sans correction FEC passe à 19 tronçons et l'adjonction de la correction FEC G.709/Y.1331 autorisera un système de plus de 40 tronçons.

I.1.2 Dispersion modale de polarisation

La dispersion modale de polarisation (PMD) totale d'une liaison par fibres optiques ayant une longueur totale L et un coefficient de dispersion PMD pour chacune des sections de câble PMD_Q est donnée par la formule $PMD = \sqrt{L} \cdot PMD_Q$. Pour une interface NRZ de 10 Gbit/s, la dispersion PMD totale ne doit pas dépasser 10 ps (ce qui correspond à une probabilité de défaillance à "cinq neufs" (99,999%) pour un temps de propagation de groupe différentiel (DGD) maximal induit par les fibres optiques de 30 ps). Si la valeur PMD_Q du coefficient PMD ne dépasse pas 0,5 $ps/km^{1/2}$, la longueur totale de la liaison est alors de 400 km; pour une valeur maximale PMD_Q du coefficient PMD de 0,2 $ps/km^{1/2}$, la longueur totale de la liaison passe à 2500 km, voir la Figure I.3.

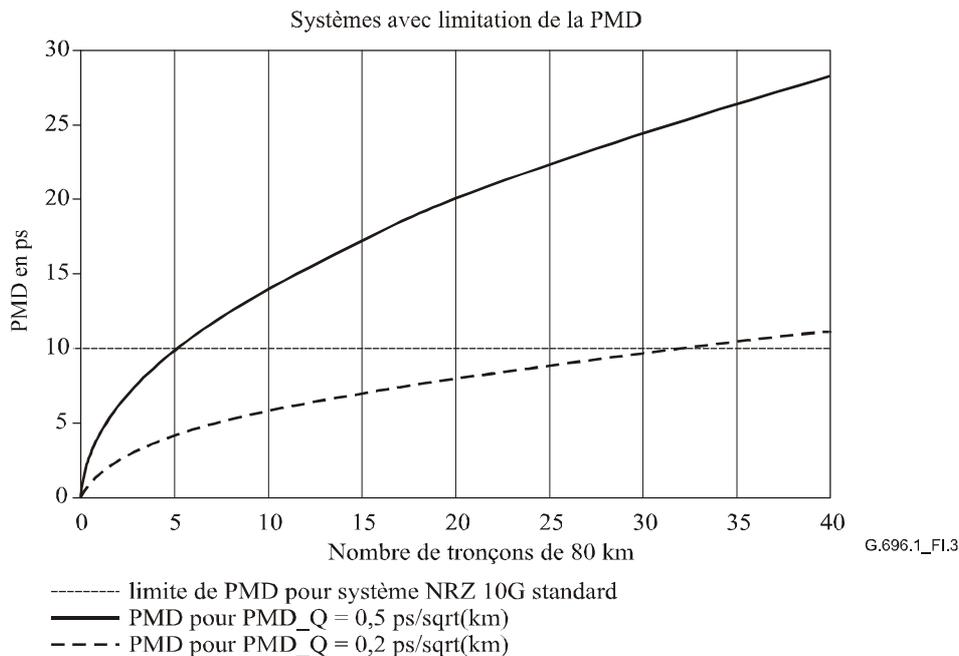


Figure I.3/G.696.1 – Dispersion PMD en fonction de la distance pour différents coefficients PMD et limite de PMD pour systèmes NRZ à 10 Gbit/s avec une disponibilité de 99,999%

La Figure I.3 donne des indications sur la distance maximale autorisée en fonction de la valeur PMD_Q maximale pour le codage de ligne NRZ compte tenu de la tolérance DGD de premier ordre. La contribution PMD de l'équipement n'est pas représentée sur la figure.

Dans la pratique, un système sur une liaison par fibres optiques doit tenir compte de la limite de PMD imposée par la contribution conjointe de la liaison par fibres optiques et de l'équipement qui comprend tous les nœuds d'une liaison.

Dans certaines circonstances, il convient également de tenir compte de la dispersion PMD d'ordre supérieur.

I.2 Autres effets limitant la distance de transmission

Les distances limites d'une liaison calculées dans les paragraphes précédents sont les distances qui peuvent être parcourues dans des conditions idéales. Toutefois, dans la pratique, les systèmes sont exposés à divers effets qui limitent la longueur maximale des liaisons.

I.2.1 Accumulation des ondulations du gain due à la mise en cascade d'amplificateurs EDFA et pente de gain due à des conditions favorisant les effets Raman

Dans la pratique, un système sur une liaison doit tenir compte des écarts de puissance entre les canaux dus à l'accumulation des ondulations du gain et à des conditions favorisant les effets Raman.

On dispose de divers moyens, tels que les filtres éliminateurs de gain et les techniques d'égalisation de gain ou de puissance dynamique, pour limiter la portée de ces effets, sans toutefois pouvoir les éliminer complètement, ce qui aura pour conséquence de ramener les distances pouvant être parcourues à des valeurs inférieures à celles qui sont indiquées dans la Figure I.1.

I.2.2 Longueurs de tronçons non uniformes

Les longueurs de tronçons considérées dans les codes d'application de la présente Recommandation sont toutes égales. Pour les besoins de notre propos, un affaiblissement constant de 22 dB par tronçon a été retenu dans le présent appendice. Dans la pratique, les longueurs de tronçons d'un

système donné sont généralement inégales, variant de fait selon la topologie effective du réseau et les contraintes topographiques.

Il est difficile de justifier de manière générale ce manque d'uniformité des longueurs de tronçons, car, pour un même système, des tronçons longs se traduisent par une "dette" en termes de rapport OSNR alors que des tronçons courts entraînent un "crédit" en termes de rapport OSNR.

On peut compenser en partie ou entièrement la "dette" en termes de rapport OSNR due à des tronçons longs en augmentant la puissance de sortie de l'amplificateur précédant le tronçon considéré, pour autant que cette augmentation de puissance n'entraîne pas d'effets non linéaires ne pouvant être admis qu'au prix d'une dégradation supplémentaire.

En conséquence, généralement parlant, une liaison comportant des tronçons longs peut avoir pour effet de contraindre le système à prendre en charge un plus petit nombre de tronçons, alors qu'une liaison comportant des tronçons courts peut avoir pour effet d'autoriser le système à prendre en charge un grand nombre de tronçons. Comme il s'agit là d'une question qui relève expressément de la conception des systèmes du vendeur des équipements, nous la mentionnons ici uniquement pour donner une idée plus complète de ce type d'applications, sans entrer dans les détails.

I.2.3 Non-linéarité optique

Les effets non linéaires tels que la modulation autophase (SPM, *self-phase modulation*) et/ou la modulation transphase (XPM, *cross-phase modulation*) s'accumulent sur les tronçons et deviennent de plus en plus importants à mesure que le nombre de tronçons augmente. La dégradation non linéaire ne saurait donc être ignorée dans la pratique, sur une liaison.

Si elle est bonne pour le rapport OSNR, une puissance plus élevée des canaux n'est pas nécessairement bonne pour le taux d'erreur sur les bits (BER). Cela tient aux effets non linéaires des fibres optiques.

Compte tenu du format de codage NRZ avec une puissance moyenne des canaux de 3 dBm sur fibre G.652 (identique à la puissance retenue par hypothèse sur la Figure I.1), la phase non linéaire ou modulation autophase (SPM) accumulée, $\Phi_{NL} = \gamma P_{ch} L_{eff} N_{span}$ au-delà de 10 tronçons est proche de 1 radian et la transmission se fait dans une région dite de "distorsion non linéaire forte" dans laquelle la distance de la liaison peut être limitée par la non-linéarité. En conséquence, la longueur totale de la liaison pourrait être bien inférieure à la longueur prévue sur la Figure I.1 compte tenu des seules limites du rapport OSNR.

De plus amples précisions sur la non-linéarité optique sont données dans la Rec. UIT-T G.663 et le Supplément UIT-T G.39 et diverses méthodes permettant d'atténuer ces effets sont examinées dans le § I.3.

I.2.4 Dispersion résiduelle et tolérance de dispersion

Les courbes de la Figure I.1 supposent que chaque canal du système WDM fasse l'objet d'une compensation parfaite de la dispersion. On pourrait certes utiliser des modules de compensation de dispersion (DCM, *dispersion compensation module*) dont la pente de dispersion en fonction de la longueur d'onde serait exactement inverse à celle de la fibre, mais tel n'est généralement pas le cas et même si cela était, une dispersion chromatique d'ordre supérieur pourrait devoir être envisagée à mesure que le nombre de tronçons augmente.

Outre le défaut d'adaptation des pentes donnant lieu à une dispersion résiduelle pour certains des canaux WDM, la distorsion non linéaire peut, si elle n'est pas atténuée, élargir le spectre et du même coup réduire la tolérance de dispersion une fois terminée la transmission par les fibres optiques.

Par exemple, pour une liaison par fibres avec compensation de la dispersion périodique, la non-linéarité cause une fluctuation négative qui limite la tolérance de compensation de dispersion et déplace le point optimal de compensation de dispersion sur une valeur de dispersion nette positive. Cet effet est illustré sur la Figure I.4.

L'exemple donné ici est axé sur la simulation d'un système DWDM à huit canaux avec des signaux NRZ 10G sur une liaison par fibre G.652 de 10×80 km à une puissance de sortie moyenne de 3 dBm par canal. La simulation a été effectuée dans l'hypothèse d'une compensation exacte de la dispersion chromatique de chaque section de 80 km dans chaque amplificateur de ligne.

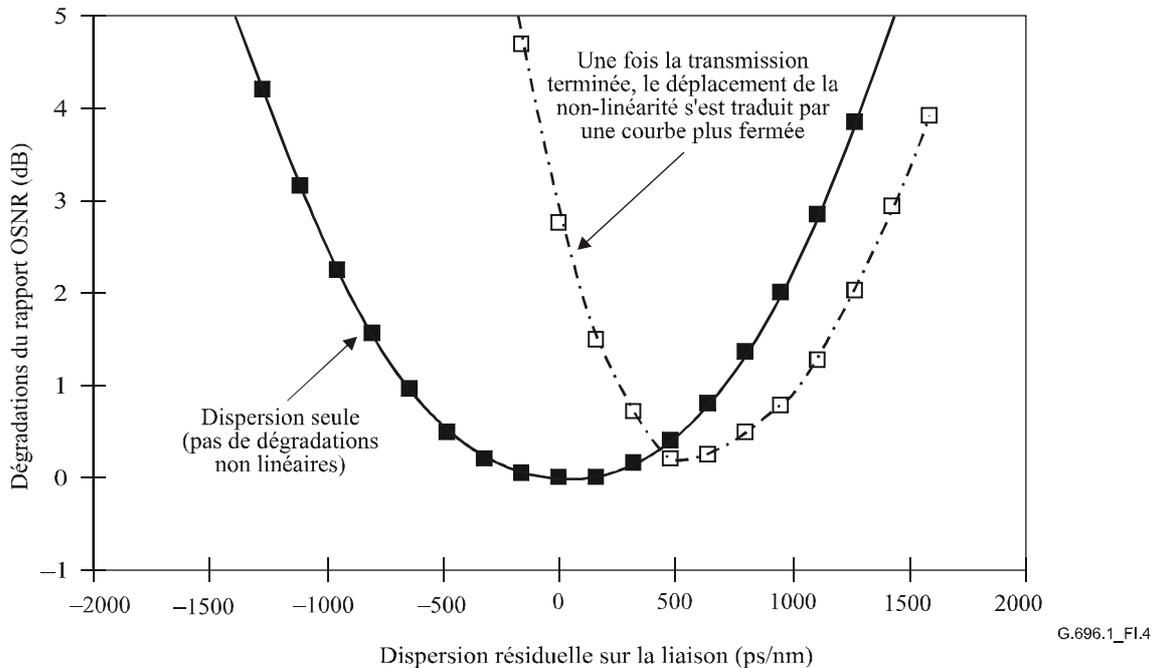


Figure I.4/G.696.1 – Exemple de l'effet de non-linéarité sur la tolérance de dispersion une fois la transmission terminée

I.2.5 Effets cumulés de l'affaiblissement dû à la polarisation

Les composants optiques tels que les filtres WDM, les affaiblisseurs optiques variables (VOA, *variable optical attenuator*) ou les amplificateurs optiques présentent un affaiblissement dû à la polarisation (PDL, *polarization dependent loss*) fini pouvant varier entre 0,1 et 0,3 dB par dispositif, voire plus. L'affaiblissement PDL exerce une modulation d'intensité stochastique sur les signaux optiques due aux variations de polarisation du signal dans le temps. Sous les effets de la variation du gain en fonction de la polarisation (PDG, *polarization dependent gain*), les fluctuations de la puissance induite sont transformées dans les amplifications optiques en fluctuations du rapport OSNR.

Dans un système à grande distance étendu comportant de nombreux éléments de réseau optique concaténés, l'affaiblissement PDL accumulé peut causer une fluctuation de puissance importante, pouvant dégrader la qualité de fonctionnement et la stabilité du réseau. Toutefois, il n'existe pas nécessairement une corrélation bijective entre les fluctuations de puissance et les variations du rapport OSNR. Les fluctuations peuvent être trop rapides pour être entièrement compensées par une égalisation de gain dynamique.

I.3 Techniques utilisées pour atténuer les dégradations

Dans la pratique, il existe diverses techniques permettant d'améliorer la performance d'une liaison laDI, telles que les suivantes:

- i) égalisation de gain dynamique;
- ii) codage de ligne;
- iii) nombre de canaux optiques et espacement de ceux-ci;
- iv) types de fibres;
- v) mélange de différents types de fibres sur un même tronçon.

I.3.1 Egalisation de gain dynamique

Afin de compenser la pente de gain introduite par une longue chaîne d'amplificateurs, il est possible d'utiliser un analyseur de spectre optique (OSA, *optical spectrum analyzer*) ou un contrôleur de puissance optique (OPM, *optical power monitor*) ainsi que des filtres éliminateurs de gain réglables pour égaliser de manière satisfaisante le signal composite DWDM dans tous les canaux.

I.3.2 Format de modulation

L'utilisation de formats de modulation autres que le format NRZ peut présenter des avantages dans certaines circonstances.

Comme indiqué dans le Supplément UIT-T G.39, les systèmes à codage de ligne avec retour à zéro (RZ) tolèrent sensiblement mieux une dispersion PMD du premier ordre que les systèmes NRZ. De plus, des formats modifiés de codage RZ, peuvent aussi présenter des atouts en terme de renforcement de la tolérance aux non-linéarités. Ces caractéristiques incitent à utiliser le codage de ligne RZ pour les très grandes distances de liaison particulièrement exposées à la dispersion PMD et aux effets non linéaires.

Par ailleurs, le codage RZ présente un inconvénient potentiel (en raison de l'obligation d'employer une largeur de bande plus grande) qui le rend moins efficace du point de vue spectral que le codage NRZ (voir le Supplément UIT-T G.39) et est généralement plus sensible à la dispersion chromatique résiduelle que le codage NRZ. C'est la raison pour laquelle les systèmes qui adoptent le format de modulation RZ demandent à être définis de manière plus précise et nécessitent une compensation de la dispersion associée à la liaison.

Des codes de ligne autres que NRZ et RZ, présentant chacun leurs avantages et leurs inconvénients, peuvent aussi être appliqués aux systèmes DWDM. Pour les très grandes longueurs de liaison et les signaux DWDM de très grande capacité, notamment, le choix d'un code de ligne donné sera déterminé par la conception optimale du système considéré.

I.3.3 Nombre de canaux optiques et espacement de ceux-ci

En règle générale, le nombre maximal de canaux DWDM permettant d'obtenir une performance satisfaisante tendra à diminuer à mesure que la longueur de la liaison augmentera et/ou que l'espacement des canaux optiques diminuera, en raison de l'incidence accrue de la non-linéarité optique.

I.3.4 Types de fibres

Un type de fibres peut présenter un avantage ou un inconvénient par rapport à un autre dans certaines conditions. Dans la bande C par exemple, les fibres G.652 ont une dispersion chromatique plus importante que les fibres G.655 ou G.653 et, de ce fait, peuvent introduire des effets non linéaires moindres. Toutefois, le gain Raman dépend considérablement du type de fibre et les fibres G.652, en raison de leur grand diamètre de champ de mode, présentent un gain Raman plus petit que les autres fibres pour une puissance de pompage donnée.

I.3.5 Mélange de différents types de fibres sur un même tronçon

Une technique qui peut être utilisée pour atténuer les effets de non-linéarité sur les fibres consiste à mélanger délibérément des fibres de caractéristiques différentes sur un même tronçon. Par exemple, un tronçon comportant en alternance des fibres à dispersion positive et négative aura une valeur élevée de dispersion locale (parfaitement indiquée pour limiter les effets de la modulation transphase (XPM) et du mélange de quatre ondes (FWM)) mais une faible valeur de dispersion nette (rendant moins nécessaire la compensation de la dispersion).

Dans le cas d'une liaison comportant des types de fibres différents sur des tronçons différents, on pourra être amené à utiliser une puissance d'injection différente sur chaque tronçon selon les types de fibres utilisés sur les 20 premiers kilomètres de chaque tronçon, afin de réduire au minimum la distorsion non linéaire.

I.4 Exemple concret

Il ressort clairement des considérations qui précèdent que le nombre de tronçons qui peut être retenu dans la pratique pour un espacement entre canaux, une région de longueurs d'onde de fonctionnement, un débit binaire et une perte par tronçon donnés sera fonction des différents choix qui seront effectués au niveau de la conception du système, concernant notamment le schéma de codage FEC à utiliser, le recours éventuel à l'égalisation de gain dynamique ou le recours éventuel à l'utilisation de l'amplification Raman, etc.

Toutefois, à titre d'exemple de technologie disponible, un système répondant aux caractéristiques suivantes:

- espacement minimal entre canaux: 100 GHz;
- région de longueurs d'onde de fonctionnement: bande C (1530 à 1565 nm);
- classe client: 10G;
- perte par tronçon: 22 dB;
- type de fibre G.652;
- correction FEC G.709/Y.1331.

peut aujourd'hui être mis en place de manière rentable pour un maximum d'environ 15 tronçons.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ISLAM (M.N.) (Ed.): Raman Amplifiers for Telecommunications 2 Sub-Systems and Systems, *Springer Series in Optical Sciences*, Vol. 90/2, pp. 432, 2004 (ISBN:0-387-40656-5).
- [2] AOKI (Y.) *et al.*: Properties of fibre Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems, *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, pp. 1225-1239, 1988.

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