

**Remplacée par une version plus récente**



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

**UIT-T**

SECTEUR DE LA NORMALISATION  
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS  
DE L'UIT

**G.663**

(10/96)

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

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

---

**Aspects relatifs à l'application des  
sous-systèmes et dispositifs amplificateurs à  
fibre optique**

Recommandation UIT-T G.663  
Remplacée par une version plus récente

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

---

# Remplacée par une version plus récente

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
<b>SYSTÈMES INTERNATIONAUX ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS</b>	
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
<b>CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION</b>	
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
<b>Caractéristiques des composants et sous-systèmes optiques</b>	<b>G.660–G.699</b>
<b>SYSTÈMES DE TRANSMISSION NUMÉRIQUES</b>	
EQUIPEMENTS TERMINAUX	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999

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

# Remplacée par une version plus récente

## RECOMMANDATION UIT-T G.663

### ASPECTS RELATIFS À L'APPLICATION DES SOUS-SYSTÈMES ET DISPOSITIFS AMPLIFICATEURS À FIBRE OPTIQUE

#### Résumé

La présente Recommandation traite des aspects relatifs à l'application des dispositifs et sous-systèmes amplificateurs à fibre optique (OFA, *optical fibre amplifier*), essentiellement utilisés dans les systèmes numériques, et elle convient uniquement pour les systèmes fonctionnant dans la gamme des 1550 nm. Les applications comprennent à la fois les systèmes à canal unique et les systèmes à canaux multiples utilisés dans les configurations point à point et dans les configurations point à multipoint pour les réseaux à grande distance et les réseaux à accès optique. Cette Recommandation a pour objet d'identifier quels aspects doivent être considérés pour chaque application et de spécifier les valeurs de paramètres appropriées et les gammes pour chaque type de dispositif amplificateur à fibre optique (OFA).

#### Source

La Recommandation UIT-T G.663, élaborée par la Commission d'études 15 (1993-1996) de l'UIT-T, a été approuvée par la CMNT (Genève, 9-18 octobre 1996).

# Remplacée par une version plus récente

## AVANT-PROPOS

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

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

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

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

## NOTE

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

## DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

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

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

© UIT 1997

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

# Remplacée par une version plus récente

## TABLE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
1	Domaine d'application..... 1
2	Références normatives..... 1
3	Terminologie..... 2
4	Abréviations..... 2
5	Applications..... 4
5.1	Suramplificateur..... 4
5.2	Préamplificateur..... 5
5.3	Amplificateur de ligne..... 5
5.4	Émetteur à amplification optique..... 6
5.5	Récepteur à amplification optique..... 6
5.6	Applications mono-canal..... 6
5.7	Applications à canaux multiples..... 6
5.8	Applications point à point..... 7
5.9	Applications point à multipoint..... 7
6	Aspects de gestion d'exploitation et de maintenance..... 7
7	Gammes et valeurs paramétriques pour les composants OFA..... 7
7.1	Suramplificateur..... 7
7.1.1	Point à point..... 7
7.1.2	Point à multipoint..... 8
7.2	Préamplificateur..... 8
7.2.1	Point à point..... 8
7.3	Amplificateur en ligne..... 8
7.3.1	Point à point..... 8
7.3.2	Point à multipoint..... 9
8	Valeurs de paramètres et gammes de paramètres pour les aspects relatifs aux amplificateurs à fibre optique dans les sous-systèmes amplificateurs à fibre optique (OFA)..... 9
8.1	Émetteur à amplification optique..... 9
8.2	Récepteur à amplification optique..... 9
9	Conditions d'environnement..... 9
10	Considérations de sécurité optique..... 9

# Remplacée par une version plus récente

## Page

Appendice I – Gammes et valeurs de paramètres pour les composants OFA dans les systèmes point à point à canal unique.....	10
I.1 Suramplificateur.....	10
I.2 Préamplificateur.....	10
Appendice II – Aspects relatifs à la transmission .....	11
II.1 Objet.....	11
II.2 Facteurs ayant une influence sur les applications de transmission avec amplificateurs à fibre optique (OFA).....	12
II.3 Non-linéarités optiques .....	12
II.3.1 Effet de diffusion Brillouin stimulée.....	13
II.3.2 Mélange de quatre ondes .....	14
II.3.3 Instabilité de modulation .....	17
II.3.4 Automodulation de phase .....	19
II.3.5 Formation de solitons .....	20
II.3.6 Modulation de phase croisée .....	20
II.3.7 Diffusion Raman stimulée.....	21
II.3.8 Récapitulatif des non-linéarités des fibres optiques .....	22
II.4 Caractéristiques de polarisation .....	22
II.4.1 Dispersion modale de polarisation .....	22
II.4.2 Affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL).....	25
II.4.3 Saturation spectralement sélective (PHB).....	26
II.5 Caractéristiques de dispersion .....	28
II.5.1 Dispersion chromatique.....	28
II.6 Autres caractéristiques relatives aux amplificateurs à fibre optique (OFA) .....	29
II.6.1 Accumulation de bruit .....	29
II.6.2 Effet d'autofiltrage.....	30
II.6.3 Génération d'impulsions de surpuissance optique.....	32
Appendice III – Paramètres relatifs au préamplificateur .....	33
Appendice IV – Aspects relatifs à la gestion, à l'exploitation et à la maintenance (OAM) des amplificateurs à fibre optique (OFA).....	36
IV.1 Sous-systèmes OFA.....	36
IV.2 Composants amplificateurs à fibre optique (OFA).....	36

# Remplacée par une version plus récente

## Recommandation G.663

### ASPECTS RELATIFS À L'APPLICATION DES SOUS-SYSTÈMES ET DISPOSITIFS AMPLIFICATEURS À FIBRE OPTIQUE<sup>1</sup>

(Genève, 1996)

#### 1 Domaine d'application

La présente Recommandation traite des aspects relatifs à l'application des dispositifs et sous-systèmes amplificateurs à fibre optique (OFA, *optical fibre amplifier*), essentiellement utilisés dans les systèmes numériques, et elle s'applique uniquement aux systèmes fonctionnant dans la gamme des 1550 nm. Les caractéristiques génériques des dispositifs et sous-systèmes d'amplification à fibre optique sont décrites dans la Recommandation G.662. Les applications comprennent à la fois les systèmes à canal unique et les systèmes à canaux multiples utilisés dans les configurations point à point et dans les configurations point à multipoint pour les réseaux à grande distance et les réseaux à accès optique.

La présente Recommandation a pour objet d'identifier quels aspects doivent être considérés pour chaque application et de spécifier les gammes et les valeurs communes de paramètres pour chaque type de dispositif amplificateur à fibre optique (suramplificateur, préamplificateur et amplificateur en ligne). La présente Recommandation traite du développement de nouveaux équipements, y compris les composants OFA et inclut des directives en vue de l'application des composants et sous-systèmes OFA aux équipements existants. En tant qu'objectif, pour des systèmes spécifiés comme étant transversalement compatibles, le degré de compatibilité ne doit pas être modifié par l'utilisation de composants OFA.

Parmi les sujets importants développés dans la présente Recommandation, il convient de citer les aspects de transmission, de maintenance et de sécurité optique.

#### 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 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.

- Recommandation UIT-T G.650 (1997), *Définition des paramètres des fibres monomodes et méthodes de test associées.*

---

<sup>1</sup> La présente Recommandation constituera la partie d'une série de Recommandations relative à la mise en réseau optique, de façon suivante:

composants et sous-systèmes	séries G.660 et G.670
caractéristiques fonctionnelles	série G.680
aspects de couche Physique	série G.690

## Remplacée par une version plus récente

- Recommandation UIT-T G.652 (1997), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes.*
- Recommandation UIT-T G.653 (1997), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion décalée.*
- Recommandation UIT-T G.655 (1996), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion nulle.*
- Recommandation UIT-T G.661 (1996), *Définition et méthodes de mesure des paramètres génériques relatifs aux amplificateurs à fibres optiques.*
- Recommandation UIT-T G.662 (1995), *Caractéristiques génériques des dispositifs et sous-systèmes amplificateurs à fibres optiques.*
- Recommandation UIT-T G.671 (1996), *Caractéristiques de transmission des composants optiques passifs.*
- Recommandation UIT-T G.681 (1996), *Caractéristiques fonctionnelles des jonctions urbaines et interurbaines utilisant des amplificateurs optiques et des multiplexeurs optiques.*
- Recommandation UIT-T G.783 (1997), *Caractéristiques des équipements de la hiérarchie numérique synchrone.*
- Recommandation UIT-T G.955 (1996), *Systèmes de lignes numériques fondés sur la hiérarchie à 1544 kbit/s et à 2048 kbit/s sur câbles optiques.*
- Recommandation UIT-T G.957 (1995), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone.*
- Recommandation UIT-T G.958 (1994), *Systèmes de ligne numérique fondés sur la hiérarchie numérique synchrone, pour utilisation sur câbles à fibres optiques.*
- Publication CEI 721-3:1984, *Classification des groupements des agents d'environnement et de leurs sévérités.*
- Publication CEI 825-1:1993, *Sécurité des appareils à laser – Partie 1: classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur.*
- Publication CEI 825-2:1993, *Sécurité des appareils à laser – Partie 2: sécurité des systèmes de télécommunication par fibres optiques.*

### 3 Terminologie

Les définitions données dans les Recommandations G.661 et G.662 s'appliquent aux fins de la présente Recommandation.

### 4 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

AM	modulation d'amplitude ( <i>amplitude modulation</i> )
ASE	émission spontanée amplifiée ( <i>amplified spontaneous emission</i> )
BA	suramplificateur [ <i>booster (power) amplifier</i> ]
BER	taux d'erreur binaire ( <i>bit-error ratio</i> )
CD	dispersion chromatique ( <i>chromatic dispersion</i> )

## Remplacée par une version plus récente

CMC	canaux multiples cohérents ( <i>coherent multi-channel</i> )
CW	onde entretenue ( <i>continuous wave</i> )
DA	adaptation de dispersion ( <i>dispersion accomodation</i> )
EDFA	amplificateur à fibre dopée à l'erbium ( <i>erbium-doped fibre amplififer</i> )
FWHM	largeur maximale à mi-hauteur ( <i>full width at half maximum</i> )
FWM	mélange de quatre ondes ( <i>four wave mixing</i> )
LA	amplificateur de ligne ( <i>line amplififer</i> )
LOS	perte du signal ( <i>loss of signal</i> )
MI	instabilité de modulation ( <i>modulation instability</i> )
MRF	multiplexage par répartition en fréquence
OAM	gestion, exploitation et maintenance ( <i>operation, administration and maintenance</i> )
OAN	réseaux à amplification optiques ( <i>optically amplified networks</i> )
OAR	récepteur à amplification optique ( <i>optically amplified receiver</i> )
OAT	émetteur à amplification optique ( <i>optically amplified transmitter</i> )
OFA	amplificateur à fibre optique ( <i>optical fibre amplififer</i> )
OFDM	multiplexage dans le domaine des fréquences optiques ( <i>optical frequency domain multiplexing</i> )
ORL	affaiblissement d'adaptation optique ( <i>optical return loss</i> )
PA	préamplificateur ( <i>pre-amplififer</i> )
PM	modulation de phase ( <i>phase modulation</i> )
PDH	hiérarchie numérique plésiochrone ( <i>plesiochronous digital hierarchy</i> )
PDL	affaiblissement en fonction de la polarisation ( <i>polarization dependent loss</i> )
PHB	saturation spectralement sélective due à la polarisation ( <i>polarization hole burning</i> )
PMD	dispersion modale de polarisation ( <i>polarization mode dispersion</i> )
PSK	modulation par déplacement de phase ( <i>phase shift keying</i> )
SBS	diffusion Brillouin stimulée ( <i>stimulated Brillouin scattering</i> )
SDH	hiérarchie numérique synchrone ( <i>synchronous digital hierarchy</i> )
SMF	fibre monomode ( <i>single-mode fibre</i> )
SNR	rapport signal/bruit ( <i>signal-to-noise ratio</i> )
SPM	automodulation de phase ( <i>self phase modulation</i> )
SRS	diffusion raman stimulée ( <i>stimulated raman scattering</i> )
TRE	équipement récepteur terminal ( <i>terminal receiver equipment</i> )
WDM	multiplexage par répartition en longueur d'onde ( <i>wavelength division multiplexing</i> )
XPM	modulation de phase croisée ( <i>cross phase modulation</i> )

# Remplacée par une version plus récente

## 5 Applications

L'application d'amplificateurs à fibre optique (OFA) dans les systèmes de transmission optique présente de nombreux avantages. Le principal de ces avantages est la capacité d'espacer considérablement les répéteurs et les régénérateurs sur les lignes de transmission. Le déploiement des amplificateurs à fibre optique est susceptible de permettre le retrait de nombreux points de régénération classiques et, dans le cas de nouvelles voies de transmission, de rendre inutile la construction de bien des nouveaux points de régénération. Les amplificateurs à fibre optique (OFA) permettent également d'envisager sérieusement les nouvelles architectures de systèmes optiques pour les applications dans les réseaux terrestres et sous-marins à grande distance, et dans les réseaux d'accès. Ceci est illustré par deux exemples tels que le multiplexage par répartition en longueur d'onde et les applications point à multipoint, méthodes jusque là généralement considérées comme étant excessivement complexes et onéreuses. Les amplificateurs à fibre optique (OFA) présentent également des avantages potentiels en ce qui concerne les possibilités de modernisation des réseaux en raison de leur indépendance du format de modulation et du débit.

Cependant, l'utilisation des amplificateurs à fibre optique met également en lumière des dégradations nouvelles et potentiellement graves pour les systèmes, résultant des niveaux élevés de puissance produits par les amplificateurs à fibre optique (OFA) et des grandes distances entre les régénérateurs. Ces effets de transmission comprennent les non-linéarités de la fibre optique, les effets de polarisation et les effets dus aux caractéristiques d'amplification de l'amplificateur à fibre optique (OFA) lui-même. La dispersion chromatique joue également un rôle accru pour les systèmes de transmission à grande distance sans régénération que permet l'amplificateur à fibre optique (OFA). Outre les restrictions dues à dispersion chromatique, les caractéristiques de dispersion de la fibre ont une influence sur la sévérité des dégradations produites par plusieurs effets non linéaires majeurs. En conséquence, la prise en compte de la dispersion est apparue comme un aspect essentiel dans la conception du système. Dans les sous-paragraphes suivants, les applications OFA sont décrites et des aspects importants sont mis en évidence pour chaque application.

Si les caractéristiques sont compatibles longitudinalement, les composants OFA spécifiés dans la présente Recommandation peuvent être également utilisés pour accroître la distance dans les systèmes de transmission optique (qui ne sont pas compatibles dans le sens transversal) pour la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH) selon la Recommandation G.955. Afin d'assurer la compatibilité transversale entre les composants OFA et les équipements de la hiérarchie numérique synchrone (SDH), et de satisfaire les spécifications des Recommandations série G.690, des équipements conformes aux points 6.1 et 6.22 de la Recommandation G.957 ou bien un (ou plusieurs) répéteur(s) peuvent être utilisés.

### 5.1 Suramplificateur

Le suramplificateur (BA) est un dispositif OFA à puissance de saturation élevée devant être utilisé directement après l'émetteur optique pour augmenter la puissance de signal. Il n'existe pas de spécifications rigoureuses imposées aux suramplificateurs en matière de bruit et de filtrage optique. Les fonctions de gestion, d'exploitation et de maintenance (OAM) relatives au suramplificateur peuvent être partagées ou non avec l'émetteur optique.

Les utilisations des suramplificateurs (souvent en association avec les préamplificateurs) sont très intéressantes, en particulier dans les cas où des positions intermédiaires pour des équipements actifs sont peu souhaitables ou inaccessibles, comme c'est le cas pour les systèmes sous-marins. Quoi qu'il en soit, un nombre limité de positions intermédiaires signifie que la maintenance sera facilitée pour l'exploitant de réseau. Le moyen le plus direct et le plus simple d'augmenter le bilan de puissance disponible est d'utiliser soit un suramplificateur (BA) immédiatement après l'émetteur normal ou un émetteur à amplificateur optique (voir la section 5.4).

## Remplacée par une version plus récente

Etant donné que la puissance de sortie est relativement élevée, le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) non souhaitable, intrinsèquement présent en raison du processus statistique de génération des photons à l'intérieur de l'OFA, est en général négligeable. Cependant, l'utilisation des suramplificateurs (BA) peut entraîner des pénalités de fonctionnement du système en raison de la non-linéarité de la fibre et des niveaux élevés de puissance optique que produisent les suramplificateurs et des longueurs interactives considérables dues au trajet optique.

### 5.2 Préamplificateur

Le préamplificateur (PA) est un dispositif OFA à très faible bruit qui s'installe juste avant le récepteur optique afin d'en améliorer la sensibilité. Le faible niveau du bruit d'émission spontané requis peut être obtenu par l'utilisation de filtres optiques à bande étroite. Dans ce cas, l'ajustement automatique de la longueur d'onde centrale du filtre préamplificateur à la longueur d'onde de l'émetteur serait intéressant, car cet ajustement permettrait d'obtenir des spécifications moins strictes à la fois sur la tolérance de longueur d'onde initiale de l'émetteur et sur sa stabilité à long terme. Comme cela a été noté préalablement, l'utilisation de préamplificateurs (habituellement en association avec les suramplificateurs) est un moyen simple d'obtenir des augmentations importantes du bilan de puissance disponible. La fonction OAM pour les préamplificateurs (PA) peut ou non être partagée avec le récepteur optique. Dans les systèmes STM-64 ou dans les systèmes de niveau supérieur, l'utilisation d'une configuration avec préamplificateur seul peut être utile (par exemple afin d'éviter des problèmes potentiels en raison des non-linéarités de la fibre).

### 5.3 Amplificateur de ligne

L'amplificateur de ligne (LA) est un dispositif OFA à faible bruit à utiliser entre des sections passives de fibre afin d'augmenter les distances entre régénérateurs, ou en association avec une connexion multipoint afin de compenser les pertes de couplage dans le réseau d'accès optique. Comme cela a été noté précédemment, les amplificateurs de ligne pourraient remplacer certains ou tous les régénérateurs classiques dans les sections de fibre à grande distance. Le remplacement de plus d'un régénérateur classique par un amplificateur de ligne (LA) peut être envisagé, ce qui aurait évidemment l'avantage de réduire le nombre d'équipements dans les liaisons de transmission. En outre, il est possible d'envisager une situation dans laquelle à la fois les amplificateurs de ligne pour compenser l'atténuation du signal et les régénérateurs classiques pour compenser la distorsion du signal feraient leur apparition dans les réseaux à grande distance.

Un canal de communication distinct doit exister dans les systèmes utilisant les amplificateurs de ligne (LA) pour permettre de surveiller, d'émettre des alarmes et de commander les amplificateurs de ligne installés à distance. Un tel canal de surveillance ne devrait pas imposer de contraintes pour la sélection de la longueur d'onde du laser de pompage ou sur la fenêtre de fonctionnement. Étant donné que chaque amplificateur de ligne doit pouvoir insérer son propre statut et ses propres informations d'alarme, le canal de surveillance doit être récupéré, régénéré (avec l'insertion de nouvelles informations) et retransmis par chaque amplificateur de ligne (LA).

Des distances de transmission théoriquement ultra longues (sur des milliers de kilomètres) peuvent être réalisées en insérant périodiquement des amplificateurs de ligne sur le trajet optique. Cependant, dans le cas où de nombreux composants OFA sont montés en cascade, une détérioration de la qualité de fonctionnement du système peut se produire en raison de l'accumulation de bruit, de la dépendance spectrale du gain total, des effets de polarisation, ainsi que de la dispersion chromatique et des effets non linéaires. Les essais de laboratoire ont démontré que le comportement total du système était beaucoup plus complexe dans le cas de mise en cascade de nombreux amplificateurs sur une ligne de transmission que dans le cas de mise en cascade de quelques amplificateurs sur une ligne de transmission. En particulier, le gain total d'une chaîne d'amplificateurs mis en série sur une ligne atteint en général un maximum pour une longueur d'onde spécifique, selon la configuration de

## Remplacée par une version plus récente

l'amplificateur spécifique, en réduisant considérablement la plage utilisable des longueurs d'onde dans la gamme de fonctionnement de l'amplificateur à fibre optique (OFA). C'est pourquoi la conception de ce type de système sera très différente de celle comprenant uniquement quelques amplificateurs montés en cascade.

### 5.4 Émetteur à amplification optique

L'émetteur à amplification optique (OAT) est un sous-système OFA dans lequel un amplificateur de puissance est intégré à l'émetteur laser, ce qui donne un émetteur de forte puissance. La connexion entre l'émetteur et le système OFA est propre au constructeur et ne doit pas être spécifiée. Les considérations d'utilisation des émetteurs à amplification optique sont généralement les mêmes que celles des suramplificateurs (BA) (voir 5.1).

### 5.5 Récepteur à amplification optique

Le récepteur à amplification optique (OAR) est un sous-système OFA dans lequel un préamplificateur est intégré au récepteur optique, ce qui donne un récepteur à haute sensibilité. La connexion entre le récepteur et le sous-système OFA est propre au constructeur et ne doit pas être spécifiée. Les considérations d'utilisation des OAR sont généralement les mêmes que celles des préamplificateurs (PA) (voir 5.2).

### 5.6 Applications mono-canal

Les suramplificateurs (BA), les préamplificateurs, les amplificateurs de ligne (LA), les émetteurs à amplification optique (OAT) et les récepteurs à amplification optique (OAR) peuvent tous trouver leur application dans des systèmes mono-canal. Dans le cas de transmission sur canal unique, l'accumulation de bruit peut être réduite en utilisant des composants amplificateurs optiques (OFA) à faible bruit en association avec un filtrage optique approprié de bande passante. Les limitations de dispersion peuvent être normalement réduites au minimum en fonctionnant à proximité de la longueur d'onde de dispersion nulle de la fibre ou en utilisant des techniques appropriées d'adaptation de dispersion. En outre, il convient de veiller au contrôle des effets non linéaires, comme l'effet de diffusion Brillouin stimulée (voir II.3.1) et l'automodulation de phase (voir II.3.4).

Les principales valeurs de paramètres aux interfaces de trajet optique pour les systèmes à canal unique en point à point à grande distance, dans la hiérarchie numérique synchrone (SDH), utilisant les amplificateurs à fibre optique OFA sont décrits dans les Recommandations de la série G.690. Les configurations de référence et les caractéristiques fonctionnelles de ces systèmes sont décrites dans la Recommandation G.681.

### 5.7 Applications à canaux multiples

Les amplificateurs optiques (OFA) trouveront également leur application dans les systèmes à canaux multiples. Outre les dégradations de transmission rencontrées sur les systèmes à canal unique, les systèmes à canaux multiples peuvent également subir des dégradations de performances en raison de certains effets non linéaires. Ces effets comprennent le mélange de quatre ondes (FWM), la modulation de phase croisée (XPM) et éventuellement la diffusion Raman stimulée (SRS). En conséquence, des précautions particulières doivent être prises lors de la conception de systèmes à canaux multiples pour éviter ou réduire ces dégradations. Dans les systèmes à canaux multiples utilisant une série d'amplificateurs sur une ligne afin d'obtenir des distances importantes sans régénération, les effets des amplificateurs en cascade, et notamment la réduction du spectre de gain utilisable, doivent également être considérés.

# Remplacée par une version plus récente

Les valeurs de paramètres des interfaces optiques pour les systèmes à canaux multiples en point à point à grande distance, dans la hiérarchie numérique synchrone (SDH), utilisant les amplificateurs optiques sont décrites dans les Recommandations G.690. Les configurations de référence et les caractéristiques fonctionnelles de ces systèmes sont décrites dans la Recommandation G.681.

## 5.8 Applications point à point

Des schémas d'insertion de composants et de sous-systèmes OFA dans les applications point à point sont indiqués dans la Recommandation G.662 (voir en particulier les Figures 1/G.662, 2/G.662 et 3/G.662).

## 5.9 Applications point à multipoint

Les amplificateurs optiques peuvent être utilisés dans les réseaux amplifiés optiquement (OAN) afin d'augmenter le bilan de puissance optique ou de permettre un nombre plus élevé de dérivations dans les réseaux point à multipoint. De ce fait, on utilisera de manière générale à la fois les amplificateurs de puissance et les amplificateurs de ligne dans ces types de réseaux. L'utilisation des amplificateurs optiques (OFA) dans les réseaux en anneau juste à l'avant des dispositifs de dérivation, afin de compenser les pertes de dérivation/de branchement, est un exemple d'application potentielle.

NOTE – L'une des premières applications des amplificateurs optiques peut être la distribution de signaux vidéo. Au début, des systèmes seront probablement analogiques, mais ils céderont progressivement le pas à des réseaux numériques. Dans le cas de systèmes analogiques pour la vidéo, des spécifications complémentaires à celles des amplificateurs optiques (OFA) pour les applications numériques sont nécessaires pour éviter les distorsions du signal et pour maintenir un rapport approprié entre la porteuse et le bruit. Si, par exemple, des lasers modulés en d'amplitude (AM) sont utilisés, la caractéristique de gain OFA doit être très plate pour éviter des conversions de fréquences en modulation d'intensité, entraînant des distorsions accrues du signal. Cet effet peut être réduit au minimum lorsqu'on utilise des lasers fonctionnant en ondes continues (CW) en association avec des modulateurs externes. Ceci permet également de réduire au minimum les effets de polarisation. Il convient de veiller tout particulièrement à maintenir la puissance de sortie des amplificateurs optiques (OFA) à des niveaux acceptables afin de réduire les effets non linéaires tels que l'effet de diffusion Brillouin stimulée (SBS).

## 6 Aspects de gestion d'exploitation et de maintenance

Certaines considérations sur les aspects de gestion, d'exploitation et de maintenance (OAM) des amplificateurs optiques (OFA) sont données à l'Appendice IV.

## 7 Gammes et valeurs paramétriques pour les composants OFA

Dans ce paragraphe, les valeurs de paramètres des composants OFA (BA, PA, LA) sont fournies, selon les énumérations fournies dans les articles 7/G.662, 8/G.662 et 9/G.662, avec l'objectif d'apporter autant de compatibilité optique transverse que possible parmi les sous-systèmes OFA et les composants OFA dans les configurations point à point.

### 7.1 Suramplificateur

#### 7.1.1 Point à point

Les paramètres de sortie pour les amplificateurs optiques sont spécifiques au système et sont spécifiés dans les Recommandations série G.690 afférentes au système. On trouvera des exemples de valeurs de paramètres d'entrée pour les amplificateurs de puissance dans l'Appendice I. Les paramètres de sortie pour les amplificateurs de puissance, comme cela est décrit par les interfaces

# Remplacée par une version plus récente

dans les Recommandations afférentes aux systèmes, sont supposés être également applicables aux systèmes à hiérarchie numérique plésiochrone (PDH).

## 7.1.1.1 Systèmes à canal unique

On trouvera à l'Appendice I des valeurs de paramètres d'entrée pour les amplificateurs de puissance. Les valeurs des paramètres de sortie sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

## 7.1.1.2 Systèmes à canaux multiples

Les valeurs des paramètres d'entrée pour les amplificateurs de puissance à utiliser dans les systèmes numériques à canaux multiples font l'objet d'un complément d'étude. Les valeurs des paramètres de sortie sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

## 7.1.2 Point à multipoint

Étant donné que les applications dans les architectures point à multipoint nécessitant des amplificateurs de puissance sont susceptibles d'être plus souvent de type analogique, les valeurs des paramètres associés font l'objet d'un complément d'étude.

## 7.2 Préamplificateur

### 7.2.1 Point à point

Les paramètres d'entrée pour les préamplificateurs sont spécifiques au système et sont spécifiés dans les Recommandations série G.690 afférentes au système. On trouvera à l'Appendice I des exemples de valeurs de paramètres de sortie pour les préamplificateurs. Les paramètres d'entrée pour les préamplificateurs, tels qu'ils sont décrits par les interfaces dans les Recommandations afférentes au système, sont supposés être applicables également aux systèmes PDH.

#### 7.2.1.1 Systèmes à canal unique

On trouvera à l'Appendice I des exemples de valeurs de paramètres de sortie pour les préamplificateurs. Les valeurs des paramètres d'entrée sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

#### 7.2.1.2 Systèmes à canaux multiples

Les valeurs des paramètres de sortie pour les préamplificateurs à utiliser dans les systèmes numériques à canaux multiples font l'objet d'un complément d'étude. Les valeurs des paramètres d'entrée sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

## 7.3 Amplificateur en ligne

### 7.3.1 Point à point

#### 7.3.1.1 Systèmes à canal unique

Les valeurs spécifiques des paramètres relatifs aux amplificateurs de ligne dans les systèmes point à point à canal unique sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

#### 7.3.1.2 Systèmes à canaux multiples

Les valeurs spécifiques des paramètres relatifs aux amplificateurs de ligne dans les systèmes point à point à canaux multiples sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

# Remplacée par une version plus récente

## 7.3.2 Point à multipoint

Étant donné que les applications dans les architectures point à multipoint nécessitant des amplificateurs de ligne sont susceptibles d'être plus souvent de type analogique, les valeurs des paramètres associés font l'objet d'un complément d'étude.

## 8 Valeurs de paramètres et gammes de paramètres pour les aspects relatifs aux amplificateurs à fibre optique dans les sous-systèmes amplificateurs à fibre optique (OFA)

### 8.1 Émetteur à amplification optique

Les valeurs de paramètres pour les émetteurs à amplification optique pour les applications mono-canal et pour les systèmes à canaux multiples sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

### 8.2 Récepteur à amplification optique

Les valeurs de paramètres pour les récepteurs à amplification optique pour les applications mono-canal et pour les systèmes à canaux multiples sont spécifiées dans les Recommandations série G.690.

## 9 Conditions d'environnement

Différentes classes de conditions d'environnement sont spécifiées dans la Publication CEI 721-3-0 (1984) et l'Amendement n° 1 (1987). D'autres détails se trouvent dans la Publication CEI 721-3-1 (1987), Amendement n° 1 (1991) et Amendement n° 2 (1993) en ce qui concerne le stockage; dans la Publication CEI 721-3-2 (1985), Amendement n° 1 (1991) et Amendement n° 2 (1993) en ce qui concerne le transport; dans la Publication CEI 721-3-3 (1994) en ce qui concerne l'utilisation fixe, avec protection contre les intempéries, et dans la Publication CEI 721-3-4 (1995) en ce qui concerne l'utilisation stationnaire, sans protection contre les intempéries.

## 10 Considérations de sécurité optique

Dans certaines conditions (cassure de fibre, connecteurs ouverts), un amplificateur optique (OFA) peut émettre vers l'extérieur un faisceau dangereux pour la vue. Dans les conditions de la Publication CEI 825-1, les limites de puissance en Classe 1 à sécurité intrinsèque sont de 8,8 mW (+9,4 dBm) dans la bande des 1310 nm, et de 10 mW (+10 dBm) dans la bande des 1550 nm, alors que les niveaux limites de sécurité en Classe 3 A (sécurité assurée sous réserve d'utilisation de lunettes de protection) sont respectivement de 24 mW (+13,8 dBm) dans la bande des 1310 nm et 50 mW (+ 17 dBm) dans la bande des 1550 nm. Les précautions particulières devant être prises, les prescriptions en vue de l'installation et de l'utilisation des systèmes optiques (y compris les amplificateurs), de même qu'une description des moyens d'observation sont données dans la Publication CEI 825-2.

En raison du niveau élevé de puissance optique, principalement dans les amplificateurs de puissance ou amplificateurs de puissance à l'émission et les émetteurs à amplification optique (OAT), les questions de sécurité optique et de production de surcharges optiques (c'est-à-dire les questions liées à la protection du personnel et des équipements) sont de toute première importance dans les systèmes de ligne utilisant les dispositifs et les sous-systèmes amplificateurs à fibre optique (OFA).

Une procédure appropriée pour l'arrêt et le redémarrage est indiquée dans la Recommandation G.681.

# Remplacée par une version plus récente

## APPENDICE I

### Gammes et valeurs de paramètres pour les composants OFA dans les systèmes point à point à canal unique

Dans cet appendice, des exemples de valeurs de paramètres pour les composants OFA (BA et PA) sont donnés pour des systèmes point à point à canal unique. Ces valeurs de paramètres sont conformes aux énumérations fournies dans les articles 7/G.662, 8/G.662 et 9/G.662 et ont été élaborées pour assurer dans la mesure du possible la compatibilité avec les valeurs de paramètres spécifiées dans la Recommandation G.957.

Comme cela est indiqué dans le paragraphe 7 de la présente Recommandation, les spécifications d'interface optique relatives au trajet optique principal sont fournies dans les Recommandations série G.690.

#### I.1 Suramplificateur

Les valeurs de paramètres indiquées dans le Tableau I.1 sont des exemples de la liste minimale des paramètres *d'entrée* pertinents (comme cela est indiqué dans la Recommandation G.662) pour les amplificateurs de puissance dans les systèmes point à point à canal unique. Seuls les paramètres d'entrée ont été inclus dans le tableau, étant donné que les paramètres de sortie sont spécifiques au système et sont spécifiés dans les Recommandations série G.690.

**Tableau I.1/G.663 – Paramètres d'entrée pour les amplificateurs de puissance dans les systèmes à canal unique**

Paramètre	Unité	Valeur
gamme de puissance d'entrée	dBm	-6/+3
niveau de puissance ASE en sens inverse	dBm	$\leq -20$
affaiblissement d'adaptation optique d'entrée (ORL)	dB	$\geq 27$
fuite de pompage	dBm	$\leq -15^a)$
affaiblissement maximal d'adaptation optique (ORL) toléré à l'entrée	dB	27
bande passante exprimée sous forme de longueur d'onde	nm	1530-1565
<sup>a)</sup> La valeur mesurée de -15 dBm (max) tient compte de toutes les contributions provenant de la répartition de l'énergie autour de la valeur crête jusqu'à la valeur de 30 dB en dessous de la valeur crête elle-même.		

#### I.2 Préamplificateur

Les valeurs de paramètres indiquées dans le Tableau I.2 sont des exemples de la liste minimale des paramètres *de sortie* pertinents (comme cela est indiqué dans la Recommandation G.662) pour les préamplificateurs dans les systèmes point à point à canal unique. Seuls les paramètres de sortie ont été inclus dans le tableau, étant donné que les paramètres d'entrée sont spécifiques au système et sont spécifiés dans les Recommandations série G.690.

# Remplacée par une version plus récente

Tableau I.2/G.663 – Paramètres de sortie pour les préamplificateurs dans les systèmes à canal unique

Paramètre	Unité	Valeur
gamme de puissance de sortie	dBm	-16/-9
gain à petits signaux	dB	$\geq 20$
facteur de bruit	dB	à l'étude
affaiblissement maximal d'adaptation optique (ORL) toléré en sortie	dB	27
puissance de sortie totale maximale*	dBm	-9
largeur de bande exprimée sous forme de longueur d'onde	nm	1530-1565
a) Ce paramètre est évalué dans la bande correspondant à la longueur d'onde du signal disponible, quand un filtre optique est utilisé à l'intérieur de l'amplificateur optique (OFA).		

## APPENDICE II

### Aspects relatifs à la transmission

#### II.1 Objet

Les amplificateurs à fibre optique permettent d'envisager de nouvelles architectures de transmission optique, grâce aux niveaux très élevés de puissance optique qu'ils fournissent et aux distances beaucoup plus importantes entre régénérateurs qu'ils autorisent. En conséquence, de nouveaux effets liés à la transmission et de nouvelles limitations sont apparues qui doivent être pris en compte. Ils incluent les non-linéarités optiques telles que l'effet de diffusion Brillouin stimulée, le mélange de quatre ondes, l'automodulation de phase, de même que les propriétés de dispersion telles que la dispersion modale de polarisation (PDM). En outre, les caractéristiques des amplificateurs optiques (OFA) peuvent également contribuer à augmenter les dégradations du système. De nombreuses méthodes de résolution des problèmes liés à la transmission ont fait l'objet de recherches. Cependant, les technologies diffèrent dans leurs performances et leurs applications.

Afin de concevoir des systèmes économiques et fiables utilisant les amplificateurs optiques (OFA) selon les Recommandations de l'UIT-T relatives aux paramètres d'interface optique, il est important que les exploitants de réseaux et les constructeurs partagent la même compréhension des problèmes liés aux amplificateurs optiques (OFA) et des remèdes qui peuvent leur être apportés. A cet effet, le présent sous-paragraphe a pour objet:

- de décrire les effets liés à la transmission provoqués par les non-linéarités optiques, les caractéristiques de dispersion chromatique et de polarisation, et autres caractéristiques liées aux amplificateurs optiques (OFA) dans les systèmes de transmission utilisant ces amplificateurs;
- d'identifier les limitations dues aux effets cités dans les différents types de systèmes de transmission (par exemple numérique/analogique, modulation cohérente, multiplexage par répartition en longueur d'onde, etc.);
- d'indiquer les remèdes possibles contre de telles dégradations, ainsi que le champ d'efficacité correspondant.

# Remplacée par une version plus récente

## II.2 Facteurs ayant une influence sur les applications de transmission avec amplificateurs à fibre optique (OFA)

Les facteurs ayant une influence sur les applications de transmission avec amplificateurs optiques (OFA) sont regroupés en quatre grandes catégories: non-linéarités optiques, caractéristiques de polarisation, caractéristiques de dispersion et autres caractéristiques liées aux amplificateurs OFA. Les facteurs traités dans chaque catégorie sont indiqués ci-dessous et leurs effets sont décrits dans ce qui suit:

- a) *non-linéarités optiques*
  - 1) effet de diffusion Brillouin stimulée,
  - 2) mélange de quatre ondes,
  - 3) instabilité de modulation,
  - 4) automodulation de phase,
  - 5) formation de solitons,
  - 6) modulation de phase croisée,
  - 7) effet de diffusion Raman stimulé.
- b) *caractéristiques de polarisation*
  - 1) dispersion modale de polarisation,
  - 2) affaiblissement en fonction de la polarisation,
  - 3) saturation spectralement sélective due à la polarisation.
- c) *caractéristiques de dispersion*
  - dispersion chromatique.
- d) *autres caractéristiques liées aux amplificateurs optiques (OFA)*
  - 1) accumulation de bruit,
  - 2) effet d'autofiltrage,
  - 3) génération d'impulsions de surpuissance optique.

## II.3 Non-linéarités optiques

Les interactions non linéaires entre le signal et le support de transmission de la fibre de silice commencent à apparaître à mesure que les puissances du signal optique sont augmentées pour atteindre des distances élevées entre les régénérateurs à des débits élevés. En conséquence, le comportement non linéaire de la fibre est apparu comme un aspect important à la fois dans les systèmes à forte capacité et sur les trajets longs sans régénération. Ces non-linéarités peuvent être en général classifiées en effets de diffusion (effet de diffusion Brillouin stimulée et effet de diffusion Raman stimulée) ou en effets liés à l'effet Kerr, c'est-à-dire dont l'intensité dépend de l'indice de réfraction (automodulation de phase, modulation de phase croisée, instabilité de modulation, formation de solitons et mélange de quatre ondes). Une série de paramètres a une influence sur la sévérité de ces effets non linéaires, y compris les caractéristiques de dispersion de la fibre, la surface réelle du cœur de la fibre, le nombre et l'espacement des canaux dans les systèmes à canaux multiples, la longueur totale du système sans régénération, de même que l'intensité du signal et la largeur de raie.

# Remplacée par une version plus récente

## II.3.1 Effet de diffusion Brillouin stimulée

### II.3.1.1 Description des effets

Dans un système à modulation d'intensité utilisant une source à faible largeur de raie, une puissance optique importante est transférée du signal à propagation vers l'avant au signal à propagation vers l'arrière quand le seuil de l'effet de diffusion Brillouin stimulée (SBS) est dépassé. Dans l'effet de diffusion Brillouin stimulée (SBS), la lumière à propagation vers l'avant est dispersée à partir de phonons acoustiques. Cependant, seule la lumière diffusée à propagation arrière est guidée par la fibre monomode. La lumière diffusée subit un décalage vers les longueurs d'onde basses ou subit l'effet de diffusion Brillouin de 11 GHz environ à 1550 nm.

Des effets non linéaires décrits ici, l'effet de diffusion Brillouin stimulée (SBS) a le seuil de puissance le plus faible. Alors que les études ont démontré que le seuil de diffusion Brillouin stimulée (SBS) pouvait varier entre les types de fibre et même parmi les fibres elles-mêmes, le seuil SBS est généralement d'environ 5 à 10 mW pour les sources modulées de façon externe, avec une faible largeur de raie, mais peut être de 20 à 30 mW pour les lasers à modulation directe. Le seuil de dispersion SBS pour un système déployé sur une fibre conforme à la Recommandation G.653 est légèrement plus faible que pour un système utilisant la fibre conforme à la Recommandation G.652, en raison d'une surface réelle réduite par rapport à la fibre conforme à la Recommandation G.653. Ceci est généralement vrai pour tous les effets non linéaires. Le seuil de diffusion SBS est sensible à la largeur de raie de la source et au niveau de puissance. Il est indépendant du nombre de canaux.

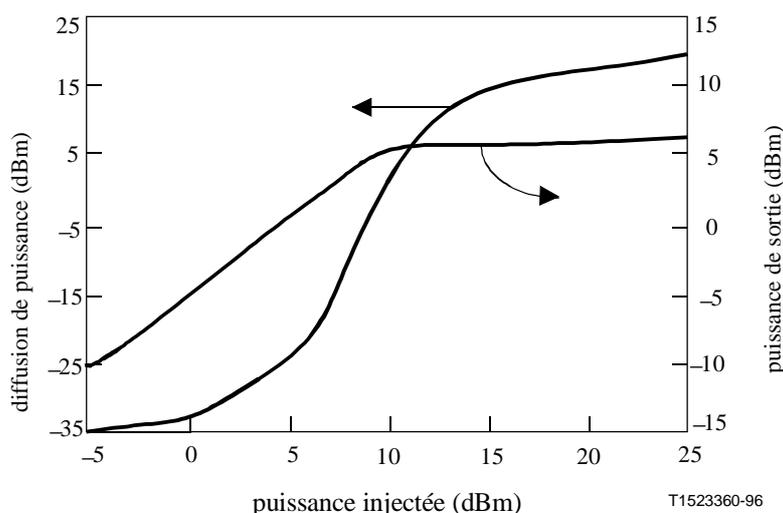


Figure II.3-1/G.663 – Seuil de diffusion Brillouin stimulée pour une source à bande étroite

### II.3.1.2 Limitations de transmission induites

Le seuil SBS limite réellement la quantité de lumière qui peut être émise sur un trajet de fibre optique. La Figure II.3-1 montre cet effet pour une source à bande étroite dans laquelle toute la puissance du signal se trouve dans la largeur de bande Brillouin (voir Figure II.3-1). La puissance émise approche la saturation et l'énergie rétrodiffusée augmente rapidement. Le niveau de puissance d'entrée vers la fibre, auquel intervient cette augmentation rapide de puissance rétrodiffusée, est défini comme le seuil SBS. En général, ce seuil correspond à l'expression:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}$$

## Remplacée par une version plus récente

où  $g$  indique le coefficient de gain Brillouin, et  $A_{eff}$  la surface réelle du coeur de la fibre.  $K$  est une constante déterminée par le degré de liberté de l'état de polarisation (dans les fibres conformes à la Recommandation G.652,  $K = 2$ ).  $\Delta\nu_B$  et  $\Delta\nu_p$  représentent respectivement la largeur de bande Brillouin et la largeur de raie d'une lumière de pompe.  $L_{eff}$  indique la longueur réelle telle qu'elle est définie dans l'expression:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$$

où  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation de la fibre et  $L$  la longueur de la fibre.

Le seuil SBS,  $P_{th}$ , dépend de la largeur de raie de la lumière de pompe  $\Delta\nu_p$ . Si la largeur de raie de la lumière de pompe est petite par rapport à la largeur de bande Brillouin, la puissance de seuil SBS peut être estimée en utilisant la relation suivante:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}}$$

### II.3.1.3 Minimisation des limitations induites

Les dégradations dues à l'effet de dispersion Brillouin stimulée (SBS) ne se produisent pas dans les systèmes dans lesquels la largeur de raie de la source dépasse nettement la largeur de bande Brillouin ou dans lesquels la puissance du signal est inférieure à la puissance de seuil (calculée à partir des expressions dans l'alinéa II.3.1.2).

NOTE – On peut trouver des informations supplémentaires concernant le seuil SBS dans l'Appendice III/G.650.

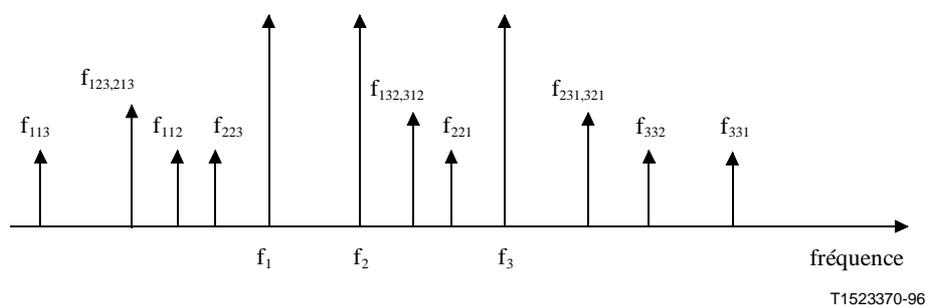


Figure II.3-2/G.663 – Emissions résultantes dues au mélange de quatre ondes pour trois signaux

## II.3.2 Mélange de quatre ondes

### II.3.2.1 Description des effets

Le mélange de quatre ondes (FWM), également appelé mélange de quatre photons, se produit quand l'interaction de deux ou trois ondes optiques à des longueurs d'onde différentes engendre de nouvelles ondes optiques, appelées produits de mélange ou bandes latérales, à d'autres longueurs d'onde. Cette interaction peut se produire entre des signaux dans des systèmes à canaux multiples, entre le bruit ASE des amplificateurs à fibre optique (OFA) et un canal unique, de même qu'entre le mode principal et les modes latéraux d'un canal unique. Dans le cas de deux signaux, la modulation d'intensité à leur fréquence de battement module l'indice de réfraction de la fibre et produit une modulation de phase à une fréquence de différence. La modulation de phase crée deux bandes latérales à des fréquences données par cette différence. De produits de mélange plus nombreux et

## Remplacée par une version plus récente

plus forts, qui se trouvent directement sur les canaux des signaux adjacents quand les espacements de canaux sont égaux en fréquence, sont engendrés dans le cas de trois signaux (voir Figure II.3-2). Deux ondes optiques se propageant le long d'une fibre produisent un effet de mélange de quatre ondes (FWM) très efficace si la condition d'adaptation de phase est satisfaite entre les bandes latérales et les signaux d'entrée. Pour des puissances optiques relativement faibles, cela signifie:

$$2\pi\Delta\nu^2 D\lambda_c^2 L / c \ll 1$$

où  $\Delta\nu$  représente l'espacement de fréquence entre les longueurs d'onde,  $D$  la dispersion chromatique de la fibre,  $\lambda_c$  la longueur d'onde centrale,  $L$  la longueur de la fibre et  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide (les pertes pouvant être prises en compte en modifiant légèrement l'équation ci-dessus). L'efficacité de mélange FWM est également sensible à la puissance optique totale dans la fibre. En fait, pour deux ondes ayant une puissance optique  $P_1$  et  $P_2$ , le coefficient de gain paramétrique maximal pour les bandes latérales,  $g_{\max}$ , peut être estimé à:

$$g_{\max} \approx 2g(P_1 + P_2)$$

où  $g$  est le coefficient de Kerr non linéaire.

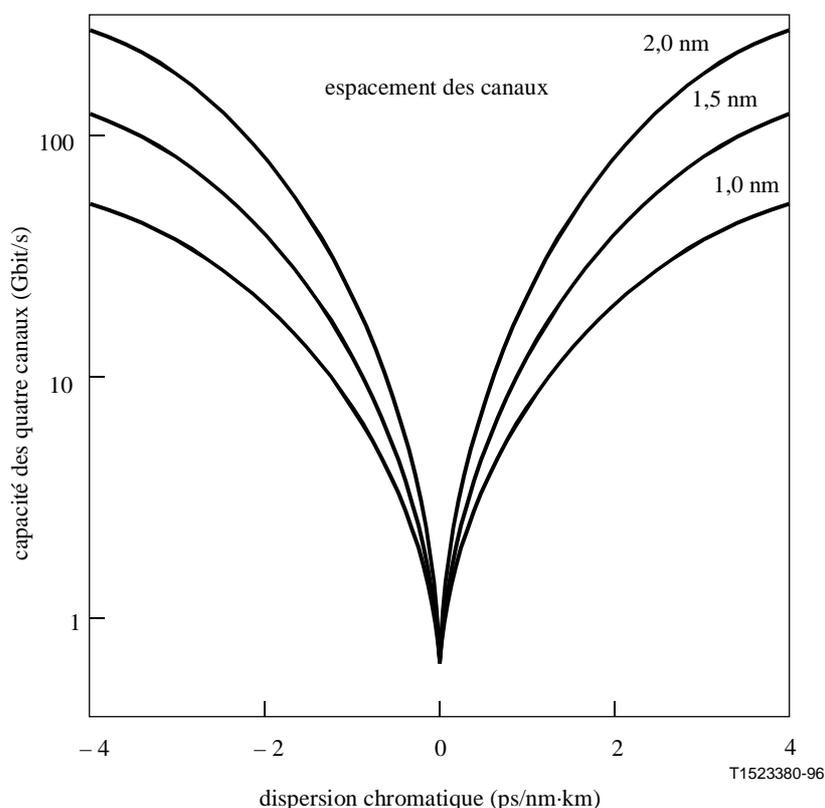


Figure II.3-3/G.663 – Impact de la dispersion sur la capacité du système

### II.3.2.2 Limitations de transmission induites

La génération de bandes latérales FWM peut entraîner une perte importante de la puissance du signal. En outre, quand les produits de mélange retombent directement sur les canaux du signal, ils provoquent des interférences paramétriques qui se manifestent comme gain ou perte d'amplitude de l'impulsion du signal, selon la relation de phase du signal et de la bande latérale.

## Remplacée par une version plus récente

La perte paramétrique provoque la fermeture du diagramme de l'oeil à la sortie du récepteur, en dégradant de ce fait la performance en taux d'erreur binaire (BER). L'espacement de fréquence et la dispersion chromatique réduisent l'efficacité du processus de mélange de quatre ondes (FWM) en détruisant l'adaptation de phase entre ondes qui interviennent. Les systèmes déployés sur la fibre conforme à la Recommandation G.652 subissent moins de dégradations FWM par rapport aux systèmes déployés sur la fibre conforme à la Recommandation G.653. Inversement, le positionnement d'un signal directement sur un canal à dispersion nulle, ou à proximité de ce canal, peut aboutir à un accroissement très important des produits de mélange de quatre ondes (FWM) sur une longueur de fibre relativement courte (c'est-à-dire de quelques dizaines de kilomètres). Le processus FWM est également très sensible à la séparation des canaux.

Le mélange de quatre ondes peut entraîner des dégradations considérables dans des systèmes à plusieurs longueurs d'onde sur la fibre conforme à la Recommandation G.653, étant donné que les canaux de transmission de signaux n'ont qu'une faible valeur de dispersion chromatique. Les effets de la dispersion sur la capacité pouvant être obtenue sur trois sections d'amplification pour un système à quatre canaux sont indiqués à la Figure II.3-3. Cela illustre ce qui est susceptible de se produire à forte puissance lorsque les conditions favorisent la génération de produits de mélange. Cette limitation de capacité repose sur le calcul de l'hypothèse la plus défavorable des produits de mélange générés par le processus FWM avec quatre canaux de signaux à 8 dBm centrés sur la valeur de dispersion indiquée. Ce système développe des niveaux de distorsion inacceptables en raison du processus de mélange de quatre ondes (FWM) à mesure que la dispersion subie par les canaux de signaux s'approche de zéro.

Dans les systèmes à canal unique, l'interaction FWM peut se produire entre le bruit d'émission ASE, les amplificateurs OFA et le canal de transmission, de même qu'entre le mode principal et les modes latéraux de l'émetteur optique. Du bruit de phase s'ajoute à la porteuse du signal via l'effet Kerr dans la fibre en raison des bruits cumulés d'émission spontanée amplifiée (ASE), élargissant ainsi les fins d'impulsions spectrales du signal.

### II.3.2.3 Minimisation des limitations induites

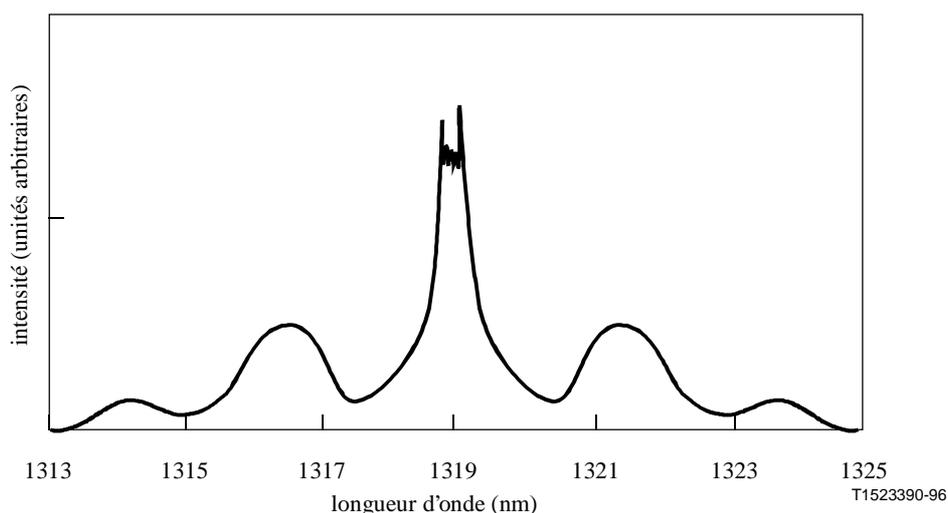
Comme cela a été indiqué précédemment, une dispersion telle que celle des fibres de la Recommandation G.655, peut être utilisée pour supprimer la génération des bandes latérales FWM. Un espacement irrégulier des canaux peut également être utilisé pour atténuer la gravité des dégradations FWM. La réduction des niveaux de puissance d'entrée dans les systèmes à fibres optiques conformes à la Recommandation G.653 pourrait permettre le fonctionnement en canaux multiples, mais compromettre également les avantages économiques de l'amplification optique.

Afin de supprimer de façon appropriée la génération des produits de mélange, l'utilisation d'une fibre (conforme à des Recommandations existantes ou à de nouvelles Recommandations à l'étude) avec une dispersion minimale autorisée (c'est-à-dire non nulle), dans la gamme de la bande d'amplification OFA, a été proposée. Une option potentielle consiste à disposer alternativement des sections contenant de telles fibres à dispersion non nulle ayant des caractéristiques de dispersion opposées, puisque le câble qui en résulte conserverait une dispersion chromatique nette approximativement nulle. Cette possibilité peut cependant présenter des difficultés pour l'installation, l'entretien et la maintenance en introduisant un second type de fibre en dehors du site. Des méthodes similaires utilisant de grandes longueurs de fibre à faible dispersion finie et de courtes longueurs de fibre à dispersion supérieure mais de signe opposé (à des fins de compensation) ont également fait l'objet de démonstrations. En particulier, lorsque des amplificateurs sont disposés à intervalles réguliers sur des liaisons, un petit morceau de fibre de compensation peut se trouver à l'intérieur de la boîte contenant l'amplificateur optique.

Un espacement irrégulier entre les canaux et un espacement plus grand entre les canaux ont été proposés comme moyens d'atténuer les effets des non-linéarités et de permettre le déploiement de

## Remplacée par une version plus récente

systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) à forte densité sur la fibre conforme à la Recommandation G.653. Un espacement irrégulier entre les canaux garantit que les produits de mélange générés par trois canaux, voire davantage, ne retombent pas directement sur les longueurs d'onde des autres canaux. Cependant, le transfert d'énergie des signaux aux produits de mélange (c'est-à-dire l'appauvrissement du signal) n'est nullement affecté lorsque l'espacement des canaux est irrégulier et il peut toujours provoquer une fermeture importante de l'oeil. Un espacement accru entre les canaux réduit également les effets du mélange de quatre ondes. L'utilisation de ces techniques d'adaptation peut être limitée par les effets de réduction du gain due à la concaténation des amplificateurs optiques, ce qui réduit la largeur du spectre d'amplification utilisable.



**Figure II.3-4/G.663 – Spectre de puissance d'une impulsion après propagation sur une fibre de 1 km de longueur (largeur d'impulsion d'entrée: 100 ps, puissance crête: 7 W). Des lobes latéraux du spectre sont apparus en raison de l'instabilité de modulation.**

### II.3.3 Instabilité de modulation

#### II.3.3.1 Description des effets

L'instabilité de modulation (MI) transforme une impulsion ou un signal véhiculé par une onde entretenue (CW) en une structure modulée. On peut observer cette instabilité dans le régime de dispersion anormale (c'est-à-dire au-dessus de la longueur d'onde de dispersion nulle), où un signal quasiment monochromatique tend à générer deux bandes latérales symétriques dans le spectre, comme cela est indiqué à la Figure II.3-4. L'espacement des fréquences et le gain des bandes latérales sont déterminés par l'intensité de l'onde et par les coefficients de dispersion et de non-linéarité de la fibre. L'efficacité de conversion maximale se produit lors d'un espacement des fréquences correspondant à l'expression:

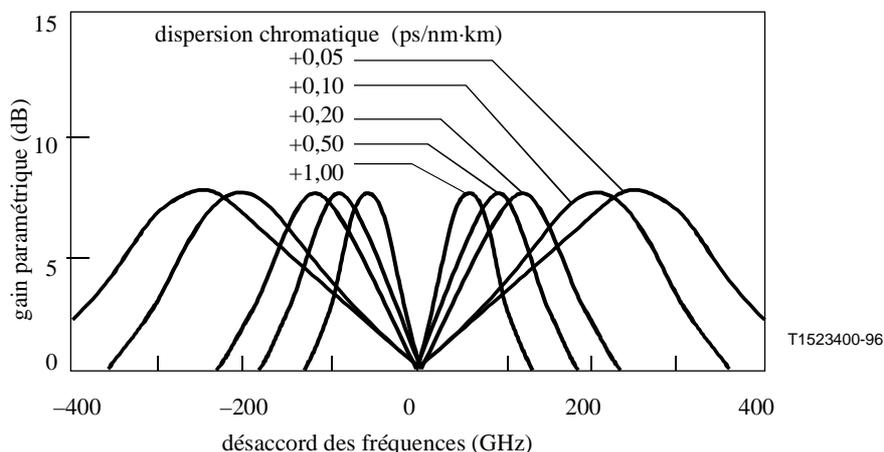
$$\Omega_{\max} = \pm \left[ \frac{8\pi^2 c n_2 P_o}{\lambda^3 A_{\text{eff}} D(\lambda)} \right]^{1/2}$$

où  $n_2$  est le coefficient de non-linéarité de la silice,  $A_{\text{eff}}$  la surface réelle de la fibre,  $P_o$  la puissance injectée,  $D(\lambda)$  le coefficient de dispersion chromatique et  $\lambda$  la longueur d'onde de fonctionnement; les bandes latérales situées à  $\pm \Omega_{\max}$  de la porteuse ont un gain par longueur unitaire de

## Remplacée par une version plus récente

$g_{\max} = 4\pi P_o / (\lambda A_{\text{eff}})$ . L'affaiblissement de la fibre peut être pris en compte en modifiant légèrement les équations ci-dessus. La dépendance du gain d'instabilité de modulation (MI) sur l'écart des fréquences par rapport au signal est indiquée à la Figure II.3-5 compte tenu de l'affaiblissement de la fibre et des valeurs différentes de dispersion de la fibre.

L'instabilité de modulation (MI) peut être considérée comme un cas particulier de mélange de quatre ondes (FWM) dans lequel deux photons du signal intense d'entrée sont convertis en deux photons à deux fréquences différentes.



**Figure II.3-5/G.663 – Gain d'instabilité de modulation (MI) par rapport au désaccord de fréquence sur des fibres de longueur égale à 30 km (pertes de 0,24 dB/km) avec 5 valeurs différentes de coefficient de dispersion pour une puissance d'injection du signal CW de +16 dBm**

### II.3.3.2 Limitations de transmission induites

L'instabilité de modulation peut réduire le rapport signal/bruit (SNR) en raison de la génération de bandes latérales de façon soit spontanée, soit amorcée par l'émission spontanée de l'amplificateur. Comme la dégradation maximale du signal est attendue pour des valeurs élevées de  $g_{\max}$  et pour des valeurs de  $\Omega$  proches de la bande passante du signal, la valeur d'instabilité de modulation (MI) peut être critique quand des amplificateurs de puissance à l'émission très puissants sont utilisés dans les liaisons de fibres à dispersion décalée avec des lasers à modulation directe. Sur des systèmes à grande distance sans répéteurs, l'instabilité de modulation (MI) peut être observée à des niveaux inférieurs de puissance et provoquer une amplification excessive du bruit d'émission spontanée des amplificateurs à fibre optique (OFA) montés en cascade. Cet élargissement des fins d'impulsion spectrales du signal induit par l'effet Kerr peut provoquer l'appauvrissement de la porteuse du signal et ces fins d'impulsion peuvent être affaiblies par les filtres ASE à bande étroite ou par l'effet d'autofiltrage dans des systèmes à très grande distance.

### II.3.3.3 Méthodes de minimisation des limitations induites

L'effet d'instabilité de modulation (MI) peut être minimisé en réduisant la puissance ou en fonctionnant à des longueurs d'onde situées en dessous de la longueur d'onde à dispersion nulle de la liaison. On peut utiliser également la dispersion pour réduire la formation de bandes latérales dues à l'instabilité de modulation (MI). Sinon, le signal reçu doit être filtré électriquement pour réduire le niveau de bruit parasite amplifié. La modulation externe des lasers, en réduisant la largeur du spectre, peut considérablement réduire l'effet de l'instabilité de modulation.

# Remplacée par une version plus récente

## II.3.4 Automodulation de phase

### II.3.4.1 Description des effets

En raison de l'effet Kerr, la variation dans le temps de l'intensité optique du signal induit une modulation de sa propre phase. Cet effet est appelé automodulation de phase (SPM). Dans des systèmes à longueur d'onde unique, l'automodulation de phase va élargir progressivement le spectre du signal lorsque des changements d'intensité optique entraînent des changements de phase (voir la Figure II.3-6). Une fois que l'élargissement spectral est intervenu par l'effet de l'automodulation de phase (SPM), le signal subit un élargissement temporel plus grand qui augmente à mesure que le signal se propage le long de la fibre en raison des effets de dispersion chromatique, dans le domaine de dispersion normale de la fibre (c'est-à-dire en dessous de la longueur d'onde de dispersion nulle). Inversement, dans le domaine de dispersion anormale, la dispersion chromatique et l'automodulation de phase (SPM) peuvent s'équilibrer mutuellement, ce qui donne moins d'élargissement temporel. La propagation du soliton repose sur ce principe (voir II.3.5).

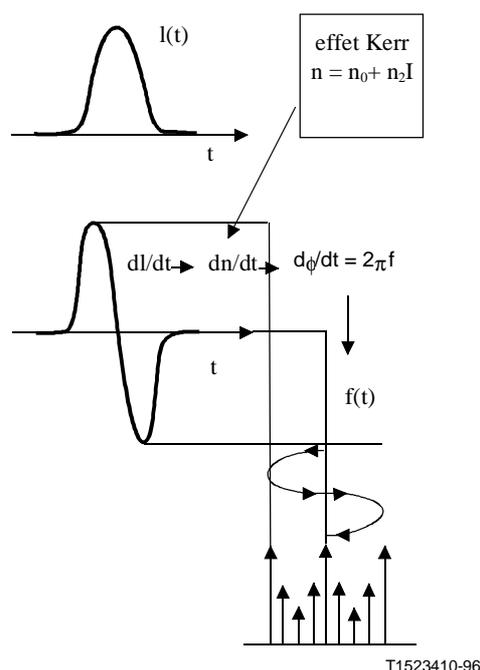


Figure II.3-6/G.663 – Mécanisme d'élargissement spectral dû à l'automodulation de phase

### II.3.4.2 Limitations de transmission induites

En général, les effets de l'automodulation de phase sont importants uniquement dans les systèmes ayant une forte dispersion cumulée ou dans les systèmes à très grande distance. Les systèmes ayant une dispersion limitée peuvent ne pas tolérer les effets de l'automodulation de phase (SPM). Dans les systèmes à canaux multiples ayant un espacement très rapproché des canaux, l'élargissement spectral induit par l'automodulation de phase (SPM) peut également créer des interférences entre canaux adjacents.

Pour des signaux modulés en intensité, l'automodulation de phase (SPM) associée à une faible conversion amplitude-fréquence conduit à une compression des impulsions sur les fibres de la Recommandation G.652 et sur les fibres de la Recommandation G.655 avec une dispersion anormale en fonction de la puissance de l'émetteur. La compression des impulsions équilibre la dispersion chromatique et permet une compensation de la dispersion. Cependant, il existe des limites à la dispersion maximale et à la longueur de transmission afférente.

# Remplacée par une version plus récente

## II.3.4.3 Minimisation des limitations induites

L'utilisation de la fibre conforme à la Recommandation G.653 et la disposition du canal de transmission des signaux près du zéro de dispersion réduiront l'effet de l'automodulation de phase (SPM). Pour les systèmes de moins de 1000 km environ, l'automodulation de phase (SPM) peut être contrôlée par l'implémentation d'une compensation de dispersion à des intervalles adaptés le long d'un système de fibre conforme à la Recommandation G.652. Les effets de l'automodulation de phase (SPM) peuvent être atténués en minimisant la puissance optique d'entrée ou en fonctionnant à des longueurs d'onde situées au-dessus de la longueur d'onde de dispersion nulle de la fibre conforme la Recommandation G.655.

## II.3.5 Formation de solitons

### II.3.5.1 Description des effets

Dans le domaine de dispersion anormale de la fibre (c'est-à-dire au-dessus de la longueur d'onde de dispersion nulle), la coopération entre la non-linéarité de l'effet Kerr et la dispersion chromatique peut être à l'origine de régimes particuliers de propagation, appelés impulsions solitons, se propageant sur de grandes distances en reproduisant périodiquement leur forme temporelle et leur spectre de fréquences. Un autre type de signal peut spontanément se transformer en solitons. Bien que le soliton fondamental soit très robuste et puisse être utilisé pour obtenir de grandes distances de transmission, les solitons d'ordre plus élevé subissent des évolutions très complexes qui impliquent la remise en forme de l'impulsion, les modifications spectrales, et même l'interruption de l'impulsion. Ces effets peuvent avoir un effet néfaste sur le fonctionnement du système.

### II.3.5.2 Limitations de transmission induites

Les effets dus à la formation de solitons peuvent s'appliquer aux systèmes de fibres conformes aux différentes Recommandations G.652, G.653 et G.655. Alors que la formation de solitons fondamentaux peut être utile, les autres solitons provoquent en général une forte dégradation du signal transmis. Ainsi, la formation de solitons d'ordre élevé met une limite à la puissance maximale qui peut être injectée dans la fibre.

### II.3.5.3 Méthodes pour minimiser les limitations induites

La formation de solitons peut être évitée en fonctionnant à des longueurs d'onde situées en dessous de la longueur d'onde de dispersion nulle de la liaison. Cependant, la transmission de solitons n'a pas lieu dans un tel régime où la dispersion et la non-linéarité contribuent toutes deux à élargir l'impulsion. La dégradation du signal peut être minimisée par une gestion appropriée de la dispersion le long de la liaison.

## II.3.6 Modulation de phase croisée

### II.3.6.1 Description des effets

Dans les systèmes à plusieurs longueurs d'onde, la modulation de phase croisée (XPM) va élargir progressivement le spectre du signal lorsque des changements d'intensité optique entraînent des changements de phase en raison des interactions entre canaux adjacents. La valeur de l'élargissement spectral introduite par la modulation de phase croisée (XPM) dépend de l'espacement des canaux, étant donné que les vitesses de groupe différentielles induites par la dispersion vont entraîner l'espacement des impulsions d'interaction à mesure qu'elles se propagent vers l'aval de la fibre. Une fois que l'élargissement spectral est produit par la modulation de phase croisée (XPM), le signal subit un élargissement temporel plus grand à mesure qu'il se propage le long de la fibre en raison des effets de la dispersion chromatique.

# Remplacée par une version plus récente

## II.3.6.2 Limitations de transmission induites

Les dégradations provenant de la modulation de phase croisée (XPM) sont plus importantes dans les systèmes de fibre conformes à la Recommandation G.652 et sont modérées pour les systèmes conformes aux Recommandations G.653 et G.655. L'élargissement dû à la modulation de phase croisée (XPM) peut entraîner des interférences entre canaux adjacents dans des systèmes à plusieurs canaux.

## II.3.6.3 Minimisation des limitations induites

La modulation de phase croisée peut être contrôlée par une sélection appropriée de l'espacement entre les canaux. Les études ont démontré que seuls les canaux adjacents peuvent contribuer de façon importante à la distorsion du signal induite par la modulation de phase croisée (XPM) dans les systèmes à plusieurs canaux. Le rapport signal/bruit (SNR) du canal central d'un système à trois canaux tend à se rapprocher de celui d'un système à canal unique à mesure que l'espacement entre les canaux augmente. En conséquence, l'effet de la modulation de phase croisée (XPM) peut devenir négligeable avec un espacement approprié entre les canaux de transmission des signaux. Il a été démontré que des espacements de canaux de 100 GHz étaient suffisants pour réduire l'effet de modulation de phase croisée (XPM) dans une simulation de système avec une puissance de 5 mW par canal. Les pénalités de la dispersion dues à la modulation de phase croisée (XPM) peuvent également être contrôlées par l'implémentation d'une compensation de la dispersion à des intervalles appropriés le long du système.

## II.3.7 Diffusion Raman stimulée

### II.3.7.1 Description des effets

La diffusion Raman stimulée (SRS) est un effet à large bande impliquant l'interaction de la lumière et les modes de vibration des molécules de silice. La diffusion Raman stimulée (SRS) est la raison pour laquelle une longueur d'onde d'un signal se comporte en pompe Raman pour des longueurs d'onde supérieures, soit pour d'autres canaux de transmission de signaux ou pour de la lumière décalée par diffusion Raman spontanée. Dans les deux cas, le signal dont la longueur d'onde est la plus courte est atténué dans ce processus qui amplifie le signal ayant la longueur d'onde la plus importante.

### II.3.7.2 Limitations de transmission induites

L'effet de diffusion Raman stimulée (SRS) peut se produire à la fois dans les systèmes à canal unique et dans les systèmes à canaux multiples. Des puissances de signal d'environ 1W ou plus sont nécessaires pour que des dégradations provenant de ce phénomène se produisent avec un canal unique seulement sans amplificateurs en ligne. Cependant, des signaux ayant une longueur d'onde plus courte dans des systèmes à canaux multiples très espacés peuvent subir une dégradation du rapport signal/bruit quand une partie de leur puissance est transférée par effet de diffusion Raman stimulée (SRS) vers des canaux dont la longueur d'onde est plus importante. Cela conduit à des limitations de capacité totale du système fondées sur le nombre total de canaux, l'espacement des canaux, la puissance d'entrée moyenne et de longueur totale du système. En particulier, le seuil pour l'observation d'une pénalité de fonctionnement de 1 dB dans un système à plusieurs canaux en raison d'un gain Raman dans une fibre sans dispersion décalée peut être estimé à :

$$P_{tot} \cdot \Delta\lambda \cdot L_{eff} < 40mW \cdot nm \cdot Mm$$

où  $P_{tot}$  est la puissance cumulée de tous les canaux,  $\Delta\lambda$  le spectre optique sur lequel les canaux sont répartis et  $L_{eff}$  la longueur réelle [en unités de  $10^6$  mètres (Mm)]. Le seuil de diffusion Raman stimulée (SRS) pour un système déployé sur la fibre conforme à la Recommandation G.653 est légèrement inférieur à celui d'un système utilisant la fibre conforme à la Recommandation G.652, en

## Remplacée par une version plus récente

raison d'une surface réelle plus petite pour la fibre de la Recommandation G.653. L'effet de diffusion Raman stimulée (SRS) ne dégrade pratiquement pas le fonctionnement des systèmes à canal unique, mais inversement, il peut limiter la capacité des systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM).

### II.3.7.3 Minimisation des limitations induites

Dans les systèmes à canal unique, des filtres peuvent être utilisés pour éliminer le spectre indésirable. Cependant, il n'existe pas de description de technique réalisable pour éliminer les effets de diffusion Raman stimulée (SRS) dans les systèmes à canaux multiples. Les effets de diffusion Raman stimulée (SRS) peuvent également être atténués en réduisant la puissance optique d'entrée. Cependant, l'effet de diffusion Raman stimulée ne semble pas donner de limitation réelle au déploiement des systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) envisagés actuellement.

### II.3.8 Récapitulatif des non-linéarités des fibres optiques

Un récapitulatif des non-linéarités des fibres optiques qui ont été décrits dans les sections précédentes est donné dans le Tableau II.1.

## II.4 Caractéristiques de polarisation

### II.4.1 Dispersion modale de polarisation

#### II.4.1.1 Description des effets

Il est bien connu que le mode fondamental d'un guide d'onde à diélectrique circulaire et symétrique est doublement dégénéré. Dans une fibre optique réelle, cette dégénérescence est fractionnée par la biréfringence. La biréfringence peut être introduite délibérément, comme par exemple pour les fibres à maintien de polarisation, ou elle peut être un sous-produit indésirable apparaissant lors de la fabrication des fibres ou des câbles. Dans ce cas, la biréfringence est introduite de façon aléatoire, comme par exemple par des perturbations géométriques ou induites par des contraintes.

Les constantes de propagation,  $\beta_i(\omega)$ , des deux modes orthogonaux, peuvent être développées en séries de Taylor autour de la fréquence médiane,  $\omega_o$  :

$$\beta_i(\omega_o) = \beta_i(\omega_o) + \left. \frac{\partial \beta_i}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_o} (\omega - \omega_o) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_o} (\omega - \omega_o)^2 + \dots$$

où  $\beta_i(\omega_o)$  est la vitesse de phase  $v_p$ ,  $\left. \frac{\partial \beta_i}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_o}$  sont liés à la vitesse de groupe  $v_g$ , et  $\left. \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_o}$  sont liés à la dispersion de la vitesse de groupe (ou dispersion chromatique D), etc.

Avec le développement des fibres à dispersion décalée et le déploiement des systèmes fonctionnant à proximité de la longueur d'onde de dispersion nulle, la contribution à la dispersion à partir du terme de second ordre, ou dispersion chromatique, est réduite, et le terme de premier ordre peut alors devenir important. Dans le cas des fibres biréfringentes, le terme de premier ordre entraîne un temps de propagation de groupe appelé dispersion de polarisation. Cette dispersion de polarisation introduit un temps de propagation de groupe différentiel entre des états orthogonaux de la polarisation. Bien que l'effet dû à la dispersion modale de polarisation (PMD) soit de modifier de façon aléatoire l'état de polarisation d'une impulsion se propageant sur une fibre, il est possible de définir un couple d'états orthogonaux, ou états principaux, lesquels, lorsqu'ils sont injectés à l'entrée de la fibre, apparaîtront sans changement à la sortie. Ces états sont, pour le premier ordre, indépendants de la longueur d'onde. (Dans certains cas, cette approximation ne tient cependant pas et les principaux

## Remplacée par une version plus récente

états peuvent mettre en évidence une dépendance de la longueur d'onde, conduisant à une autre dégradation du système par un couplage à la dispersion chromatique).

**Tableau II.1/G.663 – Effets optiques non linéaires dans les fibres de verre**

Effet optique non linéaire	Raison	Caractéristiques	Puissance critique de lumière dans la fibre monomode	Effet
automodulation de phase (SPM) et modulation de phase croisée (XPM)	effet optique Kerr: indice de réfraction dépendant de l'intensité	<ul style="list-style-type: none"> <li>– décalage de phase                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• avec auto-induction (SPM)</li> <li>• canal adjacent (XPM)</li> <li>• élargissement de fréquence spectrale</li> </ul> </li> </ul>	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– l'élargissement spectral augmente l'effet de dispersion</li> <li>– transmission à haut débit limitée par la dispersion/puissance</li> <li>– compression d'impulsions                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• dispersion positive</li> </ul> </li> <li>– propagation d'impulsions (solitons)</li> <li>– limitations dans les systèmes à modulation PSK par la conversion AM/PM</li> </ul>
dispersion Raman stimulée (SRS)	interaction entre les photons et les phonons optiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>– lignes Raman <math>f - n \Delta f</math> (Stokes)                             <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\Delta f = 12 \text{ THz}</math></li> <li><math>\Delta \lambda = 70 \text{ nm}</math> (1310 nm)</li> <li><math>\Delta \lambda = 102 \text{ nm}</math> (1550 nm)</li> </ul> </li> </ul>	$P_c > \sim 1 \text{ W}$ (pour canal unique)  $P_c > \sim 1 \text{ mW}$ pour amplification Raman dans un système à multiplexage WDM avec espacement critique des canaux, $\Delta \lambda$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– perte optique dans la fibre</li> <li>– diaphonie optique dans le système à multiplexage WDM</li> <li>– réduction de la puissance du signal</li> </ul>
diffusion Brillouin stimulée (SBS)	interaction entre les photons et les phonons acoustiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>– lignes Brillouin dans le sens arrière <math>f \pm \Delta f</math> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\Delta f = 13,2 \text{ GHz}</math> (1310 nm)</li> <li><math>\Delta f = 11,1 \text{ GHz}</math> (1550 nm)</li> </ul> </li> </ul>	$P_c > \sim 5 \text{ mW}$ (pour source optique à faible largeur de raie)  – $P_c$ augmente avec la largeur de raie du signal	<ul style="list-style-type: none"> <li>– instabilité du signal</li> <li>– pertes optiques dans la fibre</li> <li>– diaphonie optique dans le système à canaux multiples bidirectionnels à modulation cohérente</li> </ul>
mélange de quatre photons ou de quatre ondes (FWM)	interactions à photons multiples	<ul style="list-style-type: none"> <li>– produits de mélange générés <math>f_4 = f_1 \pm f_2 \pm f_3</math></li> </ul>	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$ (pour les fibres de la Recommandation G.653)  – dépend de paramètres spécifiques comme par exemple l'espacement de canaux et la proximité de $\lambda_0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– diaphonie optique dans les systèmes WDM</li> <li>– réduction de la puissance du signal</li> </ul>

## Remplacée par une version plus récente

Comme cela était indiqué dans le sous-paragraphe ci-dessus, la biréfringence introduite dans la fibre a été provoquée par des mécanismes aléatoires et asymétriques tels que les contraintes, les flexions et les torsions. Ces mécanismes de biréfringence aléatoire redéfinissent les axes de biréfringence locale le long de la fibre, entraînant ainsi un couplage aléatoire entre les modes de polarisation le long de la fibre. Le processus de câblage produit également une certaine quantité de biréfringence et un couplage de mode aléatoire. On se réfère habituellement à la longueur de fibre entre de telles modifications comme la longueur de couplage, pour laquelle une fibre est généralement exprimée comme la moyenne totale de toutes les longueurs locales de couplage. (Sur une fibre fortement biréfringente, la notion de longueur de battement pourrait être vaguement considérée comme la notion similaire de longueur de couplage de fibres.). En outre, les modifications intervenant dans les conditions d'environnement locales comme par exemple la température, engendrent des fluctuations dans les axes de biréfringence, ce qui entraîne un couplage de polarisation aléatoire. Par suite du changement aléatoire du couplage de polarisation, l'amplitude du temps de propagation différentiel devient une fonction à variation aléatoire. Il est possible de démontrer que la répartition des temps de propagation de groupe différentiels est décrite par une fonction de répartition de Maxwell définie par:

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

où  $\Delta\tau$  est le temps de propagation de groupe différentiel entre les deux états principaux et  $\langle \Delta\tau \rangle$  le temps de propagation de groupe différentiel moyen. Par suite de la nature aléatoire de la dispersion modale de polarisation, l'amplitude de la dispersion augmente avec la racine carrée de la longueur de la fibre, ou du câble, pour des longueurs bien supérieures à la longueur de couplage. La dispersion modale de polarisation est généralement exprimée en ps ou ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . L'unité ps est en général réservée à des éléments optiques simples ayant une dispersion fixe (par exemple un coupleur ou un isolateur) ou à de courtes sections de fibre ne présentant pas de couplage de mode.

### II.4.1.2 Limitations de transmission induites

Dans un système de transmission numérique, la dispersion modale de polarisation a pour principal effet de provoquer des interférences entre les symboles. Empiriquement, on évalue à 1dB la dégradation correspondant à une dispersion totale égale à  $0,4 \cdot T$ , où  $T$  est la période binaire. Ceci est la valeur admise pour la pénalité maximale pouvant être tolérée dans le bilan de puissance du système. Bien que ce problème n'ait pas encore été résolu, des études en cours indiquent que les câbles et les fibres optiques seront spécifiés selon le niveau moyen de dispersion modale de polarisation, cette opinion étant reflétée par les études effectuées sur les systèmes à canal unique et à canaux multiples où le niveau moyen doit être également spécifié. Cela correspond à un temps de groupe différentiel moyen égal au dixième d'une période binaire,  $0,1 \cdot T$ . Selon les prévisions de calcul, si la dispersion modale de polarisation a une répartition Maxwell avec une valeur moyenne ne dépassant pas  $0,1 \cdot T$ , la probabilité d'une pénalité du fonctionnement du système dépassant 1 dB est inférieure à  $10^{-9}$ .

En outre, dans les systèmes à amplificateurs à grande distance utilisant des circuits brouilleurs de polarisation (équipements modulant délibérément l'état de polarisation d'un signal du laser de façon qu'il semble ne pas être polarisé), la dispersion modale dépolarisation entraîne une augmentation dans le degré de polarisation du signal. Cela dégrade la qualité de fonctionnement du système par des interactions avec un affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL) et une saturation spécialement sélective (PHB) (voir les sous-paragraphe suivants). Dans un système analogique, l'interaction de la dispersion modale de polarisation avec la conversion amplitude-fréquence du laser conduit à une distorsion de second ordre proportionnelle à la fréquence de modulation. Une autre

## Remplacée par une version plus récente

pénalité de fonctionnement de second ordre, indépendante de la fréquence de modulation, est encourue quand des pertes additionnelles dépendant de la polarisation sont présentes dans le système.

Comme cela a été indiqué brièvement ci-dessus, un effet de second ordre peut provoquer un couplage entre la dispersion modale de polarisation et la dispersion chromatique. Ceci est dû à la dépendance de la longueur d'onde sur le temps de propagation de groupe différentiel qui amène une contribution aléatoire à la dispersion chromatique. Ce domaine n'est pas bien compris et fait l'objet d'un complément d'étude.

### II.4.1.3 Méthodes de minimisation des limitations induites

Étant donné que le problème a été suscité par la biréfringence induite, une grande partie de l'effort visant à réduire les effets de la dispersion modale de polarisation est concernée par la minimisation de la biréfringence liée à la fabrication de la fibre ou du câble. Il convient de veiller à optimiser la fabrication de la fibre pour assurer la concentricité du coeur de la fibre. Les câbles optiques sont fabriqués en utilisant des matériaux et des procédés qui réduisent au minimum la contrainte résiduelle de la structure du câble dans le coeur de la fibre. Des structures élaborées de câble introduisant une composante circulaire à la biréfringence induite peuvent également être utilisées. Si la conception est élaborée, un tel effet peut compenser la biréfringence linéaire afin de produire un câble ayant une dispersion modale de polarisation égale à zéro. Pour les fibres et les câbles, la dispersion modale de polarisation moyenne est en général comprise dans la gamme:

$$0 < \langle \Delta\tau \rangle < 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$$

Une autre méthode utilise le concept des états principaux qui a été introduite antérieurement. Dans cette méthode, un contrôleur de polarisation est introduit aux extrémités d'entrée et de sortie du système. Un dissecteur de faisceau de polarisation suit le contrôleur de polarisation de sortie et est utilisé pour générer un signal d'erreur. Le polariseur de sortie recherche le signal d'erreur et le polariseur d'entrée est adapté pour réduire ce signal d'erreur au minimum. Lorsque le signal s'annule, l'état de polarisation d'entrée est l'un des états principaux du système. L'utilisation d'une telle technique jusqu'à un retard égal à une durée de 1 bit a permis de compenser un système à 5 gigabits par seconde. Une technique similaire a été appliquée à des systèmes de multiplexage par répartition en fréquence (MRF) cohérents.

### II.4.2 Affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL)

#### II.4.2.1 Description des effets

L'affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL) provient du dichroïsme entre les composants optiques passifs tels que les isolateurs, les coupleurs, etc. dans le trajet du signal. Quand le signal traverse un composant dichroïque, la composante de son champ électrique parallèle à l'axe d'affaiblissement est atténuée. Comme dans la dispersion modale de polarisation, les axes définissant l'affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL) sont orientés de façon aléatoire l'un par rapport à l'autre.

#### II.4.2.2 Limitations de transmission induites

Afin d'examiner l'effet de l'affaiblissement en fonction de la polarisation, examinons une configuration possible du système. Dans les systèmes amplifiés, un mode de régulation de l'amplificateur est de fonctionner à une puissance constante de signal. Le signal et le bruit sont tous deux affectés par les affaiblissements en fonction de la polarisation (PDL). Cependant, en raison de la non polarisation du bruit, le signal et le bruit sont affectés différemment. Le bruit peut être décomposé en une composante parallèle au signal et une composante orthogonale au signal. Il peut être démontré que l'effet combiné de l'affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL) et de l'amplification optique accroît toujours la composante du bruit orthogonale au signal. En outre,

## Remplacée par une version plus récente

l'amplitude de la composante de bruit orthogonale varie dans le temps comme la polarisation du signal à cause de la dispersion modale de polarisation. Ceci conduit à une réduction du rapport signal/bruit et de la valeur  $Q$  dans le récepteur. En outre, le temps de fluctuations conduit à une réduction de la valeur du rapport signal/bruit et de la valeur  $Q$  dans le récepteur, ces deux phénomènes conduisant à des dégradations de fonctionnement du système.

Dans les systèmes analogiques, l'affaiblissement dû à la polarisation peut réagir avec la conversion amplitude-fréquence du laser et avec la dispersion modale de polarisation, ce qui réduit la qualité de fonctionnement du système en termes de distorsion composite du second ordre. Comme prévu, cette dégradation varie avec le temps et conduit à des fluctuations dans le temps de la distorsion composite du second ordre du système.

### II.4.2.3 Méthodes visant à minimiser les limitations du système

Comme cela est le cas pour la dispersion modale de polarisation, il est important que l'affaiblissement des composants optiques en fonction de la polarisation soit réduit au minimum. Cependant, il convient de noter que l'effet de l'affaiblissement en fonction de la polarisation sur la qualité de fonctionnement du système augmente à mesure que le nombre d'amplificateurs croît. Par exemple, dans les systèmes sous-marins à grande distance, les spécifications sont extrêmement rigoureuses étant donné qu'il peut y avoir jusqu'à plusieurs centaines d'amplificateurs. Dans les systèmes terrestres à courte distance, où seuls quelques amplificateurs sont chaînés, l'effet dû à la dispersion modale de polarisation sur la qualité de fonctionnement est encore à l'étude.

Il a été démontré que la modulation de la polarisation, ou le brouillage, améliore la qualité de fonctionnement du système en réduisant les fluctuations et en augmentant la valeur moyenne  $Q$ . Cette technique est décrite avec davantage de précisions en II.4.3.3.

### II.4.3 Saturation spectralement sélective (PHB)

#### II.4.3.1 Description des effets

La saturation spectralement sélective (PHB) résulte d'une saturation anisotropique créée par un signal de saturation polarisé injecté dans la fibre d'erbium. Cela entraîne un dépeuplement sélectif des états excités alignés sur le champ polarisé. En conséquence, le gain existant dans le sens orthogonal est plus élevé. Bien que les ions d'erbium soient répartis de façon aléatoire à l'intérieur de la matrice de verre, le dipôle associé à l'ion d'erbium est anisotropique au niveau microscopique. Les effets de la saturation spectralement sélective (PHB) sont maximaux lorsque le signal de saturation à polarisation linéaire est aligné sur l'axe principal du dipôle et sont réduits lorsque l'état de polarisation du signal de saturation est elliptique ou circulaire. Le laser du signal et le laser de pompage contribuent tous deux à l'effet total, le gain différentiel total étant la somme vectorielle des deux contributions. Le degré saturation spectralement sélective est proportionnel au degré de polarisation du signal de saturation. Il n'y a pas de sélectivité spectrale pour un signal de saturation non polarisé. En principe, la même chose s'applique à un signal polarisé de façon circulaire.

#### II.4.3.2 Limitations de transmission induites

La sélectivité spectrale a des effets sur la qualité de fonctionnement du système en provoquant une intensification du bruit sur la chaîne amplificatrice supérieure à celle qui était prévisible à partir de la théorie linéaire simple. Le rapport signal/bruit est notamment réduit par la saturation spectralement sélective et, comme pour la dispersion modale de polarisation et pour l'affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL), la valeur  $Q$  mesurée est variable dans le temps. Étant donné que deux facteurs contribuent à la saturation spectralement sélective (PHB), la qualité de fonctionnement du système est affectée de deux façons. L'effet total est proportionnel à la saturation de gain et augmente avec un degré de saturation plus élevé.

## Remplacée par une version plus récente

Considérons tout d'abord l'effet du laser de pompage polarisé. Pour les besoins de la présente analyse, on peut considérer que la polarisation de pompage est fixée et invariante. La pompe entraîne un gain différentiel dans le sens orthogonal à l'axe de polarisation. Le bruit orthogonal à la pompe aura un gain supérieur à celui qui est aligné sur la pompe. Les axes de polarisation des lasers de pompage sur chaque amplificateur le long d'une chaîne n'ont cependant pas de corrélation entre eux. C'est pourquoi l'effet cumulé est similaire à un cheminement aléatoire et la saturation spectralement sélective (PHB) induite par le pompage peut être considérée comme une contribution de pertes dues à la polarisation dans l'amplificateur. Ainsi, prise en moyenne pour un certain nombre d'amplificateurs, la contribution de bruit devrait être linéaire comme cela est prévu en théorie élémentaire.

La saturation spectralement sélective (PHB) induite par le signal du laser est légèrement différente. Au fur et à mesure que le signal du laser se propage le long du système, le bruit polarisé sur la parallèle au signal du laser a toujours le même gain que le signal. Cependant, le bruit polarisé orthogonalement au signal du laser aura toujours un gain plus élevé parce qu'il sera toujours orthogonal à l'axe de polarisation du signal. De ce fait, le bruit total augmentera de façon non linéaire le long de la chaîne des amplificateurs.

Le gain différentiel total provenant de la saturation spectralement sélective (PHB) évolue avec les changements d'état de polarisation du signal [en raison de la dispersion modale de polarisation (PMD)] le long de la chaîne amplificatrice. Il varie parce que l'effet de saturation spectralement sélective (PHB) est corrélé à l'effet de pompage. L'amplitude du gain différentiel évolue avec la variation des états relatifs de polarisation du signal et les changements des lasers de pompage. Ainsi, bien que le bruit total accroisse la non-linéarité le long de la chaîne, il le fait de façon telle que le bruit total fluctue dans le temps. En conséquence, comme cela est expliqué ci-dessus, le rapport signal/bruit est réduit et varie dans le temps. Le coefficient Q du système est de ce fait réduit et varie lui aussi dans le temps.

### II.4.3.3 Minimisation des limitation de transmission induites

Il y a plusieurs façons de réduire les effets de la saturation spectralement sélective (PHB). La mise en fonctionnement des amplificateurs dans le régime des petits signaux est une solution potentielle, mais cela n'est pas toujours possible et, bien souvent, pas souhaitable. En pratique, la solution la plus simple est d'utiliser un signal dépolarisé. Ce signal peut être créé de nombreuses façons, mais est le plus souvent généré par le brouillage de polarisation. Par l'utilisation d'un modulateur de phase, l'état de polarisation varie dans le temps entre deux états orthogonaux. Le signal apparaît ensuite comme dépolarisé.

Il a été démontré que la solution optimale était d'imposer la modulation de polarisation à deux fois le débit. Ceci parce que l'affaiblissement en fonction de la polarisation (PDL) dans l'amplificateur convertit la modulation de polarisation en modulation d'amplitude. Lorsque la polarisation est modulée à deux fois le débit, les variations d'amplitude sont à un débit supérieur à la bande passante du détecteur et ne sont donc pas vues par le récepteur. L'utilisation de telles techniques a permis d'améliorer la qualité de fonctionnement de systèmes à très grande distance jusqu'à satisfaire la qualité de fonctionnement prévue avec un haut degré de confiance. La modulation de polarisation est à présent une réalisation normale dans les systèmes amplifiés transocéaniques.

Cependant, dans les systèmes amplifiés à grande distance, la dispersion modale de polarisation (PMD) entraîne une repolarisation du signal, permettant ainsi à la saturation spectralement sélective due à la polarisation (PHB) de dégrader de nouveau la qualité du système. Un tel effet illustre la nature complexe de l'interaction entre les phénomènes de polarisation dans les liaisons amplifiées.

# Remplacée par une version plus récente

## II.5 Caractéristiques de dispersion

### II.5.1 Dispersion chromatique

#### II.5.1.1 Description des effets

La dispersion chromatique qui résulte des caractéristiques spectrales de la source de transmission et de la dispersion chromatique de la fibre optique, a pour principal effet de réduire la capacité de transmission. Les amplificateurs optiques ne modifient pas de façon importante la dispersion chromatique, à moins qu'une fonction de compensation de dispersion soit intégrée dans un sous-système amplifié.

Les amplificateurs optiques produisent de la lumière autour de la longueur d'onde de transmission du signal, sous le nom d'émission spontanée amplifiée (ASE). La composante ASE n'est généralement pas modulée et, de ce fait, elle n'est pas détectée en synchronisme avec le signal. Dans de nombreuses implémentations avec amplificateur optique, l'émission spontanée amplifiée (ASE) est bloquée par un filtre à l'intérieur de l'amplificateur, du trajet ou du récepteur de signal. A moins que l'émission spontanée amplifiée (ASE) soit modulée en même temps que le signal de transmission, sa présence entraîne un bruit optique comme cela est décrit avec davantage de précisions au II.6.1. L'élargissement du spectre par l'émission spontanée amplifiée (ASE) ne modifie pas l'interaction des caractéristiques spectrales du signal avec la dispersion chromatique de la fibre optique.

En général, les amplificateurs optiques ne modifient pas de façon importante la dispersion chromatique totale lorsqu'ils sont ajoutés à un système. Une faible quantité de dispersion chromatique est ajoutée par la fibre dopée aux terres rares utilisée comme support de gain actif dans un amplificateur à fibre optique (OFA), mais ces longueurs de fibre sont de l'ordre de la dizaine de mètres à quelques centaines de mètres. La dispersion chromatique des fibres dopées aux terres rares n'est pas fondamentalement différente de celle indiquée dans les Recommandations G.652, G.653 et G.655. Pour les systèmes ayant une longueur comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres, cette contribution à la dispersion est considérée comme négligeable.

#### II.5.1.2 Limitations induites de transmission

En général, les amplificateurs optiques ne modifient pas les limitations de transmission dues à la dispersion chromatique. Certains effets non linéaires peuvent entrer en interaction avec la dispersion chromatique de la fibre en raison des niveaux élevés de l'amplification de puissance à la sortie. Ces effets et ces méthodes utilisées en vue de réduire au minimum les limitations induites sont décrits de façon plus détaillée à la II.3.

#### II.5.1.3 Minimisation des limitations induites

La présence d'un amplificateur optique n'affecte en rien la dispersion chromatique dans un système et, de ce fait, aucune méthode spécifique visant à minimiser ces effets n'est requise. Cependant, les amplificateurs à fibre optique (OFA) permettent de prendre en compte des systèmes à grande distance sans régénération, dans lesquels les pénalités de qualité de fonctionnement du système en raison de la dispersion chromatique peuvent devenir importantes.

Dans certains sous-systèmes amplifiés optiquement, une fonction de compensation par dispersion passive peut être associée à l'amplificateur optique afin d'obtenir un sous-système amplifié ajoutant une quantité finie de dispersion chromatique au système, avec un signe opposé à celui de la fibre du système. Cela aboutit à une plus faible dispersion chromatique totale du système. Cette fonction peut être située au même endroit qu'un amplificateur à fibre optique (OFA) pour compenser les pertes liées à la fonction passive de compensation de la dispersion. Les changements affectant la dispersion chromatique dans le système de transmission sont dus à la présence de la fonction de compensation

# Remplacée par une version plus récente

de dispersion passive (décrite de façon plus complète dans les Recommandations série G.690), et non à l'amplificateur optique.

NOTE – D'autres techniques de réduction des limitations induites par la dispersion chromatique sont décrites dans les Recommandations série G.690.

## **II.6 Autres caractéristiques relatives aux amplificateurs à fibre optique (OFA)**

### **II.6.1 Accumulation de bruit**

#### **II.6.1.1 Description des effets**

Dans les systèmes de transmission où les amplificateurs à fibre optique (OFA) sont montés en cascade, le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) généré dans un amplificateur à fibre optique (OFA) répète un cycle d'atténuation et d'amplification de la même façon que la lumière du signal. Étant donné que le bruit ASE entrant est amplifié à chaque amplificateur à fibre optique (OFA) et ajouté au bruit ASE généré dans cet amplificateur (OFA), la puissance totale du bruit ASE augmente de façon quasiment proportionnelle au nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA), et la puissance du signal décroît en conséquence. La puissance de bruit peut dépasser la puissance du signal.

Le profil spectral du bruit ASE évolue lui aussi le long du système. Quand le bruit ASE provenant du premier amplificateur OFA est introduit dans un second amplificateur OFA, le profil de gain du second amplificateur OFA change sous l'effet de la puissance du bruit ASE via l'effet de saturation de gain. De façon similaire, le profil de gain réel du troisième amplificateur OFA est alors modifié par le spectre de puissance de sortie du second amplificateur OFA. Un tel effet est transmis tout au long de la chaîne jusqu'au dernier OFA. Le bruit ASE est accumulé même si des filtres à bande étroite sont utilisés à chaque OFA parce que le bruit existe sur des gammes de fréquences incluant la fréquence du signal.

#### **II.6.1.2 Limitations de transmission induites**

L'accumulation du bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) affecte le rapport signal/bruit (SNR) du système parce que la dégradation dans le rapport SNR du signal reçu est due principalement au bruit de battement lié à l'ASE. De tels bruits de battement augmentent de façon linéaire avec le nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA). Ainsi, le taux d'erreur est aggravé par l'augmentation du nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA). En outre, l'accumulation de bruit enregistre une croissance exponentielle avec l'amplitude du gain amplificateur.

Après passage dans de nombreux amplificateurs OFA, du fait du spectre de gain de l'amplificateur à fibre optique (OFA), le spectre de bruit ASE tend à avoir une valeur crête à une certaine longueur d'onde par suite de l'effet d'autofiltrage décrit au II.6.2. En particulier, si on considère une architecture de réseau en anneau tout optique fermé, le bruit ASE s'accumule comme si un nombre infini d'amplificateurs à fibre optique étaient montés en cascade. Bien que l'accumulation de bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) dans les systèmes filtrés soit considérablement réduite par les filtres, l'accumulation de bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) dans la bande augmente avec le nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA) montés en cascade. Ainsi, le rapport signal/bruit (SNR) diminue à mesure que le nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA) augmente.

#### **II.6.1.3 Minimisation de l'effet de l'accumulation de bruit**

L'accumulation de bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) peut être diminuée en réduisant l'espacement des amplificateurs à fibre optique (OFA) (tout en maintenant le gain total égal à la perte totale du trajet de transmission), étant donné que le bruit ASE s'accumule exponentiellement avec l'amplitude du gain de l'amplificateur. L'une des techniques suivantes de filtrage peut en outre

## Remplacée par une version plus récente

réduire l'effet indésirable du bruit ASE: l'utilisation de filtres de bruit ASE ou l'utilisation de l'effet d'autofiltrage (méthode d'autofiltrage).

La méthode d'autofiltrage s'applique aux systèmes comprenant plusieurs dizaines d'amplificateurs à fibre optique (OFA) ou davantage. Dans cette méthode, la longueur d'onde du signal est alignée sur la longueur d'onde d'autofiltrage de sorte que le bruit ASE reçu dans le détecteur est réduit, comme si un filtre à bande étroite avait été utilisé. Cette méthode est la plus efficace quand elle est utilisée avec des distances réduites entre amplificateurs à fibre optique et des amplificateurs à fibre optique (OFA) à faible gain afin de diminuer le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE) initial.

La méthode d'autofiltrage n'est pas applicable si on considère un réseau en anneau fermé tout optique avec multiplexage en longueur d'onde. En fait, la crête dans le spectre de gain total des amplificateurs à fibre optique (OFA) peut fortement affecter la qualité de fonctionnement du système. Dans un tel cas, l'accumulation de bruit ASE peut être réduite au minimum avec la méthode du filtre ASE, obtenue par filtrage des canaux multiplexés en longueur d'onde (WDM) non dédiés au nœud de réseau avant de les commuter et de les transmettre hors du nœud.

Pour les systèmes comportant un nombre inférieur d'amplificateurs à fibre optique (OFA), la méthode d'autofiltrage est moins efficace que la méthode de filtrage ASE. La méthode de filtrage ASE introduit de la souplesse dans le choix de la longueur d'onde du signal et fournit d'autres avantages (voir II.6.2). Il convient de veiller au choix des caractéristiques du filtre, étant donné que la bande passante des filtres montés en cascade est plus étroite que la bande passante d'un filtre unique (à moins qu'il ait une bande passante spectrale rectangulaire). Des filtres classiques ayant une largeur maximale à mi-hauteur (FWHM) de l'ordre de 3 nm pourraient être utilisés dans les systèmes à canal unique à grande distance.

### II.6.2 Effet d'autofiltrage

#### II.6.2.1 Description des effets

Par suite de l'accumulation de bruit ASE dans des systèmes sans filtrage, le profil de caractéristiques du spectre ASE (pour le spectre total de gain) tend à avoir une crête. La largeur spectrale de la crête se rétrécit avec l'accroissement du nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA) jusqu'à sa saturation finale après un certain nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA). Cela peut entraîner une largeur de raie spectrale de seulement 2~3 nm de large après plusieurs dizaines d'amplificateurs à fibre optique (OFA). Cet effet est appelé "effet d'autofiltrage".

L'effet d'autofiltrage est déterminé par la forme spectrale des sections transversales d'émission et d'absorption et par le degré d'inversion des amplificateurs à fibre optique (OFA). La longueur d'onde de filtrage peut changer avec les variations intervenant dans la composition du verre hôte, la puissance optique d'entrée, l'affaiblissement entre amplificateurs et leur dépendance de la longueur d'onde, la longueur d'onde de pompage, de même que la longueur de la fibre dopée. L'effet d'autofiltrage peut généralement être considéré comme souhaitable dans les systèmes à canal unique (comme cela a été indiqué au II.6.1.3), mais il peut par contre être considéré comme indésirable dans les systèmes à canaux multiples.

#### II.6.2.2 Limitations de transmission induites

Dans les systèmes ayant un nombre limité d'amplificateurs à fibre optique (OFA), la largeur spectrale de la crête de gain d'autofiltrage reste large et ne réduit pas l'accumulation de bruit ASE, même avec une longueur d'onde de signal adaptée à la longueur d'onde de crête. Dans les systèmes avec de nombreux amplificateurs à fibre optique (OFA) et une crête de gain d'autofiltrage bien développée, le rapport signal/bruit (SNR) peut être élevé, mais peut se dégrader si la longueur d'onde du signal se décale par rapport à la longueur d'onde d'autofiltrage. Ce décalage peut se produire après la

## Remplacée par une version plus récente

reconfiguration ou la réparation du système par suite des changements intervenus dans les pertes entre les amplificateurs.

Les systèmes à canaux multiples avec des amplificateurs à fibre optique (OFA) montés en cascade peuvent être affectés par la variation de puissance parmi les canaux qui augmente exponentiellement avec le nombre d'amplificateurs à fibre optique (OFA) (ce nombre étant l'exposant). Par exemple, la répartition de puissance pour un système de cinq canaux de  $\sim 3$  dB après le premier amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) augmente à la valeur de  $\sim 15$  dB après le sixième amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA). Pour les systèmes à canaux multiples, les changements dans le nombre total de canaux conduisent à des modifications de spectre de gain perturbant d'autres canaux. La saturation produite par des gains dépendant du spectre conduit également à une variation de gain parmi les canaux.

De ce fait, la marge sur les pertes dans le bilan de puissance doit être soigneusement calculée afin de prendre en compte les changements spectraux du gain de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) à la fois dans les systèmes filtrés et non filtrés. L'utilisation de filtres ASE élimine le problème comme le décrit II.6.2.3.

### II.6.2.3 Méthode de mise en œuvre de l'effet d'autofiltrage

Le présent sous-paragraphe présente la mise en œuvre de l'effet d'autofiltrage dans les amplificateurs à fibre optique (OFA) et également le filtrage du bruit ASE pour améliorer la qualité de fonctionnement du système.

La méthode d'autofiltrage mise en œuvre pour améliorer le rapport signal/bruit est la plus efficace quand la longueur d'onde de dispersion optimale, la longueur d'onde d'autofiltrage et la longueur d'onde du signal coïncident. Cette méthode n'exige pas l'utilisation des filtres de bruit ASE, pouvant entraîner des dégradations associées aux affaiblissements dus à la polarisation dans le filtre. Ceci est vrai en particulier dans les systèmes sous-marins transocéaniques. D'autre part, l'utilisation de l'effet d'autofiltrage complique la conception, la reconfiguration et la réparation du système, parce que la longueur d'onde du signal doit toujours s'adapter aux variations de la longueur d'onde d'autofiltrage. Les caractéristiques spectrales des gains des amplificateurs OFA et des affaiblissements entre amplificateurs doivent être aussi uniformes que possible. Sinon, la crête de gain d'autofiltrage peut ne pas être suffisamment étroite, ce qui dégrade l'amélioration du rapport signal/bruit et fait qu'il est plus difficile d'empêcher la saturation induite par le bruit de l'émission spontanée amplifiée (ASE) dans les systèmes à grande distance.

Afin d'éviter de tels inconvénients, la méthode de filtrage du bruit d'émission amplifiée (ASE) peut être utilisée pour réduire l'accumulation du bruit ASE avec le filtre passe-bande adapté à la fréquence du signal. Les filtres à bande étroite de largeur maximale à mi-hauteur FWHM  $< 1$  nm sont disponibles commercialement. L'accumulation du bruit ASE est alors réduite au minimum et le système peut être libéré de restrictions telles que la complexité des activités de conception, de reconfiguration et de réparation du système, de même que les spécifications de distance courte entre les amplificateurs à fibre optique (OFA) et de performances uniformes pour chaque amplificateur à fibre optique (OFA).

Dans des systèmes à canaux multiples, la répartition de la puissance entre les canaux due à l'effet d'autofiltrage peut être évitée en amplifiant chaque canal dans un canal amplificateur à fibre optique (OFA) distinct. Cette méthode exige cependant un démultiplexeur onéreux, des amplificateurs à fibre optique (OFA) distincts et un multiplexeur. Une autre méthode consiste à utiliser l'égalisation de puissance du signal à chaque nœud de réseau, même si cette méthode exige des équipements électroniques de régulation supplémentaires et un bilan de puissance plus critique dans l'ensemble du réseau. Une méthode additionnelle consiste à utiliser un amplificateur à fibre optique (OFA) moins saturé ou moins fortement inversé, permettant d'obtenir ainsi une atténuation qui dépende moins de

## Remplacée par une version plus récente

la longueur d'onde et réduisant en conséquence la répartition de la puissance entre les canaux. Cependant, dans un montage en cascade d'amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA) fortement inversés, l'émission spontanée amplifiée ASE s'accroît avec le nombre d'amplificateurs à la première crête de gain autour de 1530 nm, et doit être éliminée avec un filtre de réjection de courte longueur d'onde. En outre, la méthode de la préaccentuation réduit au minimum les différences entre les rapports signal/bruit pour tous les canaux en ajustant les puissances optiques de l'émetteur pour chaque canal en se fondant sur les informations de signal reçues par le récepteur final.

### II.6.3 Génération d'impulsions de surpuissance optique

#### II.6.3.1 Description des effets

Quand la puissance optique du signal d'entrée augmente rapidement dans des amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA) suffisamment pompés, une impulsion de surpuissance optique se produit en raison de la dynamique lente du gain des amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA). La surcharge optique est susceptible de se produire en particulier sur les amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA) régulés à partir de la puissance de sortie. Ceci parce que la puissance de pompage pour de telles fibres augmente à mesure que la puissance d'entrée optique diminue et l'impulsion de surpuissance optique tend à se produire au moment où la puissance d'entrée se rétablit brusquement. La Figure II.6-1 illustre la génération de l'impulsion de surpuissance optique.

Quand on reconnecte un connecteur classique, un temps de montée (10-90 %) de la puissance optique est généralement de 0,3 ms environ, ce qui correspond à un temps suffisamment court pour provoquer une impulsion de surpuissance optique. Cependant, si l'amplificateur à fibres dopées à l'erbium (EDFA) est déjà saturé optiquement, une augmentation supplémentaire rapide de la puissance optique d'entrée ne peut pas entraîner d'impulsions de surpuissance optique importantes.

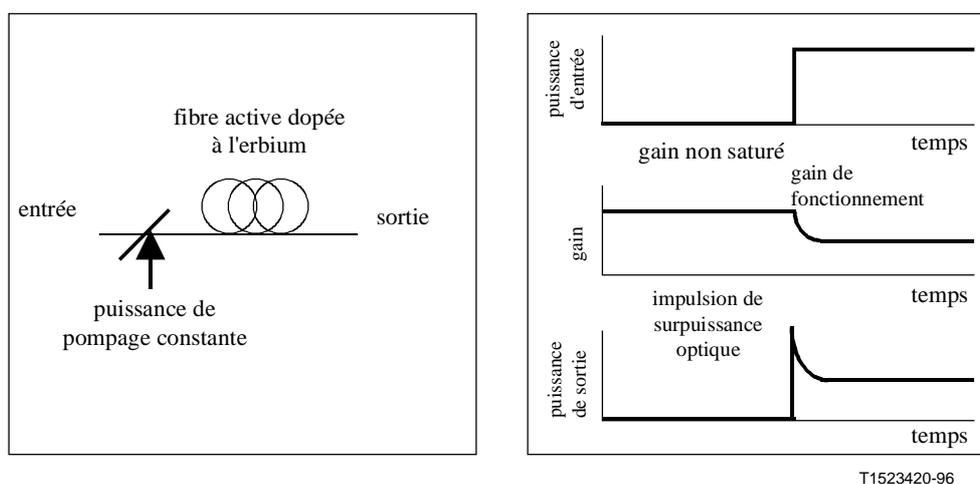


Figure II.6-1/G.663 – Exemple de génération d'impulsion de surpuissance optique

#### II.6.3.2 Limitations de transmission induites

Dans les montages en cascade d'amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA), la puissance crête de la surcharge optique peut atteindre plusieurs watts, ce qui peut endommager les convertisseurs optoélectroniques et/ou les préamplificateurs électriques, de même que les composants optiques, y compris les parties avant des connecteurs optiques. La surcharge optique est également nuisible pour l'oeil humain. Il a été observé que le seuil de dommage de la partie avant d'un connecteur optique contaminé se situait à des niveaux de puissance d'environ 20 dBm.

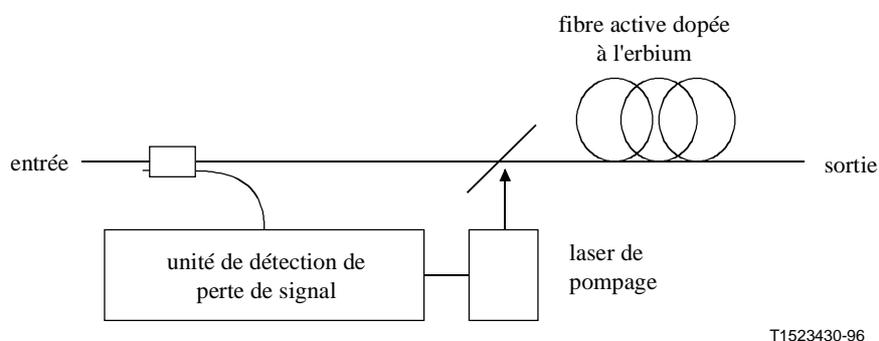
# Remplacée par une version plus récente

## II.6.3.3 Minimisation de l'effet de création d'impulsion de surpuissance optique

Les fonctions suivantes peuvent être considérées pour prévenir les impulsions de surpuissance optique:

- 1) réduction ou arrêt de la puissance de pompage vers les amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA) quand la perte du signal d'entrée est détectée;
- 2) rétablissement de la puissance de pompage vers les amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA) quand la reprise du signal d'entrée est détectée. A cet égard, la réactivation du niveau de puissance du laser de pompage jusqu'à sa valeur nominale doit intervenir progressivement, et un temps minimal de réactivation devrait être défini en conséquence.

La Figure II.6-2 est un exemple de configuration permettant de prévenir les impulsions de surpuissance optique, quand un équipement de détection de perte de signal commande l'état d'activation/d'arrêt du laser de pompage. Dans le cas d'une perte de signal pendant une durée suffisamment courte par rapport à la dynamique des variations de gain de l'amplificateur à fibre optique, par exemple  $< 1$  ms, la puissance du laser de pompage doit être maintenue inchangée.



T1523430-96

**Figure II.6-2/G.663 – Exemple de système de prévention des impulsions de surpuissance optique**

## APPENDICE III

### Paramètres relatifs au préamplificateur

**Définitions des paramètres caractéristiques applicables aux préamplificateurs qui permettent, par des formules usuelles, d'obtenir la puissance d'entrée minimale assurant un taux d'erreur binaire (BER) de  $10^{-12}$  dans l'équipement récepteur terminal (TRE)**

Sur la base des considérations théoriques et des essais expérimentaux relatifs au bruit de l'amplificateur optique, les paramètres caractéristiques applicables aux préamplificateurs (PA) qui permettent d'obtenir la puissance minimale d'entrée assurant un taux d'erreur binaire (BER) égal à  $10^{-12}$  sont les suivantes:

- gain maximal pour les petits signaux "GMax" (Recommandation G.661);
- gain pour les petits signaux "G" (Recommandation G.661);
- facteur de bruit spontané-signal "NF<sub>s-sp</sub>" (Recommandation G.661);
- facteur de bruit "NF" (Recommandation G.661);
- bande passante optique du bruit de battement de l'émission spontanée-émission spontanée équivalente (B<sub>sp-sp</sub>) (Recommandation G.661).

## Remplacée par une version plus récente

Le bruit optimal de l'amplificateur (sans bruit de réflexion interne) est dominé par deux composantes principales s'ajoutant à la contribution du bruit de grenaille du signal et au bruit d'émission spontanée. Ces deux composantes principales sont le bruit de battement en émission spontanée-signal et le bruit de battement en émission spontanée-émission spontanée.

NOTE – Les termes de bruit de sortie peuvent se subdiviser en cinq catégories:

- bruit de grenaille provenant du signal d'entrée amplifié;
- bruit de grenaille provenant de l'émission spontanée amplifiée (ASE);
- bruit de battement en émission spontanée-signal provenant du mélange du signal avec l'émission spontanée amplifiée (ASE)
- bruit de battement en émission spontanée-émission spontanée provenant du mélange de l'émission spontanée amplifiée (ASE) avec elle-même;
- bruit de réflexion.

Chacune des contributions du bruit peut être exprimée sous forme de facteurs de bruit partiels "F", où le facteur de bruit total est la somme de toutes les contributions individuelles. Le facteur de bruit total (en unités linéaires, pas d'unités logarithmiques) correspond à l'expression suivante:

$$F_{total} = F_{shot-sig} + F_{shot-ASE} + F_{sig-sp} + F_{sp-sp} + F_{refl}$$

Cette équation peut être utilisée à la fois dans l'évaluation du facteur de bruit à partir des mesures optiques et dans l'estimation de l'influence de paramètres tels que le gain, les réflexions, la largeur de raie de la source, de même que la fréquence de la bande de base. Elle représente un modèle de facteur de bruit complet pour un amplificateur à fibre optique (OFA).

Il est possible d'obtenir, par des formules usuelles, l'expression suivante de l'indice de bruit total:

$$NF = NF_{s-sp} \left( 1 + \frac{h\nu n_{sp} B_{sp-sp} G - 1}{2P_{in} G} \right)$$

où:

$$NF_{s-sp} = 2n_{sp} \left( \frac{G-1}{G} \right) \text{ et } n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1}$$

$h\nu$  est l'énergie des photons du signal,  $P_{in}$  la puissance optique à l'entrée du préamplificateur (PA),  $n_2$  la densité de population du niveau excité,  $n_1$  la densité de population du niveau fondamental,  $G$  et  $B_{sp-sp}$  ont été définis antérieurement. Il est évident que le facteur de bruit  $NF$  est réducteur, par la réduction de la valeur  $B_{sp-sp}$ , mais pour des raisons de compatibilité avec la Recommandation G.957 existante, il doit être limité à des valeurs de l'ordre de 1 nm (<sup>a</sup>120 GHz). Le rapport signal/bruit (SNR) dans l'équipement récepteur terminal (TRE) est exprimé par la formule:

$$SNR = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot NF + \frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}}$$

où  $m$  est la profondeur de modulation  $\left( 1 - \frac{1}{ExtRatio} \right)$ ,  $B$  est la bande passante électrique du récepteur (proportionnelle au débit) et  $N_{R_x}$  est le bruit équivalent de l'équipement récepteur terminal (TRE). A partir des deux formules précédentes, il est possible d'obtenir la puissance d'entrée minimale du préamplificateur (PA) pour un taux d'erreur binaire (BER) =  $10^{-12}$  dans l'équipement récepteur terminal (TRE). Il est évident que le préamplificateur (PA) optimal doit avoir un gain suffisamment élevé pour rendre négligeable la contribution du bruit de l'équipement TRE par rapport

## Remplacée par une version plus récente

au bruit du préamplificateur. Le rapport SNR pour un taux d'erreur sur les bits meilleur que  $10^{-12}$  doit être maintenu sur toute la gamme de puissance d'entrée. La puissance d'entrée minimale du préamplificateur (PA) sera caractérisée, du point de vue du bruit, par la définition d'un gain à petits signaux ( $G$ ), la contribution d'émission spontanée-signal au facteur de bruit ( $NF_{s-sp}$ ) et la bande passante équivalente du bruit de battement de l'émission spontanée-émission spontanée ( $B_{s-sp}$ ). Il est important de vérifier le facteur de bruit total du préamplificateur (PA) pour garantir que des contributions provenant du bruit de réflexion interne n'affectent pas le préamplificateur (PA).

### Exemple

**Calcul du rapport SNR pour un récepteur équipé d'un préamplificateur (PA) pour garantir un taux d'erreur sur les bits (BER) égal à  $10^{-12}$  à 2,5 Gbit/s de la hiérarchie numérique synchrone (SDH) dans l'équipement récepteur terminal (TRE).**

Sur la base des considérations précédentes et des paramètres définis précédemment, le rapport SNR à la sortie du préamplificateur (PA) peut être calculé à partir de la formule suivante:

$$SNR_{(PA)} = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot NF}$$

Dans la formule ci-dessus, il n'a pas été tenu compte de la contribution du bruit de grenaille parce que cette contribution est négligeable par rapport aux composantes du bruit de battement, en partant d'un gain en petits signaux de 20 dB. Cette formule repose sur l'hypothèse la plus défavorable où le bruit sur les zéros est considéré comme étant égal au bruit sur les uns (les zéros ne présentent pas de bruit de battement en émission spontanée-signal) et où le bruit de sortie est considéré comme gaussien.

A partir de la formule mentionnée ci-dessus, il est facile d'obtenir la sensibilité du préamplificateur (PA).

La sensibilité totale du récepteur composite (PA + TRE) est obtenue en ajoutant au dénominateur de la formule précédente le terme  $\frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}$ , dans lequel  $N_{R_x}$  est le bruit équivalent du terminal TRE.

$$SNR_{(PA+TRE)} = \frac{m^2 P_{in}}{h\nu \cdot B \cdot NF + \frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}}$$

Il est cependant évident que le terme  $\frac{N_{R_x}}{P_{in} G^2}$  est négligeable pour des valeurs suffisamment élevées du gain  $G$ .

Compte tenu de la compatibilité conformément à la Recommandation G.957 pour un équipement récepteur terminal (TRE) à 2,5 Gbits/s, une sensibilité minimale de -26 dBm pour un taux d'erreur binaire (BER) égal à  $10^{-12}$  et des paramètres caractéristiques du préamplificateur (PA) précédemment considérés:

- gain maximal en petits signaux 24 dB
- gain en petits signaux ( $G$ )  $\geq 20$  dB
- facteur de bruit en émission spontanée-signal ( $N_{s-sp}$ )  $\leq 5,5$  dB
- largeur de bande de la longueur d'onde du signal disponible ( $B_{s-sp}$ ) 1 nm (0,8 – 1,2)

## Remplacée par une version plus récente

- rapport signal/bruit (SNR) pour un taux BER =  $10^{-12}$  sur l'équipement récepteur terminal (TRE) 3 dB
- taux d'extinction de la source optique 8,2 dB
- bande passante de l'équipement terminal de réception (TRE) (la bande passante électrique du récepteur, proportionnelle à la valeur du débit)  $B = f_{Nyquist} (1 + \ell)$ ; où  $f_{Nyquist} = (\text{débit})/2 = (2,5 \text{ Gbit/s})/2$  et  $\ell$  est le coefficient d'affaiblissement du canal de Nyquist, variable entre 0 et 1
  - Valeur minimale =  $\frac{2,5}{2}$  GHz
  - Valeur moyenne =  $\frac{2,5}{2} \cdot 1,5$  GHz
  - Valeur maximale = 2,5 GHz

Il peut être facile de constater que pour des valeurs du signal de réception de  $-16$  dBm, la contribution du bruit de l'équipement récepteur terminal (TRE) peut être considérée comme étant négligeable. Avec les valeurs de paramètres précédemment considérées, une puissance d'entrée minimale de  $-36$  dBm pour un taux d'erreur binaire (BER) égal à  $10^{-12}$  est obtenue dans l'équipement récepteur terminal (TRE). Cette valeur peut être considérée comme incluant la marge due à l'hypothèse la plus défavorable introduite dans les calculs. Résultant de la valeur maximale de gain, le signal de sortie provenant du préamplificateur (PA) sera de  $-12$  dBm, permettant que la sensibilité du préamplificateur (PA) soit considérée comme celle du récepteur composite (PA + TRE). Étant donné les conditions de fonctionnement au gain minimal pour le préamplificateur (PA) (gain aux petits signaux,  $G = 20$  dB), la puissance optique moyenne à la sortie du préamplificateur (PA) sera de  $-16$  dBm, ce qui fait que la sensibilité du préamplificateur (PA) sera de nouveau considérée comme étant celle du récepteur composite (PA + TRE).

En utilisant les valeurs et les formules précédentes, il est également possible de calculer qu'un rapport signal/bruit (SNR) de sortie du préamplificateur meilleur que 13 dB peut être obtenu avec un niveau de puissance d'entrée de préamplificateur descendant à une valeur de  $-43$  dBm, quand une configuration sans amplificateurs de ligne est utilisée.

### APPENDICE IV

#### Aspects relatifs à la gestion, à l'exploitation et à la maintenance (OAM) des amplificateurs à fibre optique (OFA)

Des aspects génériques possibles relatifs à la gestion, à l'exploitation et à la maintenance (OAM) des sous-systèmes et composants amplificateurs à fibre optique (OFA) sont donnés ci-dessous.

#### IV.1 Sous-systèmes OFA

Étant donné que les émetteurs à amplification optique (OAT) et les récepteurs à amplification optique (OAR) ne sont pas différents du point de vue de la maintenance des émetteurs et récepteurs classiques, les aspects relatifs à la gestion, à l'exploitation et à la maintenance (OAM) sont identiques à ceux des émetteurs et récepteurs spécifiés dans la Recommandation G.783.

#### IV.2 Composants amplificateurs à fibre optique (OFA)

Les conditions OAM suivantes peuvent être présentées comme informations au système de gestion concerné:

- perte de signal OFA (LOS) indiquant une perte possible du signal d'entrée (défaut de transmission)

## **Remplacée par une version plus récente**

- défaillance de l'OFA, indiquant qu'un amplificateur à fibre optique ne peut plus remplir sa fonction fondamentale d'amplification optique (défaut des équipements)
- état d'arrêt du dispositif amplificateur à fibre optique (OFA) (état de sortie)

Cette distinction est faite pour apporter à l'utilisateur les informations sur les équipements et/ou l'installation de câbles. En outre, les amplificateurs à fibre optique utilisés avec un signal de commande "activation/désactivation" afin de permettre une limite des niveaux de puissance optiques peuvent s'avérer nécessaires pour satisfaire les besoins de sécurité optique.

NOTE – L'utilisation d'autres origines de défaillance des équipements telles que la "dégradation OFA" ou "la perte du canal de surveillance optique" (dans le cas de la présence d'amplificateurs de ligne) fait l'objet d'un complément d'étude.



# Remplacée par une version plus récente

## SERIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
<b>Série G</b>	<b>Systemes et supports de transmission, systemes et reseaux numériques</b>
Série H	Systemes audiovisuels et multimédias
Série I	Reseau numérique à intégration de services
Série J	Transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	Maintenance: systemes de transmission, de télégraphie, de télécopie, circuits téléphoniques et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et reseaux 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 reseau téléphonique
Série X	Reseaux pour données et communication entre systemes ouverts
Série Z	Langages de programmation