



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.663

(04/2000)

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 aux applications des
sous-systèmes et dispositifs amplificateurs
optiques**

Recommandation UIT-T G.663

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

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

CONNEXIONS ET CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX	G.100–G.199
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES COMMUNES À TOUS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	G.200–G.299
CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX À COURANTS PORTEURS SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.300–G.399
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX HERTZIENS OU À SATELLITES ET INTERCONNEXION AVEC LES SYSTÈMES SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.400–G.449
COORDINATION DE LA RADIOTÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
EQUIPEMENTS DE TEST	G.500–G.599
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.600–G.699
Généralités	G.600–G.609
Paires symétriques en câble	G.610–G.619
Câbles terrestres à paires coaxiales	G.620–G.629
Câbles sous-marins	G.630–G.649
Câbles à fibres optiques	G.650–G.659
Caractéristiques des composants et sous-systèmes optiques	G.660–G.699
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999

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

**Aspects relatifs aux applications des sous-systèmes
et dispositifs amplificateurs optiques**

Résumé

La présente Recommandation UIT-T traite des aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques (OA, *optical amplifier*), essentiellement utilisés dans les systèmes numériques. 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 UIT-T a pour objet d'identifier quels aspects doivent être considérés pour chaque application et de spécifier les valeurs de paramètres appropriées et les plages pour chaque type de dispositif amplificateur optique.

Source

La Recommandation G.663 de l'UIT-T, élaborée par la Commission d'études 15 (1997-2000) de l'UIT-T, a été approuvée le 4 avril 2000 selon la procédure définie dans la Résolution 1 de la CMNT.

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'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

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

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

NOTE

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

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

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

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

© UIT 2001

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.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application	1
2	Références normatives	1
3	Terminologie.....	2
4	Abréviations.....	2
5	Applications	3
5.1	Suramplificateur.....	4
5.2	Préamplificateur	4
5.3	Amplificateur de ligne	5
5.4	Emetteur à amplification optique.....	5
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.....	6
5.9	Applications point à multipoint	6
6	Aspects de gestion, d'exploitation et de maintenance.....	7
7	Plages et valeurs paramétriques pour les dispositifs amplificateurs optiques	7
7.1	Suramplificateur.....	7
	7.1.1 Point à point.....	7
	7.1.2 Point à multipoint	7
7.2	Préamplificateur.....	8
	7.2.1 Point à point.....	8
7.3	Amplificateur de ligne	8
	7.3.1 Point à point.....	8
	7.3.2 Point à multipoint	8
8	Valeurs de paramètres et plages de paramètres pour les aspects relatifs aux amplificateurs optiques dans les sous-systèmes amplificateurs optiques	8
8.1	Emetteur à amplification optique.....	8
8.2	Récepteur à amplification optique	8
9	Conditions d'environnement	9
10	Considérations de sécurité optique	9
	Appendice I – Plages et valeurs de paramètres pour les dispositifs amplificateurs optiques dans les systèmes point à point à canal unique	9
I.1	Suramplificateur.....	9

	Page
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 optiques	11
II.3 Non-linéarités optiques des fibres.....	12
II.3.1 Modulation autophase.....	12
II.3.2 Formation de solitons	14
II.3.3 Modulation transphase.....	14
II.3.4 Instabilité de modulation	16
II.3.5 Mélange de quatre ondes	17
II.3.6 Diffusion Brillouin stimulée.....	21
II.3.7 Diffusion Raman stimulée.....	22
II.3.8 Récapitulatif des non-linéarités des fibres optiques	23
II.4 Caractéristiques de polarisation	25
II.4.1 Dispersion modale de polarisation	25
II.4.2 Affaiblissement dû à la polarisation	28
II.4.3 Saturation spectralement sélective.....	29
II.5 Caractéristiques de dispersion des fibres	30
II.5.1 Dispersion chromatique.....	30
II.6 Autres caractéristiques relatives aux amplificateurs optiques	32
II.6.1 Accumulation de bruit	32
II.6.2 Effet d'autofiltrage	33
II.6.3 Génération d'impulsions de surpuissance optique.....	34
II.6.4 Non-linéarité causée par la saturation dans les amplificateurs optiques à semi-conducteurs	36
Appendice III – Paramètres relatifs au préamplificateur.....	38
Appendice IV – Aspects relatifs à la gestion, à l'exploitation et à la maintenance (OAM) des amplificateurs optiques.....	41
IV.1 Sous-systèmes amplificateurs optiques.....	41
IV.2 Dispositifs amplificateurs optiques.....	41

Recommandation UIT-T G.663

Aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques

1 Domaine d'application

La présente Recommandation traite des aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques, essentiellement utilisés dans les systèmes numériques. Les amplificateurs optiques fonctionnant dans la plage des 1550 nm ou des 1310 nm ou dans une autre plage de longueurs d'onde sont inclus. Les caractéristiques génériques des dispositifs et sous-systèmes amplificateurs optiques sont décrites dans UIT-T G.662 [7]. 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 plages et les valeurs communes de paramètres pour chaque type de dispositif amplificateur optique (suramplificateur, préamplificateur et amplificateur de ligne). La présente Recommandation traite du développement de nouveaux équipements, y compris les dispositifs amplificateurs optiques et inclut des directives en vue de l'application des dispositifs et sous-systèmes amplificateurs optiques aux équipements existants. En tant qu'objectif, pour des systèmes spécifiés comme étant compatibles transversalement, le degré de compatibilité ne doit pas être modifié par l'utilisation de dispositifs amplificateurs optiques.

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 tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée.

- [1] UIT-T G.650 (1997), *Définition des paramètres des fibres monomodes et méthodes de test associées.*
- [2] UIT-T G.652 (1997), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes.*
- [3] UIT-T G.653 (1997), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion décalée.*
- [4] UIT-T G.654 (1997), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée.*
- [5] UIT-T G.655 (1996), *Caractéristiques des câbles à fibres optiques monomodes à dispersion décalée non nulle.*
- [6] UIT-T G.661 (1998), *Définition et méthodes de mesure des paramètres génériques relatifs aux dispositifs et sous-systèmes amplificateurs optiques.*
- [7] UIT-T G.662 (1998), *Caractéristiques génériques des dispositifs et sous-systèmes amplificateurs optiques.*

- [8] UIT-T G.664 (1999), Procédures et prescriptions de sécurité optique applicables aux systèmes de transport optiques.
- [9] UIT-T G.671 (1996), *Caractéristiques de transmission des composants optiques passifs*.
- [10] UIT-T G.681 (1996), *Caractéristiques fonctionnelles des jonctions urbaines et interurbaines utilisant des amplificateurs optiques, y compris le multiplexage optique*.
- [11] UIT-T G.692 (1998), *Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques*.
- [12] UIT-T G.783 (1997), *Caractéristiques des blocs fonctionnels des équipements de la hiérarchie numérique synchrone*.
- [13] UIT-T G.955 (1996), *Systèmes de lignes numériques des hiérarchies à 1544 kbit/s et à 2048 kbit/s sur câbles à fibres optiques*.
- [14] UIT-T G.957 (1999), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone*.
- [15] Publication CEI 60721-3:1997, *Classification des conditions d'environnement – Partie 3: Classification des groupements des agents d'environnement et de leurs sévérités – Section 1: Stockage*.
- [16] Publication CEI 60825-1:1998, *Sécurité des appareils à laser – Partie 1: classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur*.
- [17] Publication CEI 60825-2:1993 plus Amd.1 (1997), *Sécurité des appareils à laser – Partie 2: sécurité des systèmes de télécommunication par fibres optiques*.

3 Terminologie

Les définitions données dans UIT-T G.661 et G.662 s'appliquent dans la présente Recommandation.

4 Abréviations

La présente Recommandation UIT-T utilise les abréviations suivantes:

AM	modulation d'amplitude (<i>amplitude modulation</i>)
APR	réduction automatique de puissance (<i>automatic power reduction</i>)
ASE	émission spontanée amplifiée (<i>amplified spontaneous emission</i>)
BA	suramplificateur [<i>booster (power) amplifier</i>]
BER	taux d'erreurs sur les bits (<i>bit-error ratio</i>)
CD	dispersion chromatique (<i>chromatic dispersion</i>)
CMC	canaux multiples cohérents (<i>coherent multichannel</i>)
CW	onde entretenue (<i>continuous wave</i>)
DA	adaptation de dispersion (<i>dispersion accommodation</i>)
EDFA	amplificateur à fibre dopée à l'erbium (<i>erbium-doped fibre amplifier</i>)
FDM	multiplexage par répartition en fréquence (<i>frequency-division multiplexing</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 amplifier</i>)

LOS	perte de signal (<i>loss of signal</i>)
MI	instabilité de modulation (<i>modulation instability</i>)
OA	amplificateur optique (<i>optical amplifier</i>)
OAM	gestion, exploitation et maintenance (<i>operation, administration and maintenance</i>)
OAN	réseau à amplification optique (<i>optically amplified network</i>)
OAR	récepteur à amplification optique (<i>optically amplified receiver</i>)
OAT	émetteur à amplification optique (<i>optically amplified transmitter</i>)
OFA	amplificateur à fibres optiques (<i>optical fibre amplifier</i>)
OFDM	multiplexage dans le domaine des fréquences optiques (<i>optical frequency domain multiplexing</i>)
PA	préamplificateur (<i>pre-amplifier</i>)
PDH	hiérarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous digital hierarchy</i>)
PDL	affaiblissement dû à la polarisation (<i>polarization dependent loss</i>)
PHB	saturation spectralement sélective due à la polarisation (<i>polarization hole burning</i>)
PM	modulation de phase (<i>phase modulation</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>)
SOA	amplificateur optique à semi-conducteurs (<i>semiconductor optical amplifier</i>)
SPM	modulation autophase (<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 transphase (<i>cross phase modulation</i>)

5 Applications

L'application d'amplificateurs optiques 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 d'amplificateurs optiques 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 optiques 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 optiques présentent également des avantages potentiels en ce qui

concerne les possibilités de modernisation des réseaux en raison de leur indépendance par rapport au format de modulation et au débit.

Cependant, l'utilisation des amplificateurs optiques met également en lumière des dégradations nouvelles et potentiellement graves pour les systèmes, résultant des niveaux élevés de puissance produits par les amplificateurs à fibres optiques 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 optique lui-même. La dispersion chromatique joue également un rôle accru pour les systèmes de transmission à grande distance sans régénération que permet l'amplificateur optique. 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 gestion de la dispersion a été prise en compte dans la conception du système. Dans les paragraphes suivants, les applications des amplificateurs optiques sont décrites et des aspects importants sont mis en évidence pour chaque application.

Si les caractéristiques sont compatibles longitudinalement, les dispositifs amplificateurs optiques spécifiés dans la présente Recommandation peuvent être également utilisés pour accroître la distance dans les systèmes de transmission optique (qui ne sont pas compatibles transversalement) pour la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH) selon UIT-T G.955 [13]. Afin d'assurer la compatibilité transversale entre les dispositifs amplificateurs optiques et les équipements de la hiérarchie numérique synchrone (SDH), et de satisfaire les spécifications des Recommandations UIT-T de la série G.690, des équipements conformes aux points 6.1/G.957 et 6.2.2/G.957 [14] ou bien un ou plusieurs répéteurs peuvent être utilisés.

5.1 Suramplificateur

Le suramplificateur (BA) est un dispositif amplificateur optique 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 immédiatement après l'émetteur normal ou un émetteur à amplification optique (voir 5.4).

Etant donné que la puissance d'entrée 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'amplificateur optique, est en général négligeable. Cependant, l'utilisation des suramplificateurs 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 amplificateur optique 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 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 amplificateur optique à faible bruit à utiliser entre des tronçons passifs 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 tronçons de fibre à grande distance. Le remplacement de plusieurs régénérateurs classiques par un seul amplificateur de ligne 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 des amplificateurs de ligne pour permettre de surveiller, d'émettre des alarmes et de commander les amplificateurs de ligne installés à distance. Il est préférable qu'un tel canal de surveillance n'impose pas de contraintes pour la sélection de la longueur d'onde du laser de pompage ou sur la fenêtre de fonctionnement. Etant donné que chaque amplificateur de ligne doit pouvoir insérer ses propres informations d'état et 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 amplificateurs optiques 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 global du système était beaucoup plus complexe dans le cas de mise en cascade de nombreux amplificateurs de ligne que dans le cas de mise en cascade de quelques amplificateurs de ligne. En particulier, le gain total d'une chaîne d'amplificateurs de ligne en série atteint en général un maximum pour une longueur d'onde spécifique, selon la configuration de l'amplificateur spécifique, en réduisant considérablement la plage utilisable des longueurs d'onde de fonctionnement de l'amplificateur optique. C'est pourquoi la conception de ce type de système sera très différente de celle comprenant uniquement quelques amplificateurs de ligne montés en cascade.

5.4 Emetteur à amplification optique

L'émetteur à amplification optique (OAT) est un sous-système amplificateur optique 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 l'amplificateur optique 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 (voir 5.1).

5.5 Récepteur à amplification optique

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

5.6 Applications mono-canal

Les suramplificateurs, les préamplificateurs, les amplificateurs de ligne, les émetteurs à amplification optique et les récepteurs à amplification optique 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 amplificateurs optiques à faible bruit en association avec un filtrage optique passe-bande approprié. 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.3.6) et la modulation autophase (voir II.3.1).

Les principales valeurs de paramètres aux interfaces de trajet optique pour les systèmes SDH à canal unique en point à point à grande distance utilisant des amplificateurs optiques seront décrites dans les Recommandations UIT-T de la série G.690. Les configurations de référence et les caractéristiques fonctionnelles de ces systèmes sont décrites dans UIT-T G.681 [10].

5.7 Applications à canaux multiples

Les amplificateurs optiques trouvent 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 qualité de fonctionnement en raison de certains effets non linéaires. Ces effets comprennent le mélange de quatre ondes (FWM), la modulation transphase (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 de 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.

Les valeurs de paramètres des interfaces optiques pour les systèmes SDH à canaux multiples en point à point à grande distance utilisant des amplificateurs optiques seront décrites dans UIT-T G.692 [11]. Les configurations de référence et les caractéristiques fonctionnelles de ces systèmes sont décrites dans UIT-T G.681 [10].

5.8 Applications point à point

Des schémas d'insertion de dispositifs et de sous-systèmes amplificateurs optiques dans les applications point à point sont indiqués dans UIT-T G.662 [7] (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 des réseaux à amplification optique (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 des amplificateurs de puissance et des amplificateurs de ligne dans ces types de réseaux. L'utilisation

d'amplificateurs optiques dans les réseaux en anneau juste à l'avant des dispositifs de dérivation, afin de compenser les pertes de dérivation, est un exemple d'application potentielle.

NOTE – L'une des premières applications des amplificateurs optiques peut être la distribution de signaux vidéo. Dans le cas de systèmes analogiques pour la vidéo, des spécifications complémentaires à celles des amplificateurs optiques pour les applications numériques sont nécessaires pour éviter les distorsions du signal et pour maintenir un rapport porteuse/bruit approprié. Si, par exemple, des lasers modulés en amplitude (AM) sont utilisés, la caractéristique de gain de l'amplificateur optique 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 entretenues (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 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 sont données à l'Appendice IV.

7 Plages et valeurs paramétriques pour les dispositifs amplificateurs optiques

Dans ce paragraphe, les valeurs de paramètres des dispositifs amplificateurs optiques (BA, PA, LA) sont fournies, selon les énumérations fournies dans les paragraphes 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 et dispositifs amplificateurs optiques dans les configurations point à point.

7.1 Suramplificateur

7.1.1 Point à point

Les paramètres de sortie pour les amplificateurs optiques sont propres au système et sont spécifiés dans les Recommandations applicables (série G.690). 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 dans les Recommandations applicables, sont supposés s'appliquer également aux systèmes 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 seront spécifiées dans des Recommandations UIT-T de la série G.690.

7.1.1.2 Systèmes à canaux multiples

Les valeurs des paramètres pour les amplificateurs de puissance à utiliser dans les systèmes numériques à canaux multiples feront l'objet d'un complément d'étude.

7.1.2 Point à multipoint

Etant 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 feront l'objet d'un complément d'étude.

7.2 Préamplificateur

7.2.1 Point à point

Les paramètres d'entrée pour les préamplificateurs sont propres au système et sont spécifiés dans les Recommandations UIT-T applicables de la série G.690. 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 applicables, sont supposés s'appliquer 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 seront spécifiées dans des Recommandations UIT-T de la série G.690.

7.2.1.2 Systèmes à canaux multiples

Les valeurs des paramètres pour les préamplificateurs à utiliser dans les systèmes numériques à canaux multiples feront l'objet d'un complément d'étude.

7.3 Amplificateur de 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 seront spécifiées dans des Recommandations UIT-T de la 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 feront l'objet d'un complément d'étude.

7.3.2 Point à multipoint

Etant 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 feront l'objet d'un complément d'étude.

8 Valeurs de paramètres et plages de paramètres pour les aspects relatifs aux amplificateurs optiques dans les sous-systèmes amplificateurs optiques

8.1 Emetteur à amplification optique

Les valeurs de paramètres des émetteurs à amplification optique pour les applications mono-canal seront spécifiées dans des Recommandations UIT-T de la série G.690.

8.2 Récepteur à amplification optique

Les valeurs de paramètres des récepteurs à amplification optique pour les applications mono-canal seront spécifiées dans des Recommandations UIT-T de la série G.690.

9 Conditions d'environnement

Différentes classes de conditions d'environnement sont spécifiées dans la Publication CEI 60721-3-0 (1984) [15] et l'Amendement 1 (1987). D'autres détails se trouvent dans la Publication CEI 60721-3-1 (1997) en ce qui concerne le stockage; dans la Publication CEI 60721-3-2 (1997) en ce qui concerne le transport; dans la Publication CEI 60721-3-3 (1994), l'Amendement 1 (1995) et l'Amendement 2 (1996) en ce qui concerne l'utilisation fixe, avec protection contre les intempéries, et dans la Publication CEI 60721-3-4 (1995) et l'Amendement 1 (1996) en ce qui concerne l'utilisation fixe, sans protection contre les intempéries.

10 Considérations de sécurité optique

Dans certaines conditions (cassure de fibre, connecteurs ouverts), un amplificateur optique peut émettre vers l'extérieur un faisceau dangereux pour la vue. 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 60825-2 [17].

En raison du niveau élevé de puissance optique, principalement dans les suramplificateurs et les émetteurs à amplification optique (OAT), les questions de sécurité optique et de génération d'impulsions de surpuissance optique (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 des dispositifs et des sous-systèmes amplificateurs optiques.

Une procédure appropriée pour la réduction automatique de puissance (APR), le redémarrage et la sécurité concernant les amplificateurs optiques est indiquée dans UIT-T G.664 [8].

APPENDICE I

Plages et valeurs de paramètres pour les dispositifs amplificateurs optiques dans les systèmes point à point à canal unique

Dans cet appendice, des exemples de valeurs de paramètres pour les dispositifs amplificateurs optiques (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 paragraphes 7/G.662 et 8/G.662 et ont été élaborées pour assurer dans la mesure du possible la compatibilité avec les valeurs de paramètres spécifiées dans UIT-T G.957.

Comme cela est indiqué dans le paragraphe 7, les spécifications d'interface optique relatives au trajet optique principal seront fournies dans des Recommandations UIT-T de la 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 applicables (donnée dans UIT-T 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 propres au système et seront spécifiés dans des Recommandations UIT-T de la 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
Plage de puissance d'entrée	dBm	-6/+3
Niveau de puissance ASE en sens inverse	dBm	≤ -20
Facteur de réflexion à l'entrée	dB	≤ -27
Fuite de pompage	dBm	≤ -15 (Note)
Facteur de réflexion maximal toléré à l'entrée	dB	-27
Bande passante des signaux	nm	1530-1565
NOTE – La valeur mesurée de -15 dBm (max) tient compte de toutes les contributions provenant de la distribution 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 applicables (donnée dans UIT-T 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 propres au système et seront spécifiés dans des Recommandations de la série G.690.

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

Paramètre	Unité	Valeur
Plage de puissance de sortie	dBm	-16/-9
Gain pour les petits signaux	dB	≥ 20
Facteur de bruit spontané-signal	dB	à l'étude
Facteur de réflexion maximal toléré à la sortie	dB	-27
Puissance de sortie totale maximale (Note)	dBm	-9
Bande de longueurs d'onde (gain pour les petits signaux)	nm	1530-1565
NOTE – Ce paramètre est évalué dans la bande de longueurs d'onde disponibles du signal, quand un filtre optique est utilisé à l'intérieur de l'amplificateur optique.		

APPENDICE II

Aspects relatifs à la transmission

II.1 Objet

Les amplificateurs optiques permettent d'envisager de nouvelles architectures de systèmes 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. Lorsqu'ils sont combinés avec le multiplexage par répartition en longueur d'onde, les amplificateurs optiques permettent aussi de simplifier le transport de plusieurs voies d'information en réduisant la nécessité d'avoir des équipements spécialisés pour chaque voie. C'est un moyen économique de parvenir à des largeurs de bande plus élevées. En conséquence de l'utilisation d'amplificateurs optiques, de nouveaux effets liés à la transmission et de nouvelles limitations sont apparus 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 et la modulation autophase. Ces nouveaux effets viennent s'ajouter ou se combiner à la dispersion chromatique des fibres et à la dispersion modale de polarisation (PDM). En outre, les caractéristiques des amplificateurs optiques 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 des amplificateurs optiques selon les Recommandations de l'UIT-T relatives aux paramètres d'interface optique, il est important que les opérateurs et les vendeurs d'équipements partagent la même compréhension des problèmes liés aux amplificateurs optiques et des remèdes qui peuvent leur être apportés. A cet effet, le présent 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 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, cohérence, multiplexage par répartition en longueur d'onde, etc.);
- d'indiquer les remèdes possibles contre de telles dégradations, ainsi que le champ d'efficacité correspondant.

II.2 Facteurs ayant une influence sur les applications de transmission avec amplificateurs optiques

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

- a) *non-linéarités optiques des fibres*
 - 1) modulation autophase,
 - 2) formation de solitons,
 - 3) modulation transphase,
 - 4) instabilité de modulation,
 - 5) mélange de quatre ondes,

- 6) diffusion Brillouin stimulée,
- 7) diffusion Raman stimulée.
- b) *caractéristiques de polarisation*
 - 1) dispersion modale de polarisation,
 - 2) affaiblissement dû à la polarisation,
 - 3) saturation spectralement sélective due à la polarisation.
- c) *caractéristiques de dispersion des fibres*
 - dispersion chromatique.
- d) *autres caractéristiques liées aux amplificateurs optiques*
 - 1) accumulation de bruit,
 - 2) effet d'autofiltrage,
 - 3) génération d'impulsions de surpuissance optique,
 - 4) non-linéarité causée par la saturation dans les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA).

II.3 Non-linéarités optiques des fibres

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 la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité de la fibre (modulation autophase, modulation transphase, 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 effective et l'indice de réfraction non linéaire 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.

II.3.1 Modulation autophase

II.3.1.1 Description des effets

Etant donné que l'indice de réfraction d'une fibre dépend de l'intensité optique du signal, la variation temporelle de l'intensité optique du signal induit une modulation de sa propre phase. Cet effet est appelé modulation autophase (SPM). On peut exprimer l'indice de réfraction de la fibre¹ comme suit:

$$n = n_0 + \frac{n_2}{A_{eff}} P$$

d'où:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n_2}{A_{eff}} \frac{\partial P}{\partial t}$$

¹ MARCUSE (D.), CHRAPLYVY (A.R.) et TKACH (R.W.), "Dependence of cross-phase modulation on channel number in fiber WDM systems" (*Variation de la modulation transphase en fonction du nombre de canaux dans les systèmes WDM à fibres*), Journal of Lightwave Technology, Volume 12, Number 5, p. 885, mai 1994.

où n_2 est l'indice de réfraction non linéaire de la fibre en m^2/W , A_{eff} est la surface effective de la fibre et P est la puissance injectée.

Dans des systèmes à longueur d'onde unique, la modulation autophase va élargir progressivement le spectre du signal lorsque des changements d'intensité optique entraînent des changements de phase (voir Figure II.3-1). Une fois que l'élargissement spectral est intervenu par l'effet de la modulation autophase, le signal subit un élargissement temporel plus grand à mesure que le signal se propage le long de la fibre en raison des effets de dispersion chromatique, dans la plage de dispersion normale de la fibre (c'est-à-dire en dessous de la longueur d'onde de dispersion nulle). Inversement, dans la plage de dispersion anormale, la dispersion chromatique et la modulation autophase peuvent s'équilibrer mutuellement, ce qui donne moins d'élargissement temporel. La propagation de solitons repose sur ce principe (voir II.3.2).

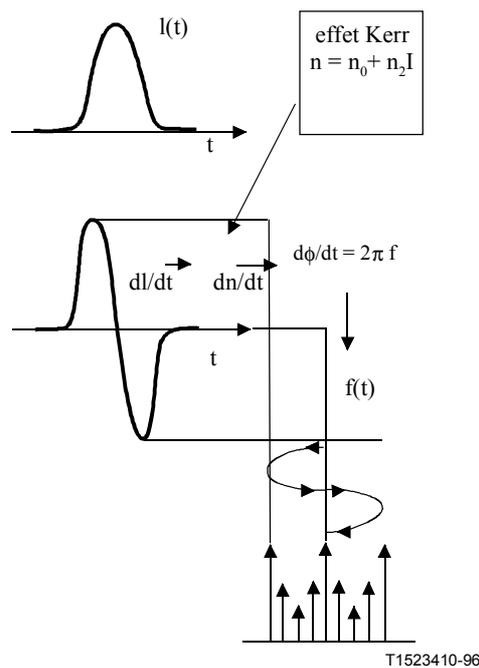


Figure II.3-1/G.663 – Mécanisme d'élargissement spectral dû à la modulation autophase

II.3.1.2 Limitations de transmission induites

En général, les effets de la modulation autophase sont importants uniquement dans les systèmes ayant une forte dispersion cumulée ou dans les systèmes à très grande distance. Les systèmes fonctionnant dans la plage de dispersion normale qui ont une dispersion limitée peuvent ne pas tolérer les effets additionnels de la modulation autophase. Dans les systèmes à canaux multiples ayant un espacement très rapproché des canaux, l'élargissement spectral induit par la modulation autophase peut également créer des brouillages entre canaux adjacents. L'effet de la modulation autophase peut également causer des dégradations lorsqu'il est combiné à un filtrage optique bande étroite. Comme la modulation autophase est essentiellement un effet mono-canal, elle ne dépend pas du nombre des canaux. La distorsion engendrée par la modulation autophase est d'autant plus forte que la puissance injectée dans le canal est élevée. Elle est également d'autant plus forte que le débit du canal est élevé, car plus le débit auquel sont transmis les signaux est élevé, plus les pentes de montée/descente des signaux sont raides.

Pour des signaux modulés en intensité et à faible fluctuation de longueur d'onde, la modulation autophase conduit à une compression des impulsions sur les fibres G.652 [2] et sur les fibres G.655 [5] avec une dispersion anormale 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 associée.

II.3.1.3 Minimisation des limitations induites

L'utilisation d'une fibre G.653 [3] et le positionnement du canal de transmission des signaux près de la dispersion nulle réduiront l'effet de la modulation autophase. Pour les systèmes de moins de 1000 km environ, la modulation autophase peut être contrôlée par l'implémentation d'une compensation de dispersion à des intervalles adaptés le long d'un système à fibres G.652. Les effets de la modulation autophase peuvent être atténués par un fonctionnement à des longueurs d'onde supérieures à la longueur d'onde de dispersion nulle de la fibre G.655. Pour les fibres présentant une surface effective plus grande ou un indice de réfraction non linéaire plus faible, la dégradation due à la modulation autophase est également réduite. Pour tous les types de fibre, on peut réduire les effets de la modulation autophase en diminuant les puissances injectées dans les canaux, bien que la tendance actuelle soit d'augmenter ces puissances pour pouvoir avoir des distances plus longues entre les régénérateurs.

II.3.2 Formation de solitons

II.3.2.1 Description des effets

Dans la plage de dispersion anormale de la fibre (c'est-à-dire au-dessus de la longueur d'onde de dispersion nulle), l'interaction entre l'indice de réfraction non linéaire 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. D'autres types de signaux peuvent 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, des modifications spectrales, et même l'interruption de l'impulsion. Ces effets peuvent être néfastes pour le fonctionnement du système.

II.3.2.2 Limitations de transmission induites

Les effets dus à la formation de solitons peuvent s'appliquer aux systèmes à fibres différentes 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.3.2.3 Méthodes pour minimiser les limitations induites

La formation de solitons peut être évitée par un fonctionnement à des longueurs d'onde inférieures à la longueur d'onde de dispersion nulle de la liaison. Cependant, dans cette plage, la transmission de solitons n'est pas prise en charge et 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.3.3 Modulation transphase

II.3.3.1 Description des effets

Dans les systèmes à plusieurs canaux, la modulation transphase (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 transphase dépend de l'espacement des canaux et de la dispersion chromatique des

fibres, étant donné que les vitesses de groupe différentielles dues à 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 transphase, 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.

II.3.3.2 Limitations de transmission induites

La dégradation des systèmes due à la modulation transphase est d'autant plus grande que les canaux sont peu espacés et qu'ils sont nombreux (bien qu'il y ait saturation en fonction de la distance). Comme indiqué pour la modulation autophase, la modification de la phase du signal est liée à la modification de l'indice de réfraction de la fibre, qui, à son tour, dépend de la puissance injectée dans le canal. L'injection de puissances moyennes élevées entraîne de grands déphasages, qui, lorsqu'ils sont combinés aux effets de dispersion, conduisent à une importante dégradation des systèmes.

En fait, la dégradation due à la modulation transphase est réduite lorsque les débits des canaux augmentent, étant donné que plus le débit des signaux est faible, plus les interactions binaires de ces signaux sont longues.

Les dégradations provenant de la modulation transphase sont plus importantes dans les systèmes à fibres G.652 que dans les systèmes à fibres G.653 et G.655. L'élargissement dû à la modulation transphase peut entraîner des brouillages entre canaux adjacents dans les systèmes à plusieurs canaux.

II.3.3.3 Minimisation des limitations induites

La modulation transphase 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 causée par la modulation transphase 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 transphase 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 transphase dans une simulation de système avec une puissance de 5 mW par canal^{1,2}. Les pénalités de la dispersion dues à la modulation transphase peuvent également être contrôlées par l'implémentation d'une compensation de la dispersion à des intervalles appropriés le long du système. Pour les fibres présentant une surface effective plus grande ou un indice de réfraction non linéaire plus faible, la dégradation due à la modulation transphase est également réduite. Les effets dus à la modulation transphase sont également réduits lorsque l'affaiblissement le long de la fibre est plus faible, ce qui permet de garantir que la distorsion de phase due à la modulation transphase entre deux impulsions a tendance à plus s'égaliser en raison de l'interaction des impulsions¹.

Pour tous les types de fibre, on peut réduire les effets de la modulation transphase en diminuant les puissances injectées dans les canaux, bien que la tendance actuelle soit d'augmenter ces puissances pour pouvoir avoir des distances plus longues entre les régénérateurs.

² KOCH (T.L.) et KAMINOW (I.P.), Optical Fiber Telecommunication, *Academic Press*, Volume IIIA, Chapter 8, 1997.

II.3.4 Instabilité de modulation

II.3.4.1 Description des effets

L'instabilité de modulation (MI) transforme une impulsion ou un signal véhiculé par une onde entretenue (CW) en une structure modulée. Cette instabilité peut être causée par la modulation autophase dans la plage 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, comme cela est indiqué à la Figure II.3-2. L'instabilité de modulation peut également être causée par la modulation transphase. Ce type d'instabilité peut se produire aussi bien dans la plage de dispersion anormale que dans la plage de dispersion normale (c'est-à-dire au-dessous de la longueur d'onde de dispersion nulle).

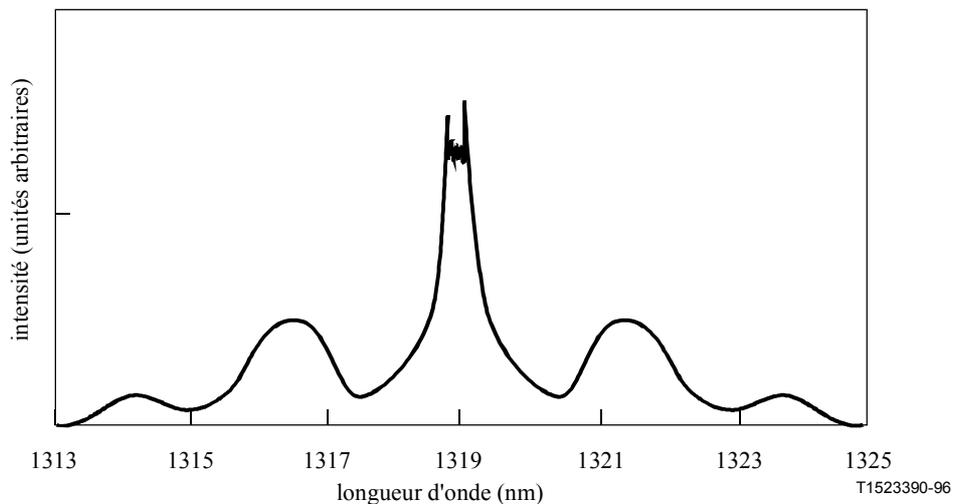


Figure II.3-2/G.663 – Spectre de puissance d'une impulsion après propagation sur une fibre de 1 km de longueur (largeur d'impulsion d'entrée: 100 ps, puissance crête: 7 W). Des lobes latéraux du spectre sont apparus en raison de l'instabilité de modulation

En ce qui concerne l'instabilité de modulation causée par la modulation autophase, 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 l'indice de réfraction non linéaire de la fibre, A_{eff} la surface effective de la fibre, P_o la puissance injectée, $D(\lambda)$ le coefficient de dispersion chromatique et λ la longueur d'onde de fonctionnement. Les bandes latérales situées à $\pm\Omega_{\max}$ de la porteuse ont un gain par unité de longueur de $g_{\max} = 4\pi P_o / (\lambda A_{\text{eff}})$. L'affaiblissement le long de la fibre peut être pris en compte en modifiant légèrement les équations ci-dessus. La variation du gain d'instabilité de modulation en fonction de l'écart des fréquences par rapport au signal est indiquée à la Figure II.3-3 compte tenu de l'affaiblissement le long de la fibre et pour diverses valeurs de dispersion de la fibre.

L'instabilité de modulation 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.

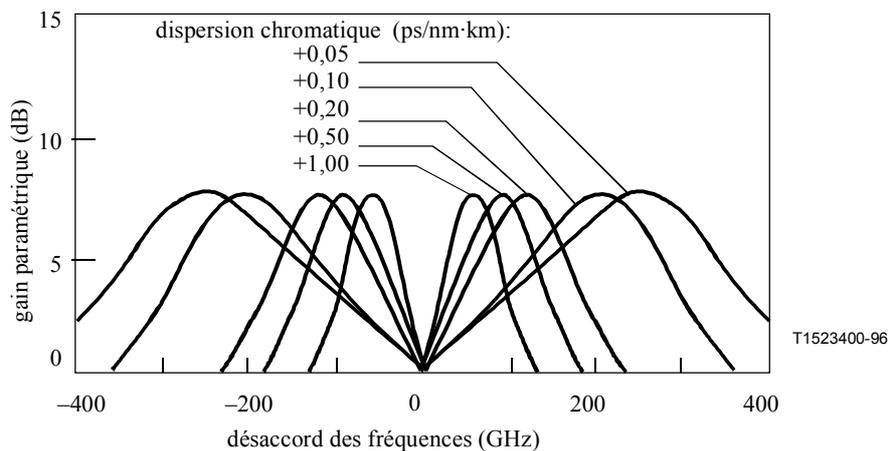


Figure II.3-3/G.663 – Gain d'instabilité de modulation (MI) en fonction du désaccord de fréquence sur des fibres longues de 30 km (affaiblissement de 0,24 dB/km) pour 5 valeurs différentes de coefficient de dispersion et pour une puissance d'injection du signal CW de +16 dBm

II.3.4.2 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 Ω proches de la largeur de bande du signal, l'instabilité de modulation peut être critique quand des suramplificateurs très puissants sont utilisés dans des liaisons de transmission par fibres à dispersion décalée avec des lasers à modulation directe. Dans des systèmes à grande distance sans répéteur, l'instabilité de modulation peut être observée à des niveaux de puissance inférieurs et provoquer une amplification excessive du bruit d'émission spontanée des amplificateurs optiques montés en cascade. L'élargissement des bords du spectre du signal peut provoquer l'appauvrissement de la porteuse du signal et ces bords peuvent être affaiblis par les filtres d'émission ASE à bande étroite ou par l'effet d'autofiltrage dans des systèmes à très grande distance.

II.3.4.3 Méthodes de minimisation des limitations induites

L'effet d'instabilité de modulation peut être minimisé par une réduction de la puissance ou par un fonctionnement à des longueurs d'onde inférieures à la longueur d'onde à dispersion nulle de la liaison. La gestion de la dispersion peut également s'avérer utile pour réduire la formation de bandes latérales dues à l'instabilité de modulation. 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.

II.3.5 Mélange de quatre ondes

II.3.5.1 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 d'émission ASE d'un amplificateur optique et un canal unique, de même qu'entre le mode principal et les modes secondaires 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. Des produits de mélange plus nombreux et plus forts, qui se trouvent directement sur les canaux adjacents quand les espacements de canaux sont égaux en fréquence, sont engendrés dans le cas de trois signaux (voir Figure II.3-4). Deux ondes optiques se propageant le long d'une fibre produisent un mélange de quatre ondes à fort rendement si la condition d'adaptation de phase est satisfaite entre les bandes latérales et les signaux d'entrée.

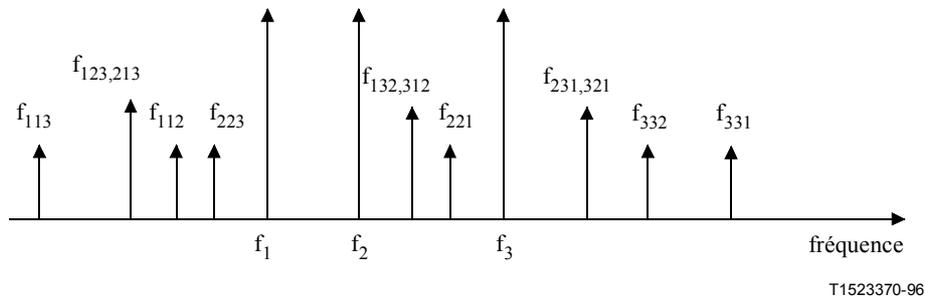


Figure II.3-4/G.663 – Produits de mélange résultant du mélange de quatre ondes pour trois signaux

Dans l'hypothèse où la puissance d'entrée et l'espacement sont les mêmes pour tous les canaux, on peut exprimer le rendement du mélange de quatre ondes, η , d'une fibre comme étant le rapport entre la puissance du mélange de quatre ondes et la puissance de sortie par canal de la fibre, ce rapport étant proportionnel à³:

$$\eta \propto \left[\frac{n_2 P}{A_{eff} D(\Delta\lambda)^2} \right]^2$$

où n_2 est l'indice de réfraction non linéaire de la fibre, P est la puissance d'entrée du canal, A_{eff} est la surface effective de la fibre, D est le coefficient de dispersion chromatique et $\Delta\lambda$ est l'espacement des canaux. Il est à noter que le rendement du mélange de quatre ondes ne dépend pas du débit.

II.3.5.2 Limitations de transmission induites

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

Le brouillage paramétrique provoque la fermeture du diagramme en œil à la sortie du récepteur, en dégradant de ce fait les caractéristiques de taux d'erreurs sur les bits (BER). Les systèmes multicanaux ont tendance à avoir un plus grand nombre de canaux, ce qui augmente le nombre de produits de mélange possibles dans les canaux de transmission de signaux.

Comme indiqué par la formule donnée dans le précédent paragraphe, l'augmentation de l'espacement des fréquences et de la dispersion chromatique réduit le rendement du processus de mélange de quatre ondes en détruisant l'adaptation de phase entre les ondes en interaction. Toutefois, les systèmes ont tendance à avoir des espacements de fréquences plus faibles, afin qu'un plus grand

³ KAMINOW (I.P.) et KOCH (T.L.), Optical Fiber Telecommunications, Academic Press, Volume IIIA, p. 213, 1997.

nombre de canaux puisse occuper la bande passante d'un même amplificateur optique. En outre, plus la puissance injectée dans le canal est grande, plus le rendement du mélange de quatre ondes est grand (et donc plus la dégradation du système est importante).

Les systèmes multicanaux déployés dans la fenêtre de fonctionnement à 1550 nm avec des fibres G.652 [2] subissent beaucoup moins de dégradations dues au mélange de quatre ondes que les systèmes à fibres G.653 [3], car la dispersion chromatique des fibres G.652 est beaucoup plus grande et sa surface effective est plus grande. Inversement, le positionnement d'un canal de transmission de signaux directement au niveau de la dispersion nulle, ou à proximité de celle-ci, peut aboutir à un accroissement très important des produits de mélange de quatre ondes sur une fibre relativement courte (c'est-à-dire de quelques dizaines de kilomètres).

Dans la plage de dispersion nulle à 1550 nm de fibres G.653, appelée parfois bande C, le mélange de quatre ondes peut entraîner des dégradations considérables dans des systèmes multicanaux à fibres G.653, étant donné que la dispersion chromatique est faible dans les canaux de transmission de signaux. L'incidence de la dispersion sur la capacité pouvant être obtenue sur trois tronçons d'amplification pour un système à quatre canaux est indiquée à la Figure II.3-5, qui 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, dans le cas le plus défavorable, des produits de mélange générés par le processus du mélange de quatre ondes avec quatre canaux de transmission de signaux à 8 dBm centrés sur la valeur de dispersion indiquée. Ce système développe des niveaux inacceptables de distorsion due au processus de mélange de quatre ondes à mesure que la dispersion dans les canaux de transmission de signaux s'approche de zéro.

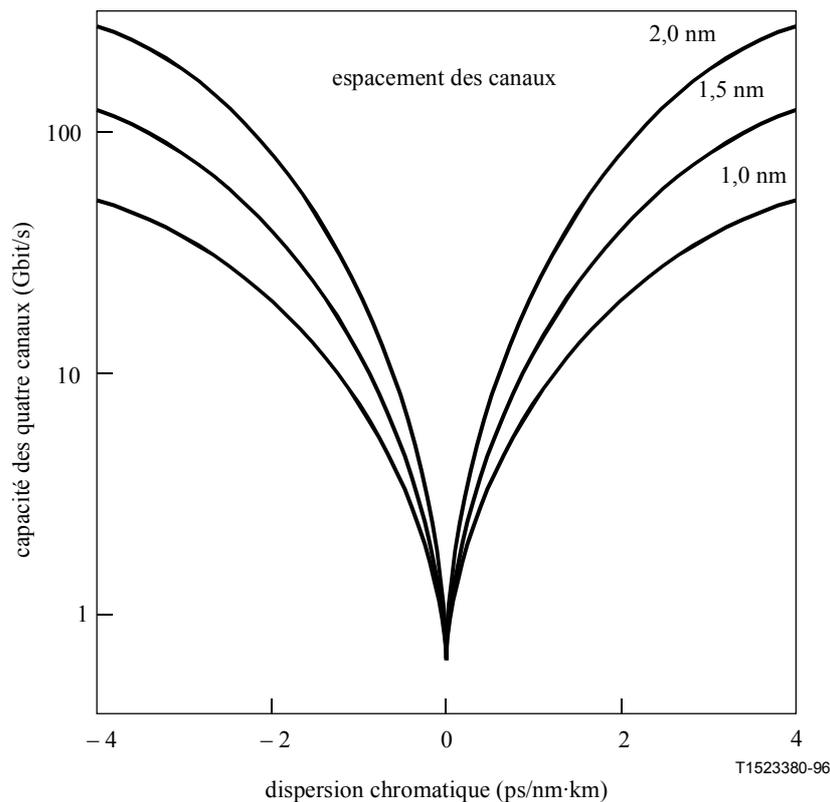


Figure II.3-5/G.663 – Incidence de la dispersion sur la capacité du système en présence de mélange de quatre ondes

La fibre à dispersion décalée non nulle (G.655 [5]) a été conçue en vue d'éliminer l'effet dû au mélange de quatre ondes dans la bande C. Toutefois, le mélange de quatre ondes est susceptible aussi de dégrader les systèmes multicanaux, même sur une fibre G.655, en fonction d'espacements de canaux égaux ou inférieurs à 50 GHz, de la dispersion de la fibre et du coefficient de non-linéarité de la fibre (proportionnel à l'indice de réfraction non linéaire divisé par la surface effective).

Dans les systèmes à canal unique, l'interaction du mélange de quatre ondes peut se produire entre le bruit d'émission ASE de l'amplificateur optique et le canal de transmission, de même qu'entre le mode principal et les modes secondaires de l'émetteur optique. Du bruit de phase s'ajoute à la porteuse du signal via l'effet de l'indice de réfraction non linéaire en raison des bruits cumulés d'émission ASE, élargissant ainsi les bords du spectre du signal.

II.3.5.3 Minimisation des limitations induites

Comme indiqué précédemment, une dispersion chromatique telle que celle des fibres G.652 et G.655, peut être utilisée pour supprimer la génération des bandes latérales du mélange de quatre ondes. Pour les fibres présentant une surface effective plus grande ou un indice de réfraction non linéaire plus faible, le rendement du mélange de quatre ondes est également réduit. Un espacement irrégulier des canaux peut également être utilisé pour atténuer la gravité des dégradations dues au mélange de quatre ondes. La réduction des niveaux de puissance d'entrée dans les systèmes à fibres 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 plage de la bande d'amplification optique, a été proposée. Une option potentielle consiste à disposer alternativement des tronçons 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 longs tronçons de fibre à faible dispersion finie et de courts tronçons 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 du boîtier 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 systèmes à multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) à forte densité avec des fibres 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'œil. 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. Malheureusement, un espacement irrégulier entre les canaux et un espacement plus grand entre les canaux nécessitent également une plus grande partie de bande passante des amplificateurs optiques.

La transmission avec multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) à des longueurs d'onde plus élevées (bande L) en plus de la bande à 1550 nm est proposée. La transmission dans la bande de longueurs d'onde élevées (bande L) est généralement utile pour tous les types de fibre étant donné qu'elle permet d'augmenter le nombre total de longueurs d'onde. La transmission dans la bande L sur une fibre G.652 ou G.654 peut nécessiter une compensation de la dispersion en raison

des grandes valeurs de dispersion. Avec des fibres G.653, la transmission dans la bande L permet de concevoir des systèmes à longueur d'onde unique car l'effet dû au mélange de quatre ondes observé dans la bande L est minimal. Il est possible que la dispersion dans la bande L sur une fibre G.653 ne nécessite pas de compensation de dispersion, suivant le débit de transmission.

NOTE – La définition de la bande L fera l'objet d'un complément d'étude.

II.3.6 Diffusion Brillouin stimulée

II.3.6.1 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 se propageant vers l'avant au signal se propageant vers l'arrière quand le seuil de diffusion Brillouin stimulée (SBS) est dépassé. Dans la diffusion SBS, la lumière se propageant vers l'avant est diffusée à partir de phonons acoustiques. Cependant, seule la lumière diffusée se propageant vers l'arrière est guidée par la fibre monomode. La lumière diffusée subit un décalage vers les longueurs d'onde basses (décalage Brillouin) de 11 GHz environ à 1550 nm.

Des effets non linéaires décrits ici, la diffusion SBS a le seuil de puissance le plus faible. Alors que les études ont démontré que le seuil de diffusion SBS pouvait varier entre les types de fibre et même parmi les fibres elles-mêmes, ce seuil 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 diffusion SBS pour un système à fibres G.653 est légèrement plus faible que pour un système à fibres G.652, car la surface effective des fibres G.653 est plus petite. 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.

II.3.6.2 Limitations de transmission induites

La diffusion Brillouin stimulée (SBS) limite réellement la quantité de lumière qui peut être transmise sur un trajet de fibre optique. La Figure II.3-6^{2,4} montre cet effet pour une source à bande étroite pour laquelle toute la puissance du signal se trouve dans la largeur de bande Brillouin. La puissance émise approche la saturation et l'énergie rétrodiffusée augmente rapidement. Le niveau de puissance d'entrée de la fibre auquel intervient cette augmentation rapide de puissance rétrodiffusée est défini comme le seuil de diffusion SBS. En général, ce seuil correspond à l'expression:

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

où g désigne le coefficient de gain Brillouin ($\sim 4 \times 10^{-9}$ cm/W) et A_{eff} la surface effective de la fibre. K est une constante déterminée par le degré de liberté de l'état de polarisation (dans les fibres 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 pompage. L_{eff} désigne la longueur effective définie par:

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

où α est le coefficient d'atténuation de la fibre et L la longueur de la fibre.

⁴ MAO (X.P.), TKACH (R.W.), CHRAPLYVY (A.R.), JOPSON (R.M.) et DEROSIER (R.M.), Stimulated Brillouin Threshold dependence on fiber type and uniformity (*Dépendance du seuil de diffusion stimulée de Brillouin en fonction du type de fibre et de son uniformité*), *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Volume 4, p. 66, 1992.

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

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

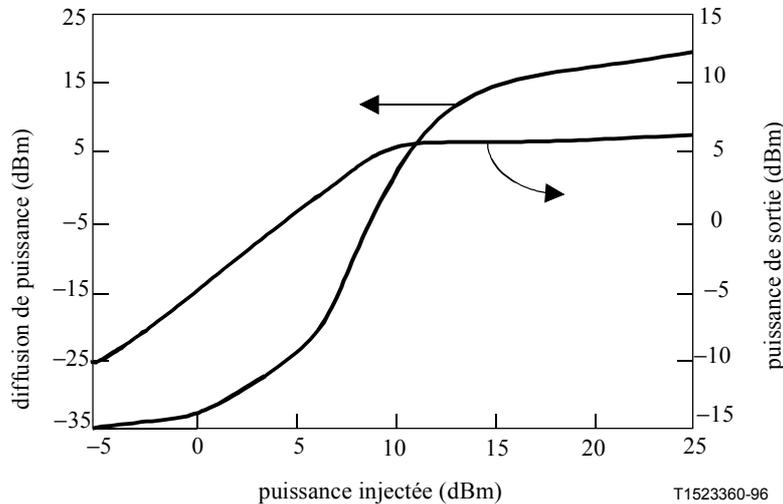


Figure II.3-6/G.663 – Effet de diffusion Brillouin stimulée pour une source à bande étroite

II.3.6.3 Minimisation des limitations induites

Les dégradations dues à la diffusion Brillouin stimulée (SBS) ne se produisent pas dans les systèmes pour lesquels la largeur de raie de la source dépasse nettement la largeur de bande Brillouin ou pour lesquels la puissance du signal est inférieure à la puissance seuil (calculée à partir des expressions du II.3.6.2).

NOTE – On peut trouver des informations supplémentaires concernant la diffusion SBS dans l'Appendice III/G.650 [1].

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 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 élevée.

II.3.7.2 Limitations de transmission induites

La diffusion Raman stimulée (SRS) peut se produire à la fois dans les systèmes à canal unique et dans les systèmes à plusieurs canaux. 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 amplificateur de ligne. Cependant, des signaux ayant une longueur d'onde plus courte dans des systèmes à canaux multiples couvrant une large plage de longueurs d'onde peuvent subir une dégradation du rapport signal/bruit quand une partie de leur puissance est transférée par diffusion SRS vers des canaux dont la longueur d'onde est plus élevée. 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 à dispersion non décalée peut être estimé à^{2, 5}.

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

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 effective [en 10^6 mètres (Mm)]. Le seuil de diffusion SRS pour un système à fibres G.653 est légèrement inférieur à celui d'un système à fibres G.652, car la surface effective des fibres G.653 est plus petite. La diffusion SRS ne cause pratiquement pas de dégradation dans les systèmes à canal unique, mais inversement, il peut limiter la capacité des systèmes à 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 SRS dans les systèmes à plusieurs canaux. Les effets de diffusion SRS peuvent également être atténués en réduisant la puissance optique d'entrée. Cependant, la diffusion SRS ne semble pas donner de limitation réelle au déploiement des systèmes à multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) envisagés actuellement.

II.3.8 Récapitulatif des non-linéarités des fibres optiques

Un récapitulatif des effets non linéaires décrits dans les paragraphes précédents est donné dans le Tableau II.1.

⁵ CHRAPLYVY (A.R.) et TKACH (R.W.), What is the actual capacity of single-mode fibers in amplified lightwave systems? (*Quelle est la capacité réelle des fibres monomodes dans les systèmes optiques à amplification*), *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Volume 5, p. 66, 1993.

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

Effet optique non linéaire	Raison	Caractéristiques	Puissance critique de lumière dans la fibre monomode	Incidence
Modulation autophase (SPM) et modulation transphase (XPM)	Indice de réfraction dépendant de l'intensité	<ul style="list-style-type: none"> – Décalage de phase <ul style="list-style-type: none"> • auto-induction (SPM) • canal adjacent (XPM) • élargissement spectral 	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$	<ul style="list-style-type: none"> – L'élargissement spectral augmente l'effet de dispersion – Transmission à haut débit limitée par la dispersion/puissance – Compression d'impulsion initiale (dans la plage de dispersion positive) – Élargissement d'impulsion accéléré (dans la plage de dispersion négative) – Propagation d'impulsions (solitons) – Limitations dans les systèmes à modulation PSK par la conversion AM/PM
Mélange de quatre photons ou de quatre ondes (FWM)	Indice de réfraction dépendant de l'intensité	<ul style="list-style-type: none"> – Produits de mélange générés $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ $(i, j \neq k)$ 	$P_c > \sim 10 \text{ mW}$ (pour les fibres G.653) – dépend de paramètres spécifiques comme par exemple l'espacement de canaux et la proximité de λ_0	<ul style="list-style-type: none"> – Diaphonie optique dans les systèmes WDM – Réduction de la puissance du signal
Diffusion Brillouin stimulée (SBS)	Interaction entre les photons et les phonons acoustiques	<ul style="list-style-type: none"> – Raies Brillouin dans le sens arrière $f - \Delta f$ $\Delta f = \sim 13 \text{ GHz}$ (1310 nm) $\Delta f = \sim 11 \text{ GHz}$ (1550 nm) 	$P_c > \sim 5 \text{ mW}$ (pour source optique à faible largeur de raie) – P_c augmente avec la largeur de raie du signal	<ul style="list-style-type: none"> – Instabilité du signal – Affaiblissement optique le long de la fibre – Diaphonie optique dans les systèmes à plusieurs canaux bidirectionnels
Diffusion Raman stimulée (SRS)	Interaction entre les photons et les phonons optiques	<ul style="list-style-type: none"> – Raies Raman $f - n \Delta f$ (Stokes) $\Delta f = \sim 12 \text{ THz}$ $\Delta \lambda = \sim 70 \text{ nm}$ (1310 nm) $\Delta \lambda = \sim 102 \text{ nm}$ (1550 nm) 	$P_c > \sim 1 \text{ W}$ (pour canal unique) $P_c > \sim 1 \text{ mW}$ pour amplification Raman dans un système WDM avec espacement critique des canaux, $\Delta \lambda$	<ul style="list-style-type: none"> – Affaiblissement optique le long de la fibre – Diaphonie optique dans le système WDM – Réduction de la puissance du signal

Le Tableau II.2 donne un deuxième récapitulatif, comparant les tendances des systèmes à grande distance et leurs effets sur les dégradations non linéaires des systèmes.

Tableau II.2/G.663 – Tendances des systèmes à grande distance en fonction des dégradations non linéaires

Tendance des systèmes à grande distance	dégradation due à la SPM	dégradation due à la XPM	dégradation due au FWM	dégradation due à la SBS	dégradation due à la SRS
(a) Diminution de l'espacement des canaux	–	↑	↑	ce	ce
(b) Augmentation du nombre de canaux	–	↑	↑	ce	↑
(c) Augmentation de la puissance injectée dans les canaux	↑(Note)	↑	↑	↑	↑
(d) Augmentation du nombre de tronçons (grande distance)	↑	↑	↑	↑	↑
(e) Augmentation du débit de canal	↑	↓	–	↓	ce
(f) Augmentation du nombre de canaux via un autre multiplexage (comme le multiplexage de modes de polarisation)	ce	ce	ce		
(g) Augmentation du débit de canal via un autre codage des signaux (comme le multiplexage de modes de polarisation)	ce	ce	ce		
NOTE – L'incidence peut être positive (formation de solitons) ou négative pour la qualité de fonctionnement du système. ↑ Augmentation de la dégradation ↓ Diminution de la dégradation – Dégradation peu modifiée ce La dégradation fera l'objet d'un complément d'étude					

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 causées 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, ω_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 , $\left. \frac{\partial \beta_i}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_o}$ est lié à la vitesse de groupe v_g , et $\left. \frac{\partial^2 \beta_i}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_o}$ est lié 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" à l'entrée, les états de sortie associés étant orthogonaux et ne présentant pas de variation en fonction de la longueur d'onde pour le premier ordre. (Dans certains cas, cette approximation ne tient cependant pas et les états principaux peuvent mettre en évidence une variation en fonction de la longueur d'onde, conduisant à une autre dégradation du système par un couplage à la dispersion chromatique).

Comme cela était indiqué dans le paragraphe ci-dessus, la biréfringence introduite dans la fibre a été provoquée par des mécanismes aléatoires et asymétriques locaux 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. La longueur de fibre entre de telles modifications est généralement appelée longueur de couplage et, pour une fibre, elle est généralement exprimée comme la moyenne de toutes les longueurs de couplage local. 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, le temps de propagation de groupe différentiel devient une fonction à variation aléatoire. Il est possible de démontrer que la distribution des temps de propagation de groupe différentiels est décrite par une fonction de distribution de Maxwell définie par:

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

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 $\langle \Delta\tau \rangle$ 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 courts tronçons 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 brouillages intersymboles. Empiriquement, on évalue à 1dB la dégradation lorsque le temps de propagation de groupe différentiel instantané total est égal à $0,3 \cdot T$, 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. Les systèmes à débit binaire plus élevé ont des périodes binaires plus courtes, le temps de propagation de groupe différentiel qu'ils tolèrent est donc plus court. 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 propagation de groupe différentiel moyen égal au dixième d'une période binaire. Une spécification statistique de $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ a été proposée pour les liaisons concaténées de câble à fibres optiques. Lorsque les statistiques de Maxwell et les valeurs probables des autres composantes sont prises en considération, la probabilité pour que la dégradation de 1 dB à 10 Gbit/s soit dépassée pour un tronçon de 400 km est inférieure à $0,4 \times 10^{-7}$. La dégradation due à la dispersion modale de polarisation peut donc être considérée comme une dégradation de puissance du système combinée à une probabilité de dépassement de cette dégradation. Plus les canaux sont nombreux, plus les chances pour qu'au moins l'un d'eux dépasse $0,3T$ sont grandes.

En outre, dans les systèmes à amplificateurs à grande distance utilisant des embrouilleurs 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 du degré de polarisation du signal. Cela dégrade la qualité de fonctionnement du système par des interactions avec un affaiblissement dû à la polarisation (PDL) et une saturation spectralement sélective (PHB) (voir les paragraphes suivants). Dans un système analogique, l'interaction de la dispersion modale de polarisation avec la fluctuation de longueur d'onde du laser conduit à une distorsion de second ordre proportionnelle à la fréquence de modulation. Une autre pénalité de fonctionnement de second ordre, indépendante de la fréquence de modulation, est encourue quand un affaiblissement additionnel dû à la polarisation est présent 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 variation du temps de propagation de groupe différentiel en fonction de la longueur d'onde et, ce qui est plus important, à la variation des états principaux de polarisation en fonction de la longueur d'onde, ce qui conduit à une contribution aléatoire à la dispersion chromatique. Ce domaine n'est pas bien compris et fait l'objet d'un complément d'étude. L'incidence de l'utilisation de dispositifs de compensation de la dispersion chromatique sur la dégradation due à la dispersion modale de polarisation n'est pas claire non plus. L'incidence de l'injection d'une plus grande puissance dans les canaux sur la dispersion modale de polarisation non linéaire nécessite également un complément d'étude.

En ce qui concerne les systèmes amplifiés à 1550 nm, la dispersion modale de polarisation risque de causer plus de problèmes aux anciennes fibres fonctionnant dans des systèmes à un débit égal ou supérieur à 10 Gbit/s qu'aux fibres G.652, G.653 ou G.655 récentes.

II.4.1.3 Méthodes visant à minimiser les limitations induites

Etant donné que le problème a été suscité par la biréfringence, 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 des fibres ou des câbles. Il convient de veiller à optimiser la fabrication des fibres pour assurer la symétrie circulaire géométrique et optique ou pour induire le couplage des modes de polarisation. 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 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 résultante égale à zéro. Pour les fibres et les câbles, la dispersion modale de polarisation moyenne est en général comprise dans la plage:

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

Une autre méthode de réduction de l'effet de la dispersion modale de polarisation 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 d'erreur 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 temps de propagation égal à la durée de 1 bit a permis d'obtenir une compensation dans un système à 5 Gbit/s. Une technique similaire a été appliquée à des systèmes à multiplexage par répartition en fréquence (FDM) cohérents.

II.4.2 Affaiblissement dû à la polarisation

II.4.2.1 Description des effets

L'affaiblissement dû à la polarisation (PDL, *polarization dependent loss*) provient du dichroïsme entre les composants optiques passifs tels que les isolateurs, les coupleurs, etc. sur 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 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 dû à la polarisation (PDL), 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 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 PDL et de l'amplification optique accroît toujours la composante du bruit orthogonale au signal. En outre, 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 du facteur 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 du facteur Q dans le récepteur, ces deux phénomènes conduisant à des dégradations de la qualité de fonctionnement du système.

Dans les systèmes analogiques, l'affaiblissement PDL peut interagir avec la fluctuation de longueur d'onde 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 dans 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 induites

Comme cela est le cas pour la dispersion modale de polarisation, il est important que l'affaiblissement dû à la polarisation dans les composants optiques soit réduit au minimum. Cependant, il convient de noter que l'effet de l'affaiblissement dû à 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 concaténés, l'effet de l'affaiblissement dû à la polarisation sur la qualité de fonctionnement du système est encore à l'étude.

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

II.4.3 Saturation spectralement sélective

II.4.3.1 Description des effets

La saturation spectralement sélective (PHB) résulte d'une saturation anisotrope créée par un signal de saturation polarisé injecté dans la fibre dopée à l'erbium. Cela entraîne un dépeuplement sélectif des états excités alignés sur le champ polarisé. En conséquence, le gain existant dans la direction orthogonale 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 anisotrope au niveau microscopique. Les effets de la saturation 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 de 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 dû à la polarisation, la valeur du facteur Q mesurée est variable dans le temps. Étant donné que deux facteurs contribuent à la saturation spectralement sélective, 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.

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 la direction orthogonale 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 dans 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 causée par le pompage peut être considérée comme une contribution à l'affaiblissement dû à la polarisation dans l'amplificateur. Ainsi, moyennée pour un certain nombre d'amplificateurs, la contribution de bruit devrait être linéaire comme cela est prévu en théorie élémentaire.

La saturation spectralement sélective causée 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 parallèlement 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 évolue avec les changements d'état de polarisation du signal (en raison de la dispersion modale de polarisation) le long de la chaîne amplificatrice. Il varie parce que l'effet de saturation spectralement sélective est

corrélé à l'effet de pompage. L'amplitude du gain différentiel évolue avec la variation relative des états de polarisation du signal et 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 facteur Q du système est de ce fait réduit et varie lui aussi dans le temps.

II.4.3.3 Méthodes visant à minimiser les limitations de transmission induites

Il y a plusieurs façons de réduire les effets de la saturation spectralement sélective. L'utilisation des amplificateurs dans la plage 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 l'embrouillage 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 et ce, parce que l'affaiblissement dû à la polarisation 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 largeur de bande 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 entraîne une repolarisation du signal, permettant ainsi à la saturation spectralement sélective due à la polarisation 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.

II.5 Caractéristiques de dispersion des fibres

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 d'amplificateur optique, l'émission ASE est bloquée par un filtre à l'intérieur de l'amplificateur, du trajet ou du récepteur de signal. A moins que l'émission 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 de l'émission 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 optique, 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 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 de transmission induites

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 puissance amplifiée à la sortie. Ces effets et ces méthodes utilisées en vue de réduire au minimum les limitations induites sont décrits de façon plus détaillée au II.3.

La présence d'un amplificateur optique n'a pas d'incidence sur la dispersion chromatique d'un système. Toutefois, les amplificateurs optiques permettent d'envisager des systèmes à grande distance sans régénération, pour lesquels les dégradations dues à la dispersion chromatique peuvent devenir importantes. A titre d'exemple, une source à fréquence unique, sans fluctuation de longueur d'onde présente une dégradation de puissance optique à 1550 nm pouvant aller jusqu'à 1 dB environ lorsque l'inégalité suivante est vérifiée⁶:

$$B^2 D L \leq 104,000$$

où B est le débit en Gbit/s, D est le coefficient de dispersion chromatique en ps/nm-km et L est la longueur totale du trajet en km.

Des inégalités analogues sont également à l'étude au sein du WG1⁷ SC86C de la CEI. L'inégalité ci-dessus s'applique aux systèmes linéaires, mais peut être incorrecte lorsque des non-linéarités sont prises en considération⁸. Ce sujet nécessite un complément d'étude. En outre, l'interaction d'effets non linéaires avec la dispersion chromatique peut produire des interactions qui ne peuvent pas être annulées par la compensation de la dispersion. Cela a des conséquences sur la valeur théorique de dispersion qu'une fibre doit avoir et sur son uniformité en fonction de la longueur d'onde.

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. Dans certains sous-systèmes à amplification optique, une fonction de compensation de dispersion passive peut être associée à l'amplificateur optique afin d'obtenir un sous-système à amplification 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 optique pour compenser les affaiblissements liés à la fonction de compensation de dispersion passive. Les changements affectant la dispersion chromatique dans le système de transmission sont dus à la présence de la fonction de compensation de dispersion passive (décrite de façon plus complète dans les Recommandations UIT-T de la 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 UIT-T de la série G.690.

⁶ KAMINOW (I.P.) et KOCH (T.L.), *ibid.* p. 167.

⁷ CEI 61282-5 SC86C WG1, Guidelines to accommodate and compensate for dispersion in fibre optic systems (*Indications pour tenir compte de la dispersion dans les systèmes à fibres optiques et pour compenser cette dispersion*).

⁸ CHBAT (M.) et BIGO (S.), Measurement of the impact of fiber non-linearity on high data rate dispersion managed WDM systems (*Mesure de l'incidence de la non-linéarité des fibres sur les systèmes WDM à haut débit et à gestion de la dispersion*), *Symposium on Optical Fiber Measurements*, NIST (USA), septembre 1998.

II.6 Autres caractéristiques relatives aux amplificateurs optiques

II.6.1 Accumulation de bruit

II.6.1.1 Description des effets

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

Le profil spectral du bruit d'émission ASE évolue lui aussi le long du système. Quand le bruit d'émission ASE provenant du premier amplificateur optique est introduit dans un second amplificateur optique, le profil de gain du second amplificateur optique change sous l'effet de la puissance du bruit d'émission ASE via l'effet de saturation de gain. De façon similaire, le profil de gain réel du troisième amplificateur optique est alors modifié par le spectre de puissance de sortie du second amplificateur optique. Un tel effet est transmis tout au long de la chaîne jusqu'au dernier amplificateur optique. Le bruit d'émission ASE est accumulé même si des filtres à bande étroite sont utilisés à chaque amplificateur optique parce que le bruit existe sur des plages 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 du rapport SNR du signal reçu est due principalement au bruit de battement lié à l'émission ASE. De tels bruits de battement augmentent de façon linéaire avec le nombre d'amplificateurs optiques. Ainsi, le taux d'erreur est aggravé par l'augmentation du nombre d'amplificateurs optiques. En outre, l'accumulation de bruit enregistre une croissance exponentielle avec l'amplitude du gain de l'amplificateur.

Après passage dans de nombreux amplificateurs optiques, du fait du spectre de gain de l'amplificateur optique, le spectre de bruit d'émission 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 d'émission ASE s'accumule comme si un nombre infini d'amplificateurs optiques étaient montés en cascade. Bien que l'accumulation de bruit d'émission ASE dans les systèmes filtrés soit considérablement réduite par les filtres, l'accumulation de bruit d'émission ASE dans la bande augmente avec le nombre d'amplificateurs optiques montés en cascade. Ainsi, le rapport signal/bruit (SNR) diminue à mesure que le nombre d'amplificateurs optiques 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 optiques (tout en maintenant le gain total égal à l'affaiblissement total le long du trajet de transmission), étant donné que le bruit d'émission ASE s'accumule exponentiellement avec l'amplitude du gain de l'amplificateur. L'une des techniques suivantes de filtrage peut en outre réduire l'effet indésirable du bruit d'émission ASE: l'utilisation de filtres de bruit d'émission 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 optiques 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 d'émission 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 optiques et des amplificateurs optiques à faible gain afin de diminuer le bruit d'émission ASE initial.

La méthode d'autofiltrage n'est pas applicable si on considère un réseau en anneau fermé tout optique avec multiplexage par répartition en longueur d'onde. En fait, la crête résultante dans le spectre de gain total des amplificateurs optiques peut fortement affecter la qualité de fonctionnement du système. Dans un tel cas, l'accumulation de bruit d'émission ASE peut être réduite au minimum avec la méthode du filtre d'émission 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 optiques, la méthode d'autofiltrage est moins efficace que la méthode de filtrage d'émission ASE. La méthode de filtrage d'émission ASE introduit de la souplesse dans le choix de la longueur d'onde du signal et présente 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 de l'effet

Par suite de l'accumulation de bruit d'émission ASE dans des systèmes sans filtrage, le profil de caractéristiques du spectre d'émission 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 optiques jusqu'à sa saturation finale après un certain nombre d'amplificateurs optiques. Cela peut entraîner une largeur de raie spectrale de seulement 2~3 nm de large après plusieurs dizaines d'amplificateurs optiques. 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 optiques. La longueur d'onde d'autofiltrage peut changer avec les variations intervenant dans la composition du verre hôte, la puissance optique d'entrée, l'affaiblissement entre amplificateurs et leur variation en fonction 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 indésirable dans les systèmes à canaux multiples.

II.6.2.2 Limitations de transmission induites

Dans les systèmes ayant un nombre limité d'amplificateurs optiques, la largeur spectrale de la crête de gain d'autofiltrage reste large et ne réduit pas l'accumulation de bruit d'émission ASE, même avec une longueur d'onde de signal adaptée à la longueur d'onde de la crête. Dans les systèmes avec de nombreux amplificateurs optiques 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 reconfiguration ou la réparation du système par suite des changements intervenus dans les affaiblissements entre les amplificateurs.

Les systèmes à canaux multiples avec des amplificateurs optiques montés en cascade peuvent être affectés par la variation de puissance parmi les canaux qui augmente exponentiellement avec le nombre d'amplificateurs optiques (ce nombre étant l'exposant). Par exemple, l'étalement de puissance pour un système à cinq canaux de ~3 dB après le premier amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) augmente à la valeur de ~15 dB après le sixième amplificateur EDFA. Pour les systèmes à canaux multiples, le changement du nombre total de canaux conduit à des modifications de spectre de gain perturbant d'autres canaux. La variation du gain en fonction des fréquences causée par la saturation conduit également à une variation de gain parmi les canaux.

De ce fait, la marge sur les affaiblissements dans le bilan de puissance doit être soigneusement calculée afin de prendre en compte les changements spectraux du gain de l'amplificateur EDFA à la fois dans les systèmes avec filtrage et dans les systèmes sans filtrage. L'utilisation de filtres d'émission ASE élimine le problème comme décrit au II.6.2.3.

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

Le présent paragraphe présente la mise en œuvre de l'effet d'autofiltrage dans les amplificateurs optiques et également le filtrage du bruit d'émission 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 de filtres de bruit d'émission 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 optiques 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 causée par le bruit d'émission ASE dans les systèmes à grande distance.

Afin d'éviter de tels inconvénients, la méthode de filtrage du bruit d'émission ASE peut être utilisée pour réduire l'accumulation du bruit d'émission ASE en adaptant la bande passante du filtre à la fréquence du signal. Des filtres à bande étroite de largeur maximale à mi-hauteur FWHM < 1 nm sont disponibles sur le marché. L'accumulation du bruit d'émission 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 optiques et de caractéristiques uniformes pour chaque amplificateur optique.

Dans les systèmes à canaux multiples, l'étalement de la puissance entre les canaux due à l'effet d'autofiltrage peut être évité en amplifiant chaque canal dans un amplificateur optique distinct. Cette méthode exige cependant un démultiplexeur onéreux, des amplificateurs optiques distincts et un multiplexeur. Une autre méthode consiste à utiliser l'égalisation de puissance de canal optique 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 optique moins saturé ou moins fortement inversé, permettant d'obtenir ainsi une atténuation qui dépende moins de la longueur d'onde et réduisant en conséquence l'étalement de la puissance entre les canaux. Cependant, dans un montage en cascade d'amplificateurs EDFA fortement inversés, l'émission ASE s'accroît avec le nombre d'amplificateurs EDFA à la première crête de gain autour de ~1530 nm, et doit être éliminée avec un filtre éliminateur de courtes longueurs d'ondes. 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 sur la base des informations de signal reçues du 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 EDFA à pompage suffisant, une impulsion de surpuissance optique se produit en raison de la dynamique lente du gain des amplificateurs EDFA. La surcharge optique est susceptible de se produire en particulier sur les amplificateurs EDFA commandés par la puissance de sortie et ce, parce que la puissance de

pompage pour de tels amplificateurs 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, le temps de montée (10-90 %) de la puissance optique est généralement de $\sim 0,3$ ms environ, ce qui correspond à un temps suffisamment court pour provoquer une impulsion de surpuissance optique. Cependant, si l'amplificateur 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.

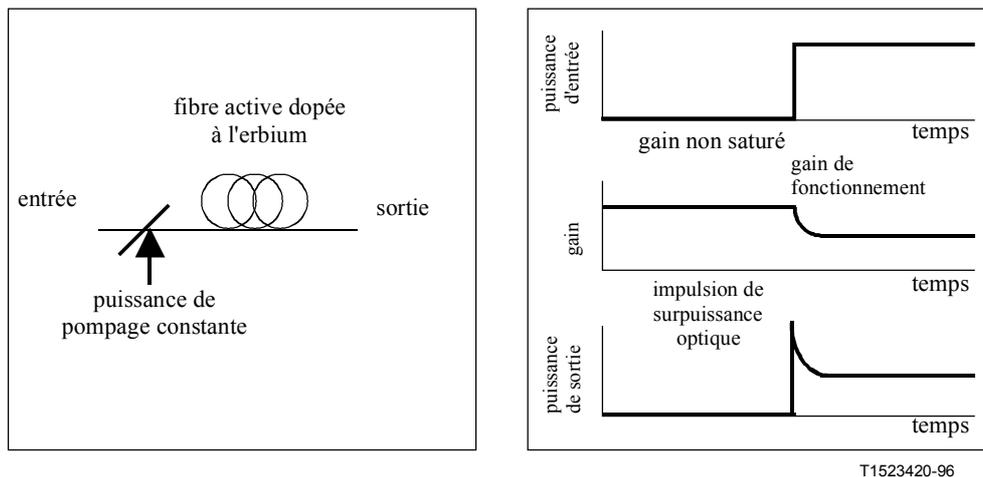


Figure II.6-1/G.663 – Exemple de génération d'impulsion de surpuissance optique

II.6.3.2 Limitations de transmission induites

Dans les montages en cascade d'amplificateurs EDFA, la puissance crête de la surcharge optique peut atteindre plusieurs watts, ce qui peut endommager les convertisseurs optoélectroniques 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'œil 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.

II.6.3.3 Minimisation de l'effet de génération 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 EDFA quand la perte du signal d'entrée est détectée;
- 2) rétablissement de la puissance de pompage vers les amplificateurs 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 une unité 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 du gain de l'amplificateur EDFA, par exemple < 1 ms, la puissance du laser de pompage doit être maintenue inchangée.

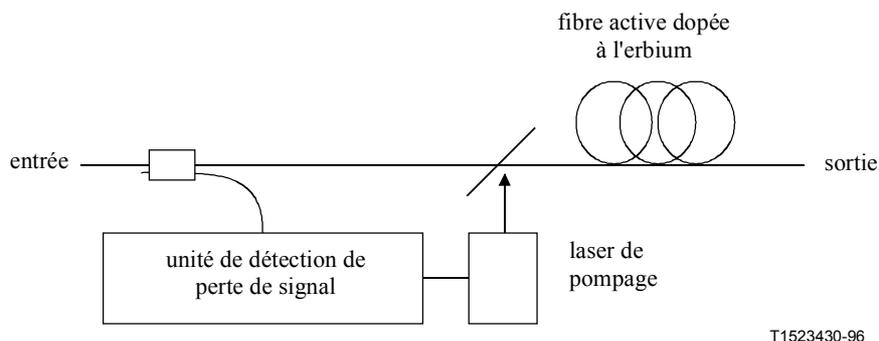


Figure II.6-2/G.663 – Exemple de système de prévention des impulsions de surpuissance optique

II.6.4 Non-linéarité causée par la saturation dans les amplificateurs optiques à semi-conducteurs

II.6.4.1 Description des effets

Les amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOA) sont affectés par un type particulier de comportement non linéaire, lié à l'action combinée de la dynamique de gain rapide des amplificateurs SOA et du couplage amplitude-phase typique des supports amplificateurs à semi-conducteurs.

Ce phénomène, désigné par non-linéarité causée par la saturation, peut affecter la qualité de fonctionnement des systèmes de télécommunication utilisant des amplificateurs SOA du fait que la durée de vie des porteuses τ_c (0,2-0,5 ns) des amplificateurs SOA est comparable à la largeur des impulsions optiques utilisées pour la transmission. En fait, la saturation du gain des amplificateurs SOA peut être si rapide que les bords avant et arrière de l'impulsion optique peuvent avoir un gain différent. L'évolution temporelle de la saturation dépend généralement du profil temporel de l'impulsion tandis que le degré de compression de gain dépend de l'énergie de l'impulsion comparée à l'énergie de saturation de l'amplificateur SOA ($E_{sat} = P_{sat} \tau_c$), où une valeur typique de la puissance de saturation intrinsèque de l'amplificateur SOA est de 30 mW – à ne pas confondre avec la puissance de saturation à 3 dB qui est inférieure: 10-15 mW). Ce comportement est régi par l'équation suivante:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Gamma_0 - \Gamma}{\tau_c} - \frac{P_{in}(t)}{E_{sat}} \{ \exp(\Gamma) - 1 \}$$

où $\Gamma(t)$ est le coefficient de gain intégré sur toute la longueur de l'amplificateur SOA, Γ_0 est le gain intégré non saturé de l'amplificateur SOA et $P_{in}(t)$ est le profil temporel du signal optique. Le gain de l'amplificateur SOA est donné par $G(t) = \exp[\Gamma(t)]$.

Le signal optique sortant de l'amplificateur est donc distordu par le gain différentiel, étant donné que $P_{out}(t) = G(t) P_{in}(t)$. Ce comportement peut causer des effets de motif dans la séquence de données optiques, du fait que le gain d'une impulsion varie en fonction de la présence de "marques" ou "espace" logiques dans les bits précédents. Il est important de noter que ce phénomène se produit dans chaque type d'amplificateur à laser (y compris les amplificateurs EDFA), mais dans les amplificateurs SOA, l'échelle temporelle de saturation du gain est comparable à la durée du bit optique.

L'aspect particulier des amplificateurs SOA est que l'impulsion amplifiée subit également une fluctuation de longueur d'onde et un décalage de fréquence, en raison du couplage amplitude-phase typique des supports à semi-conducteurs. Cela s'explique par le fait que la puissance optique de

l'impulsion entrant dans l'amplificateur SOA réduit la population des porteuses et, par conséquent, modifie l'indice de réfraction de la cavité semi-conductrice. La phase de l'impulsion varie donc dynamiquement comme suit:

$$\phi_{out}(t) = \phi_{in}(t) - \frac{1}{2} \beta_c \Gamma(t)$$

β_c est le facteur d'amélioration de la ligne, le paramètre mesurant la valeur du couplage amplitude-phase (généralement 4-6 pour des amplificateurs SOA). Le décalage de fréquence instantané est obtenu en différenciant l'équation ci-dessus par rapport au temps et en tenant compte de l'équation relative à $\Gamma(t)$. Ce phénomène est appelé *modulation autophase causée par la saturation* (SI-SPM)⁹. Il peut être préjudiciable lorsqu'il est combiné à la dispersion chromatique de la fibre.

II.6.4.2 Limitations de transmission induites

Les systèmes optiques point à point mono-canaux classiques utilisant des émetteurs NRZ sont essentiellement dégradés par des effets de motif et, dans une moindre mesure, par la fluctuation de longueur d'onde des impulsions causée par les amplificateurs SOA¹⁰. Les effets de motif peuvent aussi affecter la propagation des impulsions RZ; dans ce cas, si la puissance des impulsions est suffisamment élevée, le décalage de fréquence de l'impulsion peut également jouer un rôle important. Lorsque la dispersion de la fibre à la longueur d'onde de fonctionnement est différente de zéro, le décalage de fréquence est converti en gigue temporelle pouvant détruire la séquence binaire d'origine, imposant par là-même des limitations de distance au système. Cet effet peut être particulièrement préjudiciable en cas d'utilisation de techniques de transmission non linéaires (solitons optiques par exemple), car, pour les solitons, l'énergie des impulsions doit être maintenue élevée et la dispersion doit être différente de zéro (anormale)^{10, 11}.

II.6.4.3 Méthodes de minimisation des limitations induites

La non-linéarité causée par la saturation est inhérente aux amplificateurs SOA. On peut l'éviter en faisant fonctionner l'amplificateur SOA dans la plage linéaire ou en mettant en œuvre des techniques de blocage du gain. Dans le premier cas, il faut veiller à l'accumulation de bruit d'émission ASE le long de la liaison optique; il peut être utile de recourir à un filtre optique après chaque amplificateur pour éviter les effets de saturation de gain statique dus à l'accumulation de bruit d'émission ASE. Dans le deuxième cas, le blocage de gain permet de réduire le gain disponible. En maintenant la puissance moyenne à un niveau bas (1-5 mW) et la dispersion proche de zéro, on a montré expérimentalement que la qualité de fonctionnement des systèmes NRZ et RZ était correcte jusqu'à 400 km^{11, 12}. Les dégradations dues à la modulation autophase causée par la saturation (SI-SPM) dans les systèmes à solitons à grande distance peuvent être réduites au moyen de techniques de filtrage adaptées (filtres glissants)¹¹.

⁹ AGRAWAL (G.P.) et OLSSON (N.A.), *IEEE J. Quantum Electron.*, Volume 25, p. 2297-2306, 1989.

¹⁰ SETTEMBRE (M.) et al., *J. Wavelength Technol.*, Volume 15, p. 962-967, 1997.

¹¹ MECOZZI (A.), *Optics Letters*, Volume 20, p. 1616-1618, 1995.

¹² REID (J.J.E.) et al., *Proc. of ECOC'98*, Volume 1, p. 567-568, Madrid (Espagne), 1998.

APPENDICE III

Paramètres relatifs au préamplificateur

Cet appendice contient la définition des paramètres caractéristiques applicables aux préamplificateurs qui permettent, par des formules usuelles, d'obtenir la puissance d'entrée minimale assurant un taux d'erreurs binaires (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 BER égal à 10^{-12} dans l'équipement TRE sont les suivantes:

- gain maximal pour les petits signaux "GMax" (UIT-T G.661 [6]);
- gain pour les petits signaux "G" (UIT-T G.661);
- facteur de bruit spontané-signal " NF_{s-sp} " (UIT-T G.661);
- facteur de bruit "NF" (UIT-T G.661);
- bande passante optique du bruit de battement spontané-spontané (équivalente) (B_{sp-sp}) (UIT-T G.661).

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 spontané-signal et le bruit de battement spontané-spontané.

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

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

Chacune des contributions de bruit peut être exprimée sous la forme d'un facteur de bruit partiel "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) est exprimé comme suit:

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

Cette formule 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 optique.

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

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

où:

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

$h\nu$ est l'énergie des photons du signal, P_{in} la puissance optique à l'entrée du préamplificateur, 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 F diminue si on réduit la valeur de B_{sp-sp} , mais pour des raisons de compatibilité avec UIT-T G.957 [14] existante, il doit être limité à des valeurs de l'ordre de 1 nm (≈ 120 GHz). Le rapport signal/bruit (SNR) dans l'équipement TRE est exprimé par la formule:

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

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_{Rx} est le bruit équivalent de l'équipement TRE. A partir des deux formules précédentes, il est possible d'obtenir la puissance d'entrée minimale du préamplificateur pour un taux d'erreur binaire (BER) = 10^{-12} dans l'équipement TRE. Il est évident que le préamplificateur optimal doit avoir un gain suffisamment élevé pour rendre négligeable la contribution de bruit de l'équipement TRE par rapport au bruit du préamplificateur. Le rapport SNR pour un taux BER meilleur que 10^{-12} doit être maintenu sur toute la plage de puissance d'entrée. Le préamplificateur sera caractérisé, du point de vue du bruit, par la définition d'un gain pour les petits signaux (G), la contribution d'émission spontanée-signal au facteur de bruit (F_{s-sp}) et la bande passante équivalente du bruit de battement spontané-spontané (B_{sp-sp}). Il est important de vérifier le facteur de bruit total du préamplificateur pour garantir que des contributions provenant du bruit de réflexion interne n'affectent pas le préamplificateur.

Exemple

Calcul du rapport SNR pour un récepteur équipé d'un préamplificateur afin de garantir un taux BER égal à 10^{-12} dans un équipement TRE SDH à 2,5 Gbit/s.

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

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

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, lorsqu'on définit un gain pour les petits signaux de 20 dB. Cette formule repose sur l'approximation 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 spontané-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 $\frac{N_{Rx}}{P_{in} G^2}$, dans lequel N_{Rx} est le bruit équivalent du terminal TRE.

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

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 UIT-T G.957 [14] pour un équipement TRE à 2,5 Gbit/s, une sensibilité minimale de -26 dBm pour un taux BER égal à 10^{-12} et des paramètres caractéristiques du préamplificateur précédemment considérés:

- Gain maximal pour les petits signaux 24 dB
- gain pour les petits signaux (G) ≥ 20 dB
- facteur de bruit spontané-signal (NF_{s-sp}) $\leq 5,5$ dB
- bande de longueurs d'onde disponibles du signal (B_{s-sp}) 1 nm (0,8 – 1,2)
- rapport signal/bruit (SNR) pour un taux BER = 10^{-12} dans l'équipement TRE 3 dB
- taux d'extinction de la source optique 8,2 dB
- bande passante de l'équipement TRE (la bande passante électrique du récepteur, proportionnelle au débit) $B = f_{Nyquist} (1 + \ell)$; où $f_{Nyquist} = (\text{débit})/2 = (2,5 \text{ Gbit/s})/2$ et ℓ 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 de bruit de l'équipement 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 BER égal à 10^{-12} est obtenue dans l'équipement 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 sera de -12 dBm, permettant que la sensibilité du préamplificateur (PA) soit considérée comme celle du récepteur composite (PA + TRE). Etant donné les conditions de fonctionnement au gain minimal pour le préamplificateur (gain pour les petits signaux, $G = 20$ dB), la puissance optique moyenne à la sortie du préamplificateur 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 optiques

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

IV.1 Sous-systèmes amplificateurs optiques

Etant 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 UIT-T G.783 [12].

IV.2 Dispositifs amplificateurs optiques

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

- perte de signal (LOS) dans l'amplificateur optique indiquant une perte possible du signal d'entrée (défaut de transmission);
- défaillance de l'amplificateur optique, indiquant qu'un amplificateur optique ne peut plus remplir sa fonction fondamentale d'amplification optique (défaut des équipements);
- état d'arrêt de l'amplificateur optique (état de sortie).

Cette distinction est faite pour apporter à l'utilisateur les informations sur les équipements ou l'installation de câbles. En outre, les amplificateurs optiques utilisés avec un signal de commande "activation/désactivation" afin de pouvoir limiter les 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 dans l'amplificateur optique" ou "la perte du canal de surveillance optique" (dans le cas de la présence d'amplificateurs de ligne) fera l'objet d'un complément d'étude.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

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