

Union internationale des télécommunications

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

Série G
Supplément 41
(05/2005)

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

**Guides de conception des systèmes de câbles
optiques sous-marins**

Recommandations UIT-T de la série G – Supplément 41



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 RADIODÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.600–G.699
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999
QUALITÉ DE SERVICE ET DE TRANSMISSION – ASPECTS GÉNÉRIQUES ET ASPECTS LIÉS À L'UTILISATEUR	G.1000–G.1999
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.6000–G.6999
DONNÉES SUR COUCHE TRANSPORT – ASPECTS GÉNÉRIQUES	G.7000–G.7999
ASPECTS RELATIFS AU PROTOCOLE ETHERNET SUR COUCHE TRANSPORT	G.8000–G.8999
RÉSEAUX D'ACCÈS	G.9000–G.9999

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

Supplément 41 aux Recommandations UIT-T de la série G

Guides de conception des systèmes de câbles optiques sous-marins

Résumé

Le présent Supplément décrit des considérations de conception applicables à des systèmes avec répéteurs, sans répéteur ou à amplification optique prenant en charge des signaux SDH et OTN dans des systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques. Il porte plus précisément sur des questions propres aux systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques.

Il décrit également une manière commune d'envisager les exigences applicables à la conception de systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques et vise à consolider et à étoffer des éléments d'information relatifs à plusieurs Recommandations, en particulier les Recommandations UIT-T G.971, G.972, G.973, G.974, G.975, G.975.1, G.976 et G.977.

Source

Le Supplément 41 aux Recommandations UIT-T de la série G a été agréé le 27 mai 2005 par la Commission d'études 15 (2005-2008) de l'UIT-T.

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

NOTE

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

Le respect de cette publication se fait à titre volontaire. Cependant, il se peut que la publication contienne certaines dispositions obligatoires (pour assurer, par exemple, l'interopérabilité et l'applicabilité) et considère que la publication est respectée lorsque toutes ces dispositions sont observées. Le futur d'obligation et les autres moyens d'expression de l'obligation comme le verbe "devoir" ainsi que leurs formes négatives servent à énoncer des prescriptions. L'utilisation de ces formes ne signifie pas qu'il est obligatoire de respecter la publication.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente publication 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 publications.

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

© UIT 2006

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

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	Domaine d'application 1
2	Références normatives..... 1
2.1	Références générales 1
2.2	Références pour les paragraphes 6, 7 et 9 3
3	Termes et définitions 3
4	Abréviations et acronymes 3
5	Paramètres des éléments du système 5
5.1	Paramètres d'émetteur..... 5
5.2	Paramètres de câble sous-marin 7
5.3	Paramètres de répéteur sous-marin..... 10
5.4	Paramètres de raccord de câbles..... 13
5.5	Paramètres de récepteur..... 14
6	Topologie de réseau optique..... 15
6.1	Topologie point à point 15
6.2	Topologie en étoile 16
6.3	Topologie en étoile avec dérivation 16
6.4	Topologie de jonction et dérivation..... 17
6.5	Topologie en guirlande..... 17
6.6	Topologie en anneau..... 17
6.7	Topologie en anneau avec dérivation 18
7	Considérations relatives à la conception du système..... 18
7.1	Bilan de puissance optique 18
7.2	Considérations liées à la dispersion chromatique..... 34
8	Correction d'erreur directe 36
9	Considération liée à la fiabilité 36
9.1	Prescriptions en matière de fiabilité 36
9.2	Panne interne 37
9.3	Panne d'origine externe 40
9.4	Localisation des pannes..... 41
10	Considérations liées à la mise à niveau des équipements..... 41

Supplément 41 aux Recommandations UIT-T de la série G

Guides de conception des systèmes de câbles optiques sous-marins

1 Domaine d'application

Le présent Supplément décrit des considérations de conception applicables à des systèmes avec répéteurs, sans répéteur ou à amplification optique prenant en charge des signaux SDH et OTN dans des systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques. Il porte plus précisément sur des questions propres aux systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques.

Il décrit également une manière commune d'envisager les exigences applicables à la conception de systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques et vise à consolider et à étoffer des éléments d'information relatifs à plusieurs Recommandations, en particulier les Recommandations UIT-T G.971, G.972, G.973, G.974, G.975, G.975.1, G.976 et G.977.

Le présent Supplément devrait par ailleurs permettre au lecteur de mieux comprendre les spécifications des Recommandations sur les fibres, les composants et les interfaces de système, actuellement élaborées dans le cadre respectif des Questions Q.5/15, Q.7/15 et Q.8/15. Il ne devrait pas empêcher le développement des techniques liées aux systèmes de câbles à fibres optiques.

2 Références normatives

2.1 Références générales

Les Recommandations UIT-T et autres références suivantes sont citées dans le présent Supplément.

- Recommandation UIT-T G.650.1 (2004), *Définitions et méthodes de test applicables aux attributs linéaires déterministes des fibres et câbles optiques monomodes.*
- Recommandation UIT-T G.650.2 (2005), *Définitions et méthodes de test applicables aux attributs se rapportant aux caractéristiques statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes.*
- Recommandation UIT-T G.652 (2005), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes.*
- Recommandation UIT-T G.653 (2003), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques monomodes à dispersion décalée.*
- Recommandation UIT-T G.654 (2004), *Caractéristiques des câbles et fibres optiques monomodes à longueur d'onde de coupure décalée.*
- Recommandation UIT-T G.655 (2003), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques monomodes à dispersion décalée non nulle.*
- Recommandation UIT-T G.656 (2004), *Caractéristiques des fibres et câbles optiques à dispersion non nulle destinés au transport à large bande.*
- Recommandation UIT-T G.661 (1998), *Définition et méthodes de mesure des paramètres génériques relatifs aux dispositifs et sous-systèmes amplificateurs optiques.*
- Recommandation UIT-T G.663 (2000), *Aspects relatifs aux applications des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques.*
- Recommandation UIT-T G.671 (2005), *Caractéristiques de transmission des composants et sous-systèmes optiques.*
- Recommandation UIT-T G.691 (2003), *Interfaces optiques pour les systèmes STM-64 et autres systèmes SDH monocanaux à amplificateurs optiques.*

- Recommandation UIT-T G.692 (1998), *Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques.*
- Recommandation UIT-T G.693 (2005), *Interfaces optiques pour les connexions locales.*
- Recommandation UIT-T G.694.1 (2002), *Grilles spectrales pour les applications de multiplexage par répartition en longueurs d'onde: grille dense DWDM.*
- Recommandation UIT-T G.694.2 (2003), *Grilles spectrales pour les applications de multiplexage par répartition en longueur d'onde: grille espacée CWDM.*
- Recommandation UIT-T G.826 (2002), *Paramètres et objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur de bout en bout pour les connexions et conduits numériques internationaux à débit constant.*
- Recommandation UIT-T G.828 (2000), *Paramètres et objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur pour les conduits numériques synchrones internationaux à débit constant.*
- Recommandation UIT-T G.911 (1997), *Paramètres et méthodes de calcul de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes à fibres optiques.*
- Recommandation UIT-T G.957 (1999), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone.*
- Recommandation UIT-T G.959.1 (2003), *Interfaces de couche Physique du réseau optique de transport.*
- Recommandation UIT-T G.971 (2004), *Caractéristiques générales des systèmes de câbles optiques sous-marins.*
- Recommandation UIT-T G.972 (2004), *Définition des termes relatifs aux systèmes de câbles optiques sous-marins.*
- Recommandation UIT-T G.973 (2003), *Caractéristiques des systèmes en câbles sous-marins à fibres optiques sans répéteurs.*
- Recommandation UIT-T G.974 (2004), *Caractéristiques des systèmes de câbles optiques sous-marins équipés de régénérateurs.*
- Recommandation UIT-T G.975 (2000), *Correction directe d'erreur pour les systèmes sous-marins.*
- Recommandation UIT-T G.975.1 (2004), *Correction directe d'erreur pour les systèmes sous-marins à haut débit et à multiplexage par répartition dense en longueurs d'onde.*
- Recommandation UIT-T G.976 (2004), *Méthodes de test applicables aux systèmes de câbles optiques sous-marins.*
- Recommandation UIT-T G.977 (2004), *Caractéristiques des systèmes de câbles optiques sous-marins à amplification optique.*
- Recommandations UIT-T de la série G – Supplément 39 (2003), *Considérations sur la conception et l'ingénierie des systèmes optiques.*
- CEI/TR 61282-3 (2002), *Guides de conception des systèmes de communication à fibres optiques – Partie 3: Calcul de la dispersion en mode de polarisation.*
- CEI/TR 62380 (2004), *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment.*

2.2 Références pour les paragraphes 6, 7 et 9

- [1] ZSAKANY (J.C.), MARSHALL (N.W.), ROBERTS (J.M.), ROSS (D.G.): The Application of Undersea Cable Systems in Globe Networking, *AT&T Technical Journal*, Vol. 74, No.1, pp.8-15, January/February 1995.
- [2] O'MAHONY (M.J.), SPIRIT (D.M.): High Capacity Optical Transmission Explained, *John Wiley & Sons*, 1995.
- [3] WINZER (P.J.), KALMÁR (A.): Sensitivity Enhancement of Optical Receivers by Impulse Coding, *JLT*, Vol. 17, No. 2, February 1999.
- [4] AGRAWAL (G.P.): Nonlinear Fiber Optics, *Academic Press*, Edition 1989.
- [5] TKACH (R.W.), CHAPLYVY (A.R.), FORGHIERI (F.), GNAUCK (A.H.), DEROSIER (R.M.): Four Photon Mixing and High-Speed WDM Systems, *JLT*, Vol. 13, No. 5, May 1995.
- [6] BERGANO (N.S.), ASPELL (J.), DAVIDSON (C.R.), TRISCHITTA (P.R.), NYMAN (B.M.), KERFOOT (F.W.): Bit Error Rate Measurements of 14000 km 5 Gbit/s Fibre-Amplifier Transmission System using Recirculating Loop, *Elec. Letters*, Vol. 27, No. 21, October 1991.
- [7] Military Handbook MIL-HDBK-217, *Reliability prediction of electronic component* (1995).
- [8] Telcordia Technologies Special Report SR-332, *Reliability procedure for electronic equipment*, Issue No. 1 (May 2001).

3 Termes et définitions

Les définitions formelles sont données dans les Recommandations d'origine.

4 Abréviations et acronymes

3R	régénération de la puissance, de la forme et de la synchronisation
ASE	émission spontanée amplifiée (<i>amplified spontaneous emission</i>)
BER	taux d'erreurs sur les bits (<i>bit-error ratio</i>)
BOL	début de vie (<i>beginning of life</i>)
BU	unité de dérivation (<i>branching unit</i>)
COTDR	réflectométrie optique temporelle cohérente (<i>coherent optical time domain reflectometry</i>)
CSF	fibre monomode à longueur d'onde de coupure décalée (<i>cut-off shifted single mode fibre</i>)
CWDM	multiplexage par répartition espacée en longueurs d'onde (<i>coarse wavelength division multiplexing</i>)
DGD	temps de propagation de groupe différentiel (<i>differential group delay</i>)
DLS	tronçon de ligne numérique (<i>digital line section</i>)
DPSK	modulation par déplacement de phase différentiel (<i>differential phase shift keying</i>)
DSF	fibre monomode à dispersion décalée (<i>dispersion shifted single mode fibre</i>)
DWDM	multiplexage par répartition dense en longueurs d'onde (<i>dense wavelength division multiplexing</i>)

DWDMS	système de multiplexage par répartition dense en longueurs d'onde (<i>dense wavelength division multiplexing system</i>)
EDF	fibre dopée à l'erbium (<i>erbium doped fibre</i>)
EOL	fin de vie (<i>end of life</i>)
ER	taux d'extinction (<i>extinction ratio</i>)
FEC	correction d'erreur directe (<i>forward error correction</i>)
FIT	nombre de défaillances dans un temps donné (<i>failure in time</i>)
FWM	mélange de quatre ondes (<i>four-wave mixing</i>)
IrDI	interface interdomaniale (<i>inter-domain interface</i>)
LOC	canal optique de ligne (<i>line optical channel</i>)
MPI-R	interface sur trajets multiples au niveau du récepteur (<i>multi-path interface at the receiver</i>)
MPI-S	interface sur trajets multiples au niveau de l'émetteur (<i>multi-path interface at the source</i>)
MTBF	durée moyenne entre deux défaillances (<i>mean time between failures</i>)
MTTR	temps moyen de réparation (<i>mean time to repair</i>)
NDSF	fibre monomode à dispersion non décalée (<i>non-dispersion shifted single mode fibre</i>)
NF	facteur de bruit (<i>noise figure</i>)
NRZ	non-retour à zéro (<i>non return to zero</i>)
NZDSF	fibre optique monomode à dispersion décalée non nulle (<i>non-zero dispersion shifted single mode fibre</i>)
OA	amplificateur optique (<i>optical amplifier</i>)
OD	démultiplexeur optique (<i>optical demultiplexer</i>)
OFA	amplificateur à fibres optiques (<i>optical fibre amplifier</i>)
OM	multiplexeur optique (<i>optical multiplexer</i>)
OOK	modulation par tout ou rien (<i>on-off keying</i>)
OSNR	rapport signal optique sur bruit (<i>optical signal-to-noise ratio</i>)
OSR	répéteur optique sous-marin (<i>optical submarine repeater</i>)
OTDR	réflectométrie optique temporelle (<i>optical time domain reflectometry</i>)
OTN	réseau de transport optique (<i>optical transport network</i>)
PDG	variation du gain en fonction de la polarisation (<i>polarization-dependent gain</i>)
PDL	affaiblissement dû à la polarisation (<i>polarization-dependent loss</i>)
PFE	équipement de téléalimentation (<i>power feeding equipment</i>)
PHB	saturation spectralement sélective due à la polarisation (<i>polarization hole burning</i>)
PMD	dispersion des modes de polarisation (<i>polarization mode dispersion</i>)
R	point de l'interface optique monocanal au niveau du récepteur
RX	récepteur (optique) (<i>(optical) receiver</i>)
RZ	retour à zéro (<i>return to zero</i>)

S	point de l'interface optique monocanal au niveau de l'émetteur
SDH	hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SOP	état de polarisation (<i>state of polarization</i>)
SPM	modulation autophase (<i>self-phase modulation</i>)
SRS	diffusion Raman stimulée (<i>stimulated Raman scattering</i>)
SWS	système mono longueur d'onde (<i>single wavelength system</i>)
TS	station terminale (<i>terminal station</i>)
TTE	équipement terminal de transmission (<i>terminal transmission equipment</i>)
TX	émetteur (optique) (<i>optical transmitter</i>)
WDM	multiplexage par répartition en longueurs d'onde (<i>wavelength division multiplexing</i>)
WDMS	système à multiplexage par répartition en longueurs d'onde (<i>wavelength division multiplexing system</i>)
XPM	modulation transphase (<i>cross-phase modulation</i>)

5 Paramètres des éléments du système

5.1 Paramètres d'émetteur

Ces paramètres, définis au point de référence S ou MPI-S en sortie de l'émetteur, sont précisés dans les Recommandations UIT-T G.957, G.691, G.692 et G.959.1.

5.1.1 Gamme de longueurs d'onde de fonctionnement du système

Les gammes de longueurs d'onde de fonctionnement pour des systèmes SDH monocanaux fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s sont indiquées dans les Recommandations UIT-T G.691 et G.957. Les gammes de longueurs d'onde de fonctionnement pour les interfaces IrDI monocanaux et multicanaux fonctionnant jusqu'à 40 Gbit/s sont définies dans la Rec. UIT-T G.959.1. D'autres applications peuvent faire intervenir d'autres bandes de fréquences ou d'autres gammes dans des bandes comme défini dans le présent Supplément.

5.1.2 Caractéristiques spectrales

Les caractéristiques spectrales d'interfaces SDH monocanaux fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s sont données dans les Recommandations UIT-T G.957 et G.691. Pour des débits supérieurs ou pour des distances plus longues, en particulier dans un environnement WDM, des spécifications supplémentaires peuvent être nécessaires.

5.1.3 Largeur spectrale maximale des sources de type monomode longitudinal (SLM, *single-longitudinal mode*)

Ce paramètre est défini pour des systèmes SDH monocanaux dans la Rec. UIT-T G.691.

5.1.4 Largeur spectrale maximale des sources de type multimode longitudinal (MLM, *multi-longitudinal mode*)

Ce paramètre est défini pour des systèmes SDH monocanaux dans la Rec. UIT-T G.691.

5.1.5 Modulation de fréquence linéaire (chirp)

Ce paramètre est défini dans la Rec. UIT-T G.691. Dans le cas d'un système fonctionnant à un débit plus élevé ou sur une distance plus longue, éventuellement aussi avec d'autres codes de ligne, il est probable que des spécifications additionnelles relatives à un comportement dynamique à résolution

temporelle soient requises. Celles-ci, ainsi que la mesure du paramètre chirp, feront l'objet d'un complément d'étude.

5.1.6 Taux de suppression de modes latéraux

Le taux de suppression de modes latéraux d'une source optique monomode longitudinale est défini dans les Recommandations UIT-T G.957, G.691 et G.959.1. Les valeurs sont données pour des systèmes IrDI SDH et OTN fonctionnant jusqu'à 40 Gbit/s.

5.1.7 Densité de puissance spectrale maximale

La densité de puissance spectrale maximale est définie dans la Rec. UIT-T G.691.

5.1.8 Maximum de puissance moyenne de sortie de canal

Le maximum de puissance moyenne de sortie de canal d'un signal optique multicanal est spécifié et défini dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.1.9 Minimum de puissance moyenne de sortie de canal

Cette propriété d'un signal optique multicanal est spécifiée et définie dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.1.10 Fréquence centrale

Les fréquences centrales de signaux WDM sont données dans la Rec. UIT-T G.694.1 pour différents espacements, le plus petit étant de 12,5 GHz.

5.1.11 Espacement des canaux

L'espacement des canaux est défini dans la Rec. UIT-T G.694.1 pour le multiplexage DWDM et dans la Rec. UIT-T G.694.2 pour le multiplexage CWDM. Une classification complète des systèmes WDM figure dans la Rec. UIT-T G.671.

5.1.12 Ecart maximal par rapport à la fréquence centrale

L'écart maximal par rapport à la fréquence centrale pour les canaux optiques à codage NRZ est défini dans les Recommandations UIT-T G.692 et G.959.1. D'autres solutions faisant intervenir un filtrage asymétrique pourraient nécessiter une définition différente, ce qui appelle un complément d'étude.

5.1.13 Taux minimal d'extinction

Le taux minimal d'extinction, qui correspond à une valeur par canal pour des systèmes WDM à code NRZ, est défini dans la Rec. UIT-T G.959.1. La même méthode s'applique dans le cas de signaux à code RZ. En ce qui concerne d'autres codes de ligne, cette définition doit faire l'objet d'un complément d'étude.

5.1.14 Diagramme en œil

Les diagrammes en œil des systèmes monocanaux SDH sont données dans les Recommandations UIT-T G.957, G.691, G.693 et dans d'autres Recommandations. Le diagramme en œil pour les interfaces multi ou mono canaux IrDI à code NRZ est défini dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.1.15 Polarisation

Ce paramètre donne la distribution de polarisation du signal de source optique. Il peut avoir une incidence sur la tolérance de dispersion PMD et est important dans le cas d'un multiplexage de polarisation.

5.1.16 Rapport signal optique sur bruit optique d'une source optique

Cette valeur donne le rapport entre la puissance du signal optique et la puissance du bruit optique pour un émetteur optique fonctionnant dans une largeur de bande donnée associée au trajet de transmission.

5.2 Paramètres de câble sous-marin

Le câble sous-marin est destiné à assurer une protection des fibres optiques contre la pression de l'eau, la propagation d'eau longitudinale, l'agression chimique et les effets de contamination par l'hydrogène tout au long de la durée de vie nominale du câble.

De par sa conception, le câble doit également être tel que les fibres ne subissent pas de dégradation de la performance lorsque le câble est posé, enfoui, relevé et manipulé conformément aux pratiques sous-marines habituelles.

Les spécifications des câbles sous-marins à fibres optiques ainsi que les aspects relatifs à leur implémentation figurent dans les Recommandations UIT-T G.973, G.974 et G.977.

5.2.1 Classification des câbles sous-marins

5.2.1.1 Classification fondée sur l'application

Un câble sous-marin à fibres optiques peut être:

- un câble sous-marin avec répéteurs;
- un câble sous-marin sans répéteur;
- un câble terrestre marinisé.

Les câbles sous-marins avec répéteurs peuvent être utilisés pour toutes les applications sous-marines, principalement en eaux profondes.

Les câbles sous-marins sans répéteur sont adaptés à une utilisation en eaux peu profondes ou en eaux profondes. Les câbles terrestres marinisés (MTC, *marinized terrestrial cable*) sont généralement utilisés pour franchir des lacs ou des rivières. Tous les câbles sous-marins subissent généralement des tests approfondis pour vérifier qu'ils peuvent être installés et réparés in situ, même dans les pires conditions météorologiques, sans dégradation de la performance ou de la fiabilité optique, électronique ou mécanique.

5.2.1.2 Classification fondée sur la protection du câble

Un câble sous-marin à fibres optiques doit assurer la protection contre les risques naturels présents à sa profondeur d'utilisation: protection contre la vie marine, les morsures des poissons et l'abrasion, blindage contre les agressions et les activités des navires. La Rec. UIT-T G.972, définit différents types de câble protégé, notamment:

- le câble à simple armure;
- le câble à double armure;
- le câble superarmé.

5.2.1.3 Classification fondée sur la protection des fibres par la structure du câble

La structure du câble et celle de la fibre, qui déterminent le comportement mécanique global du câble, doivent être telles que la durée de vie nominale du système soit garantie, compte tenu de l'effet cumulatif de la charge appliquée au câble pendant les opérations de pose, de relevage et de réparation, ainsi que de toute charge permanente ou élongation résiduelle appliquée au câble installé.

Deux types génériques de structure de câble sont généralement utilisés pour protéger les fibres optiques:

- la structure serrée de câble: les fibres sont fortement maintenues dans le câble, de sorte que l'allongement de la fibre est pratiquement égal à celui du câble;
- la structure lâche de câble: les fibres se meuvent librement dans le câble, de sorte que l'allongement de la fibre est inférieur à celui du câble, nul jusqu'à ce que l'allongement du câble atteigne une valeur donnée.

5.2.2 Paramètres de transmission des fibres dans un câble sous-marin

Généralement, les caractéristiques de transmission des fibres avant câblage (c'est-à-dire avant leur installation dans le câble) sont semblables ou identiques à celles spécifiées dans les Recommandations UIT-T G.652, G.653, G.654, G.655 et G.656. Les types de fibre sont choisis de manière à optimiser le coût et la performance de l'ensemble du système.

Les caractéristiques de transmission des fibres installées dans un tronçon de câble élémentaire doivent être comprises dans une certaine plage de variation par rapport aux caractéristiques des fibres avant câblage; en particulier, le câble, les raccords de câble et les fibres doivent être tels qu'une courbure ou une microcourbure de fibre entraînent une augmentation négligeable de l'affaiblissement. Il faut tenir compte de cela pour la détermination du rayon de courbure minimal des fibres dans le câble et dans les équipements (raccords de câbles optiques, terminaisons, répéteurs, etc.).

L'affaiblissement le long de la fibre, la dispersion chromatique et la dispersion PMD doivent rester stables dans certaines limites pendant la durée de vie nominale du système; en particulier le câble doit être tel que l'infiltration d'hydrogène depuis l'extérieur et la génération d'hydrogène à l'intérieur du câble soient réduites aux niveaux minimaux acceptables, même après une rupture de câble à la profondeur d'utilisation; il faut également tenir compte de la sensibilité de la fibre optique aux rayons gamma.

Les principaux paramètres qui caractérisent une fibre optique sont les suivants:

- le coefficient d'affaiblissement pour toutes les longueurs d'onde de fonctionnement, exprimé en dB/km;
- le coefficient de dispersion chromatique pour toutes les longueurs d'onde de fonctionnement, exprimé en ps/nm.km;
- la longueur d'onde de dispersion nulle λ_0 , exprimée en nm;
- la pente de dispersion autour des longueurs d'onde de fonctionnement, exprimée en ps/nm².km;
- l'indice de réfraction non linéaire n_2 , exprimé en m²/W;
- la section efficace A_{eff} , exprimée en μm^2 ;
- le coefficient de non-linéarité n_2/A_{eff} , exprimé en W⁻¹;
- la dispersion moyenne des modes de polarisation de l'ensemble, exprimée en ps/(km)^{1/2}.

Compte tenu de ces paramètres, les concepteurs de systèmes sous-marins peuvent distinguer plusieurs types de fibre optique, dont:

- les fibres monomodes à dispersion non décalée (NDSF) définies dans la Rec. UIT-T G.652;
- les fibres monomodes à dispersion décalée (DSF) définies dans la Rec. UIT-T G.653;
- les fibres monomodes à longueur d'onde de coupure décalée (CSF) définies dans la Rec. UIT-T G.654;

- les fibres monomodes à dispersion décalée non nulle (NZDSF) définies dans les Recommandation UIT-T G.655 et G.656;
- les fibres monomodes à compensation de la dispersion (DCF);
- les fibres à pente de dispersion négative;
- les fibres à section efficace très grande.

Suivant les spécifications du système (débit et codage, nombre de longueurs d'onde, distance entre deux amplificateurs, puissance de sortie des amplificateurs, longueur de la liaison, etc.), on peut utiliser diverses combinaisons de ces types de fibre pour garantir la performance du système. On parle alors de gestion de la dispersion.

5.2.2.1 Affaiblissement le long des fibres

L'affaiblissement le long d'une fibre optique est caractérisé par le coefficient d'affaiblissement exprimé en dB/km (valeur logarithmique) ou en km^{-1} (valeur linéaire).

5.2.2.2 Non-linéarité des fibres

Il faut tenir compte des effets non linéaires lors de la conception de liaisons optiques à grande distance avec des amplificateurs OFA à puissance de sortie élevée. Ces effets sont cumulatifs le long de la liaison optique et sont susceptibles de dégrader considérablement la propagation. Dans les systèmes SWS, l'effet prédominant de la non-linéarité est généralement une automodulation de phase du signal proportionnelle au coefficient de non-linéarité (rapport n_2/A_{eff}) multiplié par le carré de son amplitude normalisée. En présence de dispersion chromatique, cette non-linéarité provoque un étalement de l'impulsion dans le domaine temporel et, par conséquent, une dégradation de la performance du système. Dans les systèmes WDMS ou DWDMS, l'effet prédominant est normalement la modulation de phases croisée, due à la présence de longueurs d'onde adjacentes. Cette non-linéarité entraîne une dégradation de la performance.

5.2.2.3 Dispersion des modes de polarisation (PMD)

De faibles écarts par rapport à la symétrie cylindrique parfaite du coeur de la fibre conduisent à une biréfringence en raison d'indices de mode différents associés aux composantes du mode fondamental à polarisation orthogonale. La dispersion PMD entraîne un étalement de l'impulsion et doit être limitée à une valeur maximale. Cette valeur, qui peut être exprimée pour toute la liaison, est généralement fixée comme valant une certaine proportion de l'intervalle de temps d'un bit. La dispersion PMD est exprimée en $\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$.

5.2.2.4 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique correspond à la variation des vitesses de groupe en fonction de la longueur d'onde de sorte que toutes les composantes spectrales d'un signal optique se propageront à des vitesses différentes. Il en résulte un étalement de l'impulsion, qui peut entraîner une importante dégradation. Suivant le système et en particulier suivant le nombre de longueurs d'onde (systèmes WDM), il peut être intéressant de gérer cette dispersion de façon tout à fait différente pour limiter l'étalement de l'impulsion et d'autres effets de propagation. Généralement, cette gestion conduit à une carte de la dispersion indiquant la façon dont la dispersion est gérée tout au long de la liaison.

5.2.3 Paramètres mécaniques des fibres

Les caractéristiques mécaniques d'une fibre dépendent largement de l'application d'un test d'épreuve à l'ensemble de la fibre. Ce test est caractérisé par la charge appliquée à la fibre ou l'élongation de la fibre et la durée d'application. Le niveau du test doit être déterminé en fonction de la structure du câble. Les épissures de la fibre doivent faire l'objet d'un test d'épreuve similaire. Il est recommandé que les tests d'épreuve soient aussi brefs que possible.

Il faut tenir compte des contraintes mécaniques de la fibre et des épissures pour déterminer le rayon de courbure minimal de la fibre dans le câble et dans les équipements (répéteurs, unités de dérivation, boîtiers de raccordement des câbles ou terminaisons des câbles).

5.2.4 Paramètres mécaniques du câble

Le câble, avec les boîtiers de raccordement, les coupleurs et les transitions associés, doit être manipulé avec précaution par les navires câbliers au cours des opérations de pose et de réparation; il doit résister à plusieurs passages sur la proue d'un navire câblier.

Le câble doit être réparable et le temps mis pour faire un raccord de câbles à bord pendant une réparation dans de bonnes conditions de travail doit être raisonnablement court.

Si le câble est accroché par un grappin, une ancre ou un outil de pêche, il se rompt généralement pour une charge égale à une fraction (fonction du type de câble et des caractéristiques du grappin) de la charge de rupture lorsqu'il est tout droit; il existe donc un risque de réduction de la durée de vie du câble et des fibres et de réduction de la fiabilité au voisinage du point de rupture, en raison notamment de la contrainte appliquée aux fibres ou de la pénétration d'eau; la partie endommagée du câble doit être remplacée; sa longueur doit rester dans l'intervalle spécifié.

Plusieurs paramètres sont définis dans la Rec. UIT-T G.972 pour caractériser les propriétés mécaniques du câble et l'aptitude du câble à être installé, relevé et réparé; ils doivent servir de guide pour la manipulation du câble:

- charge de rupture du câble, mesurée lors du test de qualification;
- charge du câble provoquant la rupture de fibres, mesurée lors du test de qualification;
- résistance transitoire nominale à la traction, qui pourrait être accidentellement rencontrée, notamment lors des opérations de relevage;
- résistance nominale de fonctionnement à la traction, qui pourrait être rencontrée lors des réparations;
- résistance permanente nominale à la traction, qui caractérise l'état du câble après la pose;
- rayon minimal de courbure du câble, qui sert d'indication lors de la manipulation du câble.

5.2.5 Paramètres électriques du câble

Le câble doit permettre la téléalimentation électrique des répéteurs ou des unités de dérivation et comporter un conducteur à faible résistance linéaire ainsi qu'un isolant contre les hautes tensions.

5.2.6 Longueur de fabrication du câble sous-marin

La longueur de fabrication du câble sous-marin doit être aussi grande que possible. Elle doit généralement être supérieure à 25 km.

5.2.7 Paramètres physiques du câble sous-marin

Les paramètres physiques du câble sous-marin sont le diamètre extérieur, le poids à l'air libre et le poids dans l'eau.

5.2.8 Câble de réparation

Lorsque le câble sous-marin est sectionné ou endommagé, on utilise un câble de réparation dont les caractéristiques optiques, électroniques et mécaniques doivent être conformes à celles du câble à réparer.

5.3 Paramètres de répéteur sous-marin

Les paramètres de répéteur sous-marin sont indiqués dans les Recommandations UIT-T G.974 et G.977.

5.3.1 Types de répéteur

Il existe trois types de répéteur:

- les répéteurs optiques avec régénération électrique 3R;
- les répéteurs optiques avec amplification EDF;
- les répéteurs optiques avec amplification Raman.

NOTE – Dans d'autres paragraphes du présent Supplément, on emploie le terme amplificateur OFA, qui regroupe les amplificateurs EDF et les amplificateurs Raman.

5.3.2 Paramètres de répéteur optique avec régénération électrique 3R

5.3.2.1 Paramètres optiques

Le signal à l'interface optique doit être conforme au bilan de puissance optique du tronçon. Au moment de l'assemblage du système, certaines limites indiquées ci-dessous doivent, en particulier, être respectées:

- puissance moyenne minimale à l'entrée du répéteur (dBm): puissance optique moyenne du signal optique de ligne qui doit, au moment de l'assemblage de la liaison, être présente à l'interface optique d'entrée du répéteur afin que le bilan de puissance optique du tronçon de câble offre la marge garantie;
- puissance moyenne minimale à la sortie du répéteur (dBm): puissance optique moyenne du signal optique de ligne qui doit, au moment de l'assemblage de la liaison, être présente à l'interface optique de sortie du répéteur afin que le bilan de puissance optique du tronçon de câble offre la marge garantie.

Pour les systèmes intégrés, des paramètres similaires doivent être spécifiés, dans le cadre de la spécification d'intégration, à l'interface optique de la ligne d'intégration.

5.3.2.2 Paramètres de gigue

Les caractéristiques de gigue du répéteur (tolérance de gigue, gigue maximale de sortie, caractéristiques de transfert de gigue) à l'interface optique doivent être compatibles avec la spécification du système.

Pour les systèmes intégrés, les mêmes paramètres, la densité spectrale de la gigue à la sortie du répéteur et la gigue de réglage doivent être spécifiés, dans le cadre de la spécification d'intégration, à l'interface optique d'intégration.

5.3.3 Paramètres de répéteur optique avec amplification EDF

5.3.3.1 Paramètres optiques

La Rec. UIT-T G.661 définit les paramètres génériques relatifs aux amplificateurs EDF et donne des méthodes de mesure de ces paramètres. Lorsque des amplificateurs EDF sont présents dans des répéteurs, il est nécessaire de prendre en compte les paramètres suivants:

- gain pour les petits signaux (SSG, *small signal gain*);
- gain nominal (NG, *nominal gain*);
- facteur de bruit (NF, *noise figure*);
- puissance nominale de sortie du signal (NSOP, *nominal signal output power*);
- puissance nominale d'entrée du signal (NSIP, *nominal signal input power*);
- facteur de compression (CF, *compression factor*);
- puissance moyenne minimale à l'entrée du répéteur (dBm);
- puissance moyenne minimale à la sortie du répéteur (dBm);
- caractéristiques de gigue;

- caractéristiques du décalage de phase.

En outre et en particulier dans le cas d'un système WDMS, il est également nécessaire de prendre en compte le paramètre suivant:

- platitude du gain (GF, *gain flatness*).

5.3.3.2 Effets de polarisation

Chacun des composants optiques d'un amplificateur EDF peut être choisi de telle sorte que sa performance soit raisonnablement insensible à des effets de polarisation tels que l'affaiblissement PDL ou la dispersion PMD, suivant les spécifications du système. D'autres effets de polarisation tels que la variation de gain PDG ou la saturation PHB sont des effets intrinsèques qui ne peuvent être évités ou limités que par l'utilisation de fonctionnalités externes (par exemple l'embrouillage de polarisation du signal dans l'émetteur de l'équipement TTE).

5.3.4 Paramètres de répéteur optique avec amplification Raman

A étudier.

5.3.5 Paramètres mécaniques du répéteur

5.3.5.1 Enceinte du répéteur

L'enceinte du répéteur doit être conçue de manière à permettre l'exploitation, la pose, le relevage et la nouvelle pose de répéteurs optiques par grands fonds sans dégradation des caractéristiques mécaniques, électriques et optiques.

Les considérations techniques de conception de l'enceinte du répéteur sont les suivantes:

- le niveau de performance, la fiabilité et la facilité de fabrication doivent être pris en compte pour déterminer la conception de la structure de base et les attributions de composants;
- une enceinte de répéteur avec une structure efficace de dispersion de la chaleur et d'absorption des chocs est nécessaire;
- des traversées très fiables, résistantes à la pression, imperméables aux gaz et à faible affaiblissement sont requises pour que les fibres et la ligne d'alimentation électrique puissent pénétrer dans l'enceinte du répéteur;
- un coupleur de câble très fiable et à faible affaiblissement, résistant à la pression et à la traction, est nécessaire;
- une structure de raccord entre le câble et le répéteur est nécessaire.

5.3.5.2 Unité interne

A l'intérieur de l'enceinte du répéteur, l'unité interne peut contenir plusieurs modules d'alimentation et couples d'amplificateurs OFA pour amplifier dans les deux sens le signal optique provenant d'un ou de plusieurs couples de fibres.

5.3.5.3 Protection contre la corrosion

L'enceinte externe du répéteur OSR doit être conçue de manière à ne pas subir de corrosion due à l'eau de mer.

5.3.5.4 Résistance à la pression de l'eau

Le répéteur OSR doit être conçu pour supporter de fortes pressions en eau profonde.

5.3.5.5 Isolement contre les hautes tensions

Il est nécessaire de prévoir un isolement contre les hautes tensions entre l'enceinte du répéteur et l'unité interne afin de garantir un fonctionnement correct du répéteur.

5.3.5.6 Régulation thermique

La chaleur générée par les composants électroniques à l'intérieur du répéteur OSR peut être suffisamment dissipée par conduction thermique avec l'enceinte du répéteur.

5.3.5.7 Etanchéité de l'enceinte du répéteur

Le répéteur doit être doté d'une protection contre les infiltrations d'eau et de gaz, à la fois directement depuis la mer environnante et depuis le câble axial en cas de fuites résultant d'une rupture du câble près du répéteur.

5.3.5.8 Contrôle de l'atmosphère ambiante

Pour assurer la fiabilité et le bon fonctionnement des composants, il peut être nécessaire que l'atmosphère interne soit contrôlée en ce qui concerne l'humidité relative ou tout gaz susceptible d'être généré à l'intérieur du répéteur.

5.3.6 Paramètres électriques du répéteur

5.3.6.1 Modules de puissance

Les répéteurs OSR sont alimentés en courant constant par la station d'extrémité du terminal via le conducteur électrique du câble. Des modules de puissance alimentent les couples d'amplificateurs OFA pour assurer l'amplification optique. Les répéteurs OSR peuvent accepter les deux polarités électriques.

5.3.6.2 Protection contre les surtensions

Les répéteurs OSR doivent être protégés contre les surtensions pouvant résulter d'une interruption soudaine de l'alimentation haute tension du câble (rupture du câble ou court-circuit dans l'équipement de téléalimentation)

5.4 Paramètres de raccord de câbles

Un raccord de câbles permet de raccorder deux segments de câble et d'assurer ainsi la continuité optique, électrique et mécanique entre des tronçons de câble contigus. Le raccord de câbles permet:

- d'épissurer des sous-tronçons de câble pour former des tronçons;
- de raccorder un câble à des répéteurs au cours de l'assemblage du système;
- d'assurer la terminaison des extrémités de câble en vue de leur transformation ultérieure en raccords de câble à câble lors de l'installation du système;
- de raccorder un câble sous-marin à un câble terrestre au niveau de l'épissure littorale.

Un raccord de câbles sous-marins est conçu pour assurer une connexion fiable entre des câbles ou entre un répéteur et un câble malgré des conditions difficiles liées au chargement du navire, au déploiement, à la réparation et au redéploiement des câbles à des profondeurs allant jusqu'à 7500 m. Il existe des modèles appropriés de raccords de câbles permettant de satisfaire aux diverses spécifications des câbles sous-marins blindés.

5.4.1 Paramètres optiques

5.4.1.1 Affaiblissement d'épissure

L'affaiblissement d'épissure est un affaiblissement supplémentaire dû à l'épissurage des fibres et aux surlongueurs de fibres après le raccord d'un câble. Il est tout à fait souhaitable de rendre minimaux les affaiblissements d'épissure. Les méthodes de test à appliquer devraient être celles de la Rec. UIT-T G.650.1 lorsque cela est possible.

5.4.2 Paramètres mécaniques

5.4.2.1 Résistance

Les éléments porteurs du câble se terminent par des culots enfichables, dont la résistance à la rupture est supérieure à 90% de la résistance minimale à la rupture requise pour le câble.

5.4.2.2 Résistance à la traction

La résistance à la traction est définie dans la Rec. UIT-T G.972. D'autres définitions possibles feront l'objet d'un complément d'étude.

5.4.2.3 Protection contre la corrosion

Le raccord doit être protégé pour empêcher sa corrosion par l'eau de mer.

5.4.2.4 Résistance à la pression de l'eau

Le raccord doit pouvoir supporter de fortes pressions.

5.4.2.5 Etanchéité du raccord

Le raccord doit être doté d'une protection contre les infiltrations d'eau et de gaz depuis la mer environnante.

5.4.2.6 Caractéristiques de courbure

Des gaines de limitation de la courbure assurent une transition graduelle de la rigidité de courbure le long du raccord. Elles doivent pouvoir passer à travers les instruments de manipulation des câbles utilisés à bord des navires câbliers.

5.4.3 Paramètres électriques

La connexion assure la terminaison du conducteur électrique du câble et assure une continuité électrique le long du raccord.

5.4.3.1 Isolement contre les hautes tensions

Il est nécessaire de prévoir un isolement contre les hautes tensions entre le conducteur d'alimentation du câble et la mer afin de garantir un fonctionnement correct du raccord.

5.4.4 Paramètres physiques

Les paramètres physiques du raccord de câbles sont la longueur, le diamètre extérieur, le poids à l'air libre et le poids dans l'eau.

5.5 Paramètres de récepteur

Ces paramètres, définis au point de référence du récepteur R ou MPI-R, sont précisés dans les Recommandations UIT-T G.957, G.691, G.692 et G.959.1.

5.5.1 Sensibilité

Les sensibilités des récepteurs pour les systèmes monocanaux SDH fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s sont définies dans les Recommandations UIT-T G.957 et G.691. Les sensibilités des récepteurs pour les interfaces IrDI SDH et OTN sont définies dans la Rec. UIT-T G.959.1.

Les sensibilités des récepteurs correspondent à des valeurs en fin de vie, dans le cas le plus défavorable, compte tenu des marges de vieillissement et de température ainsi que des dégradations liées au diagramme en œil et au taux d'extinction dans le cas le plus défavorable, dégradations qui résultent des imperfections de l'émetteur indiquées par la spécification de l'interface concernée.

Toutefois, les dégradations liées aux effets sur le trajet ne sont pas spécifiées dans la valeur de base de la sensibilité; elles sont spécifiées à part.

5.5.2 Saturation

La définition et les valeurs de saturation du récepteur pour des systèmes monocanaux SDH fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s figurent dans les Recommandations UIT-T G.957 et G.691. La définition et les valeurs de saturation du récepteur pour des interfaces IrDI SDH et OTN fonctionnant jusqu'à 40 Gbit/s figurent dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.3 Minimum de puissance moyenne d'entrée de canal

Le minimum de puissance moyenne d'entrée de canal pour des interfaces IrDI à multiplexage optique fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s dans le cas de récepteurs multicanaux est défini dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.4 Maximum de puissance moyenne d'entrée de canal

Le maximum de puissance moyenne d'entrée de canal pour des interfaces IrDI à multiplexage optique fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s dans le cas de récepteurs multicanaux est défini dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.5 Dégradation liée au trajet optique

La définition et les valeurs de dégradation liée au trajet optique pour des systèmes monocanaux SDH fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s figurent dans les Recommandations UIT-T G.957 et G.691. La définition et les valeurs de la dégradation liée au trajet optique pour des récepteurs IrDI OTN monocanaux ou multicanaux fonctionnant jusqu'à 10 Gbit/s figurent dans la Rec. UIT-T G.959.1. La définition et les valeurs de la dégradation liée au trajet optique pour des récepteurs IrDI SDH et OTN monocanaux fonctionnant jusqu'à 40 Gbit/s figurent également dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.6 Différence maximale de puissance d'entrée entre canaux

Ce paramètre, qui indique la différence maximale entre canaux pour un signal à multiplexage optique, est défini dans la Rec. UIT-T G.959.1.

5.5.7 Rapport OSNR minimal à l'entrée du récepteur

Cette valeur correspond à la valeur minimale du rapport signal optique sur bruit optique, qui est nécessaire pour obtenir le taux BER escompté en un point de référence du récepteur pour un niveau de puissance donné dans les systèmes (à amplification de ligne) dont le rapport OSNR est limité. Il convient de noter qu'il s'agit d'un paramètre de conception.

6 Topologie de réseau optique

Pour les systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques, les types de topologie de réseau optique sont les suivants: point à point, en étoile, en étoile avec dérivation, de jonction et dérivation, en guirlande, en anneau et en anneau avec dérivation. Le présent paragraphe repose sur les informations données dans [1].

6.1 Topologie point à point

Cette configuration (Figure 6-1) correspond à une liaison sous-marine directe entre deux équipements terminaux de transmission (TTE, *terminal transmission equipment*) situés dans deux stations terminales (TS, *terminal station*) différentes.



Figure 6-1 – Topologie point à point

6.2 Topologie en étoile

Cette configuration (Figure 6-2) comprend une station terminale (TS) principale en liaison avec plusieurs autres stations terminales via des câbles distincts. Dans cette configuration en étoile de base, le trafic est directement transmis des équipements TTE de la station terminale principale vers les équipements TTE des autres stations terminales, et ce de façon indépendante. Le réseau en étoile exige donc un câble distinct pour chaque station terminale, ce qui conduit à une configuration relativement coûteuse, en particulier lorsque les stations terminales sont géographiquement éloignées.

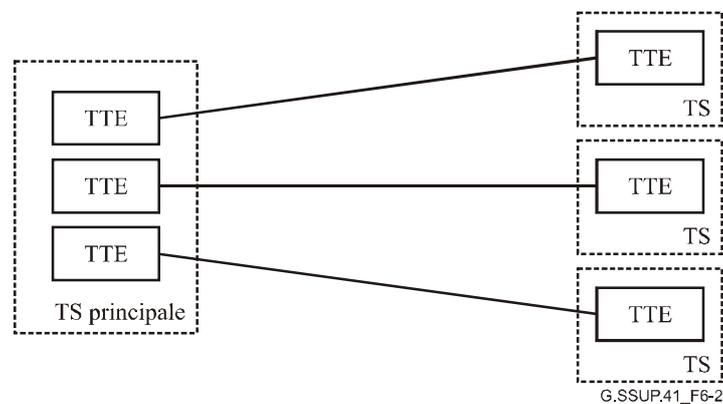


Figure 6-2 – Topologie en étoile

6.3 Topologie en étoile avec dérivation

Cette configuration (Figure 6-3) offre la même capacité que la configuration en étoile de base et en diffère uniquement par le fait que le partage du trafic est effectué sous l'eau, ce qui minimise les coûts liés à l'utilisation de câbles distincts entre des stations terminales éloignées. Le partage du trafic est réalisé grâce à une unité de dérivation (BU, *branching unit*) qui assure l'interconnexion entre les fibres d'un seul câble de jonction et plusieurs fibres contenues dans plusieurs branches de dérivation.

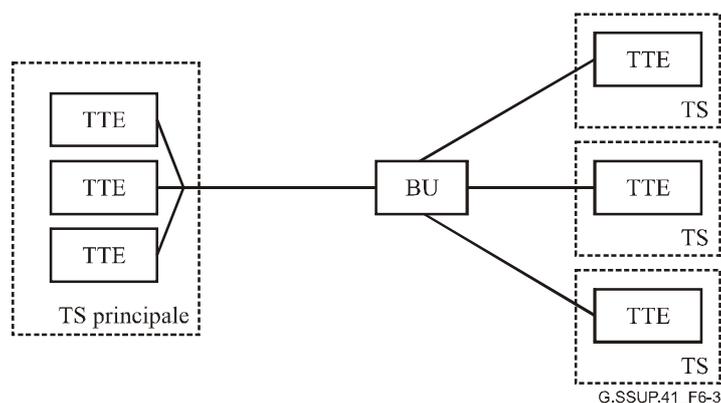


Figure 6-3 – Topologie en étoile avec dérivation

6.4 Topologie de jonction et dérivation

Cette configuration (Figure 6-4) permet de relier plusieurs stations terminales (comprenant des équipements TTE) à un seul câble de jonction au moyen d'unités de dérivation permettant d'extraire une partie du trafic vers chacune des stations terminales situées sur les branches de dérivation.

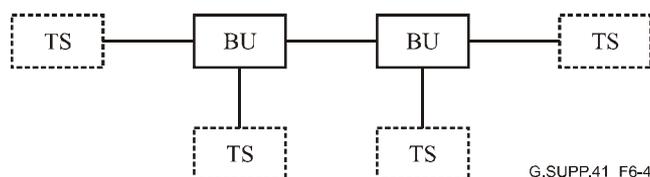


Figure 6-4 – Topologie de jonction et dérivation

6.5 Topologie en guirlande

Une configuration en guirlande (Figure 6-5) comprend essentiellement une série de boucles reliant les principaux points terrestres côtiers. Il s'agit souvent – mais pas toujours – d'un système sans répéteur. En prévision de la croissance future des besoins en capacité, ces applications sans répéteur font généralement intervenir des câbles contenant un nombre de fibres optiques plus grand que celui requis pour le service initial. Par conséquent, lorsqu'une capacité supplémentaire est nécessaire, les seuls nouveaux investissements requis concernent les équipements terminaux. L'architecture d'un réseau en guirlande reflète souvent celle d'une installation terrestre type. Elle peut souvent servir de complément à un système terrestre existant. Cette configuration est de plus en plus fréquemment utilisée comme solution de remplacement à un système terrestre, en particulier lorsque la topographie continentale rend difficile l'installation et la maintenance.

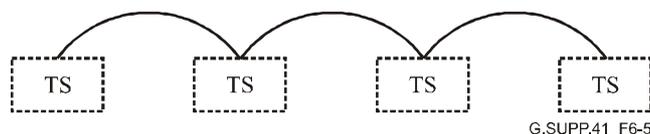


Figure 6-5 – Topologie en guirlande

6.6 Topologie en anneau

La configuration en anneau (Figure 6-6) correspond essentiellement à un ensemble de câbles reliés point à point présentant deux fois la capacité de transmission requise. En cas de défaillance dans l'anneau (sectionnement d'un câble par exemple), le trafic est acheminé sur le réseau dans le sens

opposé à celui du segment défectueux, vers le point de destination d'origine. Les équipements de transmission côtiers assurent la détection automatique des défaillances et la commande de basculement pour tout l'anneau sans perte d'appel.

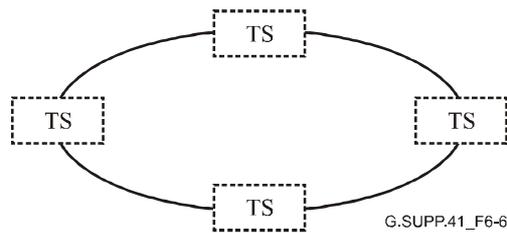


Figure 6-6 – Topologie en anneau

6.7 Topologie en anneau avec dérivation

Cette configuration (Figure 6-7) étend la capacité de base de l'anneau avec un bon rapport qualité/coût via l'adjonction d'une unité de dérivation. Elle préserve la capacité d'autorétablissement de l'anneau. On peut considérer qu'elle assure la configuration de jonction et dérivation à la configuration en anneau, en préservant la plupart des avantages de chacune. Cette configuration peut être réalisée de diverses façons, y compris via le raccordement à d'autres réseaux. Grâce à une planification appropriée, un réseau peut être installé dans une configuration de jonction et dérivation avant qu'une mise à niveau ultérieure ne le transforme en un anneau avec dérivation.

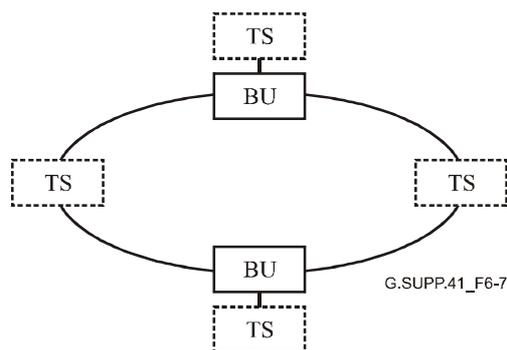


Figure 6-7 – Topologie en anneau avec dérivation

7 Considérations relatives à la conception du système

7.1 Bilan de puissance optique

Le bilan de puissance optique, tel que le définit la Rec. UIT-T G.976, est un bilan contractuel garantissant que les caractéristiques d'erreur du système seraient meilleures que les caractéristiques d'erreur minimales requises définies dans les Recommandations UIT-T G.826 et/ou G.828.

Dans le bilan de puissance optique, on s'intéresse d'abord à un simple facteur de qualité linéaire (le facteur Q) qui prend uniquement en compte la dégradation due au bruit d'émission ASE des amplificateurs (Q moyen). On attribue ensuite les dégradations pour tous les types de perturbations (dues à la transmission, aux équipements terminaux, etc.). Les dégradations sont évaluées en associant des analyses théoriques, des simulations informatiques et des mesures directes effectuées sur des bancs de test expérimentaux.

Pour chaque tronçon de ligne numérique sous-marine, il est recommandé d'établir deux bilans de puissance distincts, l'un en début de vie (BOL, *beginning of life*) et l'autre en fin de vie (EOL, *end of life*):

- le bilan de puissance BOL donne le niveau de performance le plus défavorable du tronçon de ligne numérique, qui sera mesuré au cours de la mise en service;
- le bilan de puissance EOL donne une estimation du niveau de performance le plus défavorable du tronçon de ligne numérique en fin de vie du système. Il comprend des marges pour le vieillissement, les défaillances internes et les réparations.

La marge EOL est la différence entre le facteur Q le plus défavorable évalué en fin de vie du système et la valeur minimale du facteur Q nécessaire pour satisfaire au niveau requis de qualité de transmission. En outre, le bilan de puissance optique devrait clairement indiquer la valeur minimale du facteur Q requise pour atteindre les caractéristiques d'erreur spécifiées pour le système. Il devrait en outre mentionner la valeur d'amélioration de la marge rendue possible par l'utilisation d'une correction FEC (le cas échéant). (Voir Figure 7-1.)

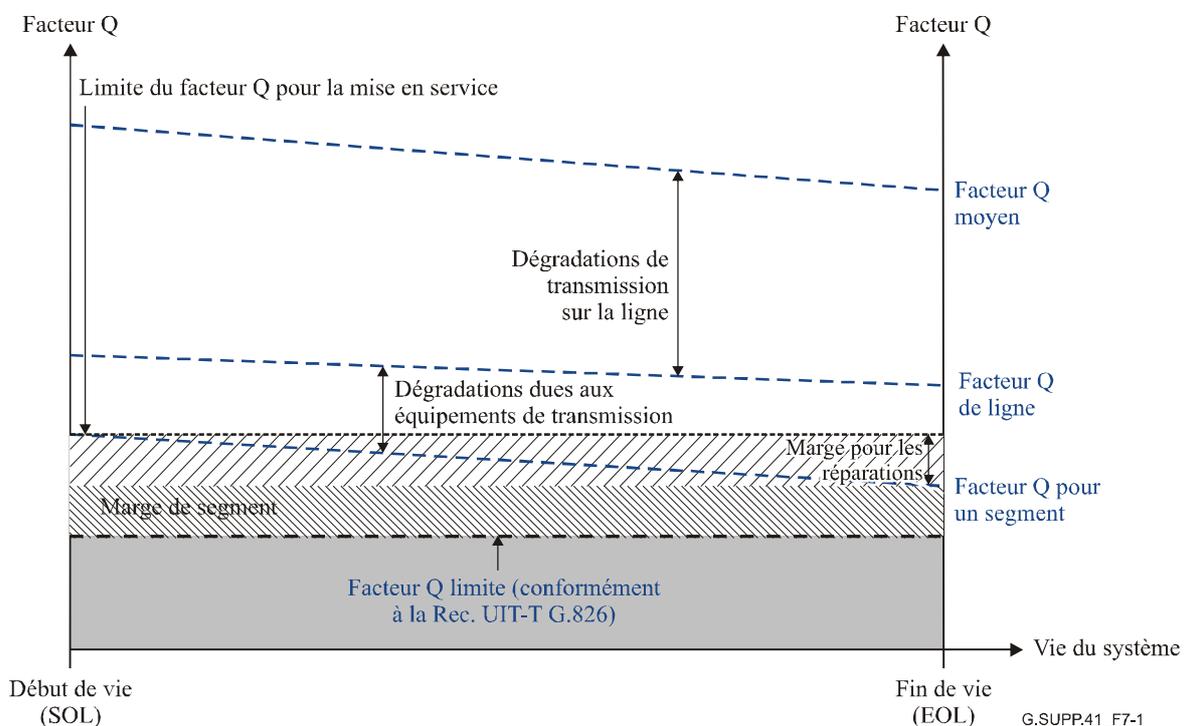


Figure 7-1 – Exemple de structure de bilan de puissance

7.1.1 Facteur de qualité (facteur Q)

Le tableau de bilan de puissance optique d'un tronçon de ligne numérique sous-marin fait intervenir les divers facteurs Q décrits dans l'Annexe A/G.977, exprimés en décibels. Le texte ci-après, fondé sur le Supplément 39 aux Recommandations UIT-T de la série G, est reproduit ici dans un souci de commodité pour le lecteur.

Le facteur Q est le rapport signal sur bruit, exprimé en volt ou en ampère, au niveau du circuit de décision. Il s'écrit généralement comme suit:

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)} \quad (7-1)$$

où $\mu_{1,0}$ est la valeur moyenne des tensions ou des courants au niveau des marques/espaces et $\sigma_{1,0}$ est l'écart type. Par exemple, un taux BER de 10^{-12} correspond à $Q \approx 7,03$.

Puisque les techniques d'évaluation du facteur Q permettent d'effectuer des mesures dans les régions supérieure et inférieure de "l'œil" reçu, afin d'en déduire la qualité du signal au seuil de décision optimal, le facteur Q peut être considéré comme un indicateur qualitatif seulement du taux BER réel.

La relation mathématique donnant le taux BER (en cas de fonctionnement sans correction FEC), lorsque le seuil est fixé à sa valeur optimale, est la suivante:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (7-2)$$

où:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta \quad (7-3)$$

Une approximation couramment employée de cette fonction est donnée par la formule suivante:

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (7-4)$$

pour $Q > 3$ (hypothèse d'une distribution gaussienne).

Une autre expression qui donne des valeurs précises pour toutes les valeurs du facteur Q [2] est la suivante:

$$BER \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} \left(\left(1 - \frac{1}{\pi}\right)Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)} \quad (7-5)$$

Un diagramme représentant ces deux approximations pour les valeurs du facteur Q inférieures ou égales à 5 est donné sur la Figure 7-2.

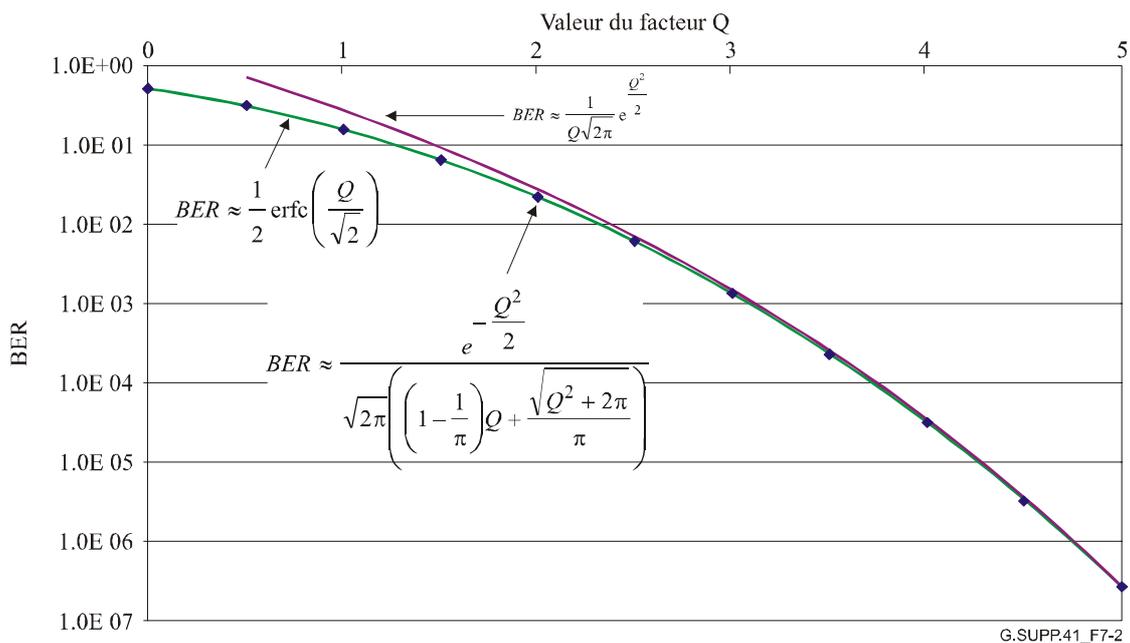


Figure 7-2 – Approximations du taux BER en fonction du facteur Q

Le facteur Q est exprimé en décibels et non en valeur linéaire:

$$Q(\text{décibels}) = 20 \times \log_{10} Q(\text{linéaire}) \quad (7-6)$$

Les performances d'un tronçon de ligne numérique sous-marin devraient être caractérisées par la mesure de son facteur Q ou par une mesure directe du taux BER devant satisfaire aux limites contractuelles du facteur Q lors de la mise en service, indiquées dans le bilan de puissance optique.

On notera que les équations 7-2 à 7-5 ne sont valables que dans le cas d'une distribution de bruit gaussienne. Cette approximation est acceptable pour les formats de modulation fondés sur la technique de modulation OOK largement utilisée dans les systèmes sous-marins. Les formats de modulation fondés sur la modulation de phase (par exemple la modulation DPSK, qui a été réétudiée ces dernières années pour des applications sous-marines) devront faire l'objet d'un complément d'étude.

7.1.2 Paramètres pertinents pour le bilan de puissance optique

Conformément à la Rec. UIT-T G.977, on préconise de tenir compte, dans le bilan de puissance, au moins des dégradations suivantes:

- dégradations dues à l'accumulation de bruit optique (voir le § 7.1.3) → calcul du facteur Q moyen;
- dégradations de propagation (voir le § 7.1.4) → calcul du facteur Q de ligne:
 - dégradations de propagation dues aux effets combinés de la dispersion chromatique et des effets non linéaires (automodulation de phase, modulation de phase croisée, effets du mélange de quatre ondes entre les canaux optiques de ligne, diffusion Raman stimulée, etc.) (voir le § 7.1.4.1);
 - dégradations de propagation dues aux effets de polarisation optique (tels que la dispersion des modes de polarisation (PMD), l'affaiblissement dû à la polarisation (PDL) et la variation du gain en fonction de la polarisation (PDG)). Etant donné que ces dégradations fluctuent dans le temps, il faut tenir compte séparément des variations de performance dans le temps (voir le § 7.1.4.2);
 - dégradations dues à la non-platitude de la courbe de gain cumulatif sur la totalité du segment (voir le § 7.1.4.3);
 - dégradations liées à la préaccentuation optique non optimale (voir le § 7.1.4.4);
 - dégradations dues à un mauvais réglage de la ou des longueurs d'onde du tronçon de ligne numérique sous-marin (voir le § 7.1.4.5);
 - dégradations dues aux fonctions de surveillance (voir le § 7.1.4.6);
 - dégradations dues à la fabrication et aux conditions environnementales (voir le § 7.1.4.7);
- dégradations liées aux caractéristiques non idéales de l'équipement de transmission terminal (facteur Q en configuration dos à dos pour l'équipement de transmission terminal) (voir le § 7.1.5) → Calcul du facteur Q pour le segment;
- en ce qui concerne spécifiquement le bilan de puissance EOL, il convient d'ajouter des marges supplémentaires (voir le § 7.1.6) → marge de segment:
 - marges dues à certaines opérations de réparations (épissures de réparation, affaiblissement supplémentaire et modification de la carte de dispersion dus aux surlongueurs de câble après réparation) (voir le § 7.1.6.1);
 - marges dues au vieillissement des câbles et des composants (voir le § 7.1.6.2);
 - marges dues aux pannes prévisibles de certains composants (pannes de lasers de pompage par exemple) (voir le § 7.1.6.3).

La modulation de phases croisées, le mélange de quatre ondes entre les canaux optiques, la diffusion Raman stimulée, la non-platitude de la courbe de gain cumulatif et les puissances relatives non optimales des canaux optiques causent des dégradations qui s'appliquent tout spécialement aux systèmes WDM et DWDM étant donné qu'elles se rapportent à la propagation simultanée de plusieurs signaux optiques sur la même fibre.

7.1.3 Accumulation de bruit optique

7.1.3.1 Calcul du rapport signal optique sur bruit optique

Dans un système comprenant une chaîne d'amplificateurs optiques en cascade, le bruit d'émission ASE résulte de l'accumulation des contributions des divers amplificateurs optiques. Le rapport signal optique sur bruit optique (OSNR) décroît après chaque passage dans un amplificateur optique. Ce rapport est donc un paramètre utile pour surveiller et caractériser la performance des amplificateurs optiques. La Figure 7-3 illustre un système multicanal utilisé comme référence (N tronçons, N – 1 amplificateurs de ligne).

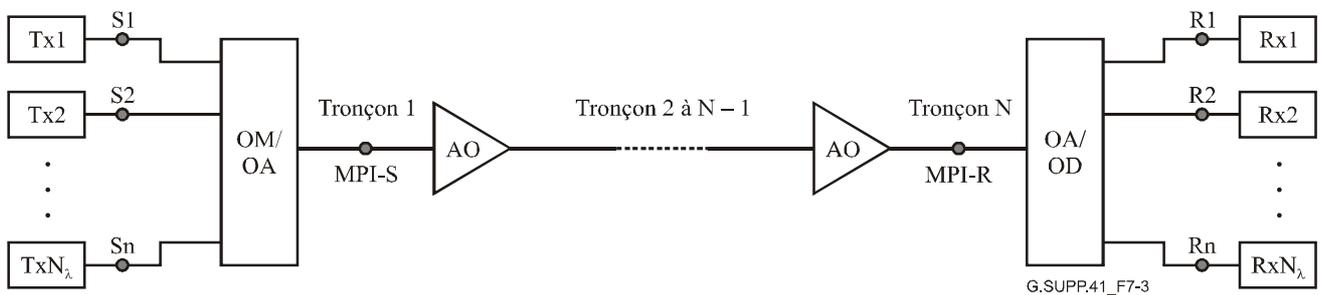


Figure 7-3 – Représentation des interfaces d'un système de ligne optique (système multicanal à N tronçons)

Il existe deux façons différentes de calculer le rapport OSNR:

- i) accumulation de bruit simple à puissance du signal constante;
- ii) accumulation de bruit à puissance de sortie totale constante.

Même si l'hypothèse la plus réaliste est celle du point ii), la formule obtenue avec l'hypothèse i) est une bonne approximation du cas ii) et elle est largement utilisée.

Le point i) sera développé dans le présent paragraphe, ce qui signifie que la puissance du signal reste inchangée.

En ce qui concerne le système représenté sur la Figure 7-3, on applique les hypothèses principales suivantes:

- tous les amplificateurs optiques figurant dans la chaîne ont le même facteur de bruit (NF);
- les affaiblissements sur tous les tronçons sont identiques;
- les puissances de sortie totales pour tous les amplificateurs en ligne sont identiques.

Dans ce cas, une expression approchée du rapport OSNR à l'entrée des récepteurs (point R_i sur la Figure 7-3, $i = 1, \dots, n$) est la suivante:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{\lambda} \cdot N_{amp} \cdot NF - \frac{1}{G} \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-7)$$

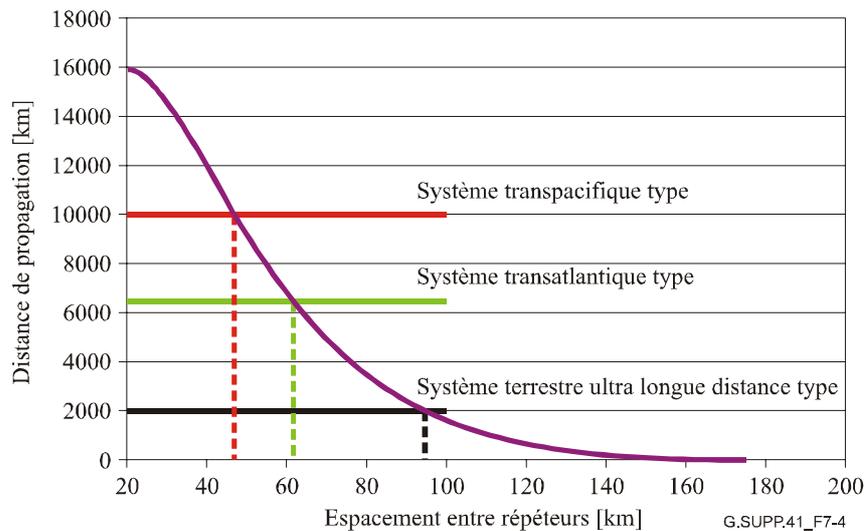
où P_{out} est la puissance totale en sortie de l'amplificateur exprimée en W, G est le gain de l'amplificateur (supposé être égal au total des affaiblissements de tronçon), NF est le facteur de bruit

de l'amplificateur optique, h est la constante de Planck exprimée en $J \times s$, ν est la fréquence optique exprimée en Hz, B_r est la largeur de bande optique de référence exprimée en Hz, N_λ est le nombre total de longueurs d'onde et N_{amp} est le nombre total d'amplificateurs. L'équation 7-7 traduit le fait que l'on accumule le bruit d'émission ASE provenant de l'ensemble des N_{amp} amplificateurs.

Si le gain des amplificateurs de ligne est très élevé (c'est-à-dire $G \gg 1$), l'équation 7-7 peut être simplifiée comme suit:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot N_{amp} \cdot NF \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-8)$$

où le gain G est égal à $e^{\alpha L}$, L étant la longueur d'un tronçon. Par conséquent, pour un rapport OSNR donné, la longueur totale réalisable est fonction de la longueur d'un tronçon. La Figure 7-4 donne des exemples de longueurs de tronçon types pour des systèmes sous-marins et terrestres usuels.



NOTE – Les paramètres utilisés sont les suivants: $OSNR = 16$ dB dans une largeur de bande de référence $B_r = 0,1$ nm, $NF = 4,7$ dB, $N_\lambda = 64$ canaux, $P_{out} = 14$ dBm et affaiblissement de fibre $\alpha = 0,21$ dB/km.

Figure 7-4 – Exemple d'espacement de répéteurs requis pour atteindre des distances de transmission sous-marines et terrestres types

Dans le cas d'un système sans répéteur ne contenant qu'un préamplificateur, l'équation 7-8 peut être modifiée comme suit:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_\lambda \cdot NF \cdot G_{pre-amplifier} \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-9)$$

où L est la longueur du câble en km et α son affaiblissement total en km^{-1} .

Dans le cas d'un système sans répéteur avec amplification distante et comportant un seul suramplificateur au niveau de l'émetteur, l'équation 7-7 peut être modifiée comme suit:

$$OSNR = \frac{P_{Trans} \cdot e^{-\alpha L}}{N_\lambda \cdot h\nu \cdot B_r \cdot \left(NF_1 + \frac{NF_2}{G_1} \right)} \quad (7-10)$$

où L est la longueur totale du câble en km, α son affaiblissement total en km^{-1} , P_{Trans} la puissance de sortie de l'émetteur (point MPI-S sur la Figure 7-3), NF_1 et NF_2 les facteurs de bruit de l'amplificateur distant et du suramplificateur, et G_1 le gain de l'amplificateur distant.

Le cas d'un système sous-marin sans répéteur avec amplification Raman doit faire l'objet d'un complément d'étude.

7.1.3.2 Calcul du facteur Q

Si l'on néglige le bruit thermique et le bruit de grenaille du récepteur et que l'on applique les hypothèses du § 7.1.1, le facteur Q linéaire théorique peut être évalué à l'aide de la relation suivante:

$$Q_{lin} = \frac{\frac{2M.OSNR.(1-ER)}{1+ER} \sqrt{\frac{B_r}{B_e}}}{\sqrt{1+\frac{4M.ER.OSNR}{1+ER}} + \sqrt{1+\frac{4M.OSNR}{1+ER}}} \quad (7-11)$$

où *OSNR* est le rapport signal optique sur bruit optique exprimé dans la largeur de bande optique B_r , *ER* est le taux d'extinction de l'émetteur exprimé en unités linéaires, B_e est la largeur de bande électrique du récepteur exprimée en Hz, B_r est la largeur de bande optique du récepteur exprimée en Hz et *M* est un coefficient relatif au format de modulation ($M = 1$ pour NRZ, $M \sim 1,4$ pour RZ [3]). On notera que le coefficient *M* dépend également du paramètre de taux d'extinction.

7.1.4 Dégradations de propagation

Les dégradations de propagation entraînent des détériorations supplémentaires par rapport au cas de la valeur *Q moyen* calculée sur la base d'une simple accumulation de bruit d'émission ASE. Elles doivent être déduites du facteur *Q moyen* pour obtenir la valeur *Q de ligne* (voir la Figure 7-1)

7.1.4.1 Dégradations de propagation dues à des effets non linéaires

Des interactions non linéaires entre le signal et le milieu de transmission commencent à apparaître lorsque la densité de puissance du signal optique devient élevée. Il convient de noter qu'une puissance élevée du signal optique est nécessaire pour obtenir une valeur OSNR acceptable sans diminuer la longueur des tronçons. Par conséquent, la non-linéarité des fibres a été étudiée avec attention tant pour les systèmes de grande capacité que pour les longs trajets sans régénération électronique, en particulier lorsqu'il s'agit de longues liaisons sous-marines à amplification optique. On distingue généralement deux types de non-linéarités: celles liées à la dépendance de l'intensité de la fibre vis-à-vis de l'indice de réfraction, connue sous le nom d'effet Kerr (modulation autophase, modulation de phase croisée et mélange de quatre ondes) et celles liées aux effets de diffusion (diffusion Raman stimulée principalement). Plusieurs paramètres ont un incidence sur l'ampleur de ces effets non linéaires, notamment les caractéristiques de dispersion de la fibre, la section efficace et l'indice de réfraction non linéaire de la fibre, le nombre et l'espacement des canaux dans les systèmes WDM ainsi que l'intensité du signal et le débit de données. Ces effets non linéaires sont décrits dans l'Appendice II/G.663. Les principaux effets non linéaires sont étudiés dans les paragraphes 7.1.4.1.1, 7.1.4.1.2, 7.1.4.1.3 et 7.1.4.1.4).

7.1.4.1.1 Modulation autophase (SPM)

Le texte qui suit est fondé sur le § II.3.1/G.663 et est reproduit ici dans un souci de commodité pour le lecteur. Etant donné que l'indice de réfraction d'une fibre dépend de l'intensité du signal optique, la variation temporelle de l'intensité du signal optique induit une modulation de sa propre phase. Cet effet est appelé modulation autophase (SPM).

Dans des systèmes de transmission optiques, la modulation autophase élargit progressivement le spectre du signal en raison des changements de phase dus aux modifications d'intensité optique (voir la Figure 7-5). 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 qu'il se propage le long de la fibre en raison des effets de dispersion chromatique, dans la plage de dispersion normale de la

fibres (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 se compenser, ce qui donne moins d'élargissement temporel. La fameuse propagation de solitons repose sur ce phénomène.

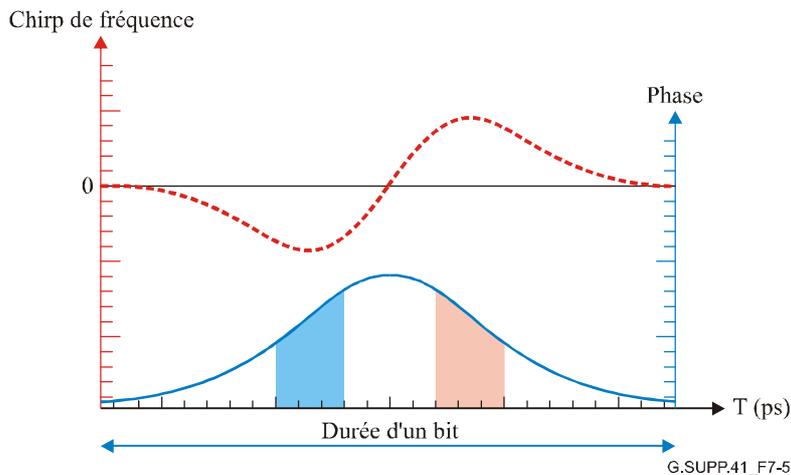


Figure 7-5 – Variation temporelle du décalage de phase et du chirp de fréquence induite par la modulation autophase [4]

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 (systèmes sous-marins à amplification optique par exemple). 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 WDM ayant un espacement entre canaux très faible, 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 monocanal, 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.

Les effets de la modulation autophase peuvent être réduits si on utilise des fibres G.655 fonctionnant à des longueurs d'onde supérieures à la longueur d'onde de dispersion nulle. Ils peuvent aussi être réduits si on utilise des fibres ayant une grande section efficace ou une petite valeur d'indice de réfraction non linéaire. Quel que soit le type de fibre, les effets de la modulation autophase peuvent également être réduits si on diminue les puissances injectées dans les canaux, même si les tendances actuelles en matière de conception de système vont dans le sens de l'utilisation de puissances plus élevées afin d'accroître les longueurs de tronçon.

7.1.4.1.2 Modulation transphase (XPM)

Le texte qui suit est fondé sur le § II.3.3/G.663 et est reproduit ici dans un souci de commodité pour le lecteur. Dans les systèmes multicanaux, la modulation transphase (XPM, *cross phase modulation*) va élargir progressivement le spectre du signal lorsque l'évolution temporelle de l'intensité optique entraîne 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.

La dégradation des systèmes due à la modulation transphase est d'autant plus grande que les canaux sont peu espacés. 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.

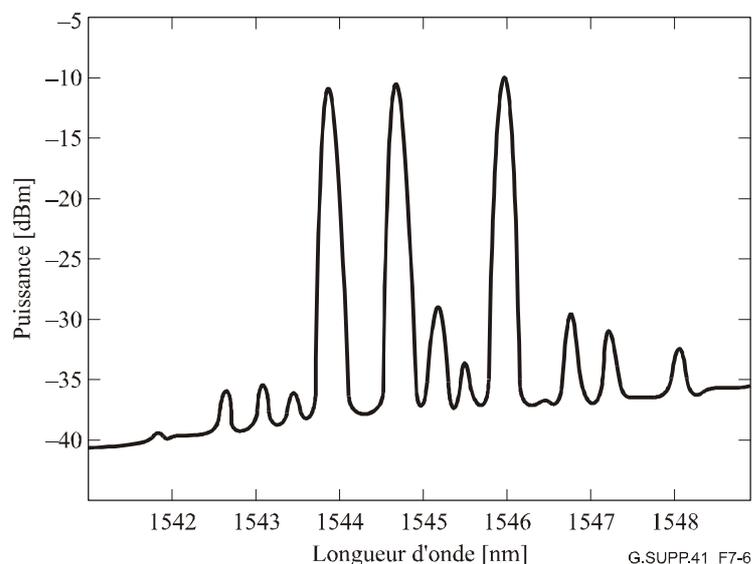
Les dégradations provenant de la modulation transphase sont plus importantes dans les systèmes à fibres G.652 que dans les systèmes à fibres G.653 et G.655. L'élargissement dû à la modulation transphase peut entraîner des brouillages entre canaux adjacents dans les systèmes WDM.

Quel que soit le type de fibre, les effets de modulation transphase peuvent être réduits si on diminue les puissances injectées dans les canaux, même si les tendances actuelles en matière de conception de système vont dans le sens de l'utilisation de puissances plus élevées afin d'accroître les longueurs de tronçon.

7.1.4.1.3 Mélange de quatre ondes (FWM)

Le texte qui suit est fondé sur le § II.3.5/G.663 et est reproduit ici dans un souci de commodité pour le lecteur. 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 se produit essentiellement entre des signaux dans les systèmes WDM.

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 autophase à une fréquence de différence. La modulation autophase crée deux bandes latérales aux 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 7-6). 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.



NOTE – $D = -0,2$ ps/nm.km dans le canal central lorsque des canaux de 3mW sont utilisés [5].

Figure 7-6 – Spectre de puissance optique mesuré en sortie d'une fibre de 25 km à dispersion décalée

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 par 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 et, par voie de conséquence, une dégradation des caractéristiques de taux d'erreurs sur les bits (BER, *bit-error ratio*). 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.

Pour réduire la dégradation des systèmes provoquée par le mélange de quatre ondes, on peut augmenter l'espacement des fréquences et la dispersion chromatique afin de détruire 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 nombre de canaux puisse occuper la même largeur de bande 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).

7.1.4.1.4 Diffusion Raman stimulée (SRS)

Le texte qui suit est fondé sur le § II.3.7/G.663 et est reproduit ici dans un souci de commodité pour le lecteur. La diffusion Raman stimulée est un effet à large bande impliquant l'interaction de la lumière et des modes de vibration des molécules de silice. La diffusion SRS fait qu'une longueur d'onde d'un signal se comporte comme une 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.

La diffusion SRS a surtout une incidence sur les systèmes WDM à large bande. Les signaux ayant une longueur d'onde plus courte dans des systèmes WDM peuvent subir une dégradation du rapport signal/bruit parce qu'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 la longueur totale du système.

Aucune description de technique permettant d'éliminer les effets de diffusion SRS dans les systèmes WDM n'a été publiée. On peut utiliser un filtre à gain pour corriger l'écart de rapport OSNR induit. Pour réduire les effets de la diffusion SRS, on peut également diminuer la puissance optique d'entrée.

7.1.4.1.5 Incidence des effets non linéaires

Un système de transmission à haut débit multitranché à compensation totale de la dispersion subit d'une manière générale des phénomènes optiques non linéaires tels que la modulation autophase dans les systèmes monocanaux, ou la modulation transphase et le mélange de quatre ondes dans les systèmes WDM. L'augmentation de la puissance optique d'entrée accroît l'incidence de ces phénomènes. La performance d'un système peut donc être fortement dégradée par ces effets non linéaires, si la puissance optique en entrée de la fibre devient très élevée.

En général, l'incidence des effets non linéaires dans des systèmes WDM est évaluée à l'aide d'outils de simulation numérique fondés sur la méthode dite "Split Step Fourier" [4]. Les résultats obtenus sont la plupart du temps validés par des outils expérimentaux tels qu'une boucle de recirculation [6] ou un banc d'essai.

La performance du système est bien sûr dégradée aux faibles puissances optiques d'entrée en raison du faible rapport signal optique sur bruit optique reçu à l'extrémité de la ligne de transmission (voir le § 7.1.3).

Il faut donc trouver un compromis entre une puissance d'entrée faible (limitation du rapport OSNR) et une puissance d'entrée élevée (limitation des effets non linéaires). Les aspects suivants ont été pris en compte pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement optimales garantissant la meilleure performance possible du système:

- type de fibre utilisée pour la transmission;
- méthode de compensation de la dispersion;
- longueur de tronçon;
- puissance optique de sortie de ligne;
- espacement entre canaux.

7.1.4.1.6 Conclusions

Il est impossible de déterminer une valeur unique de puissance optique d'entrée minimale permettant d'obtenir une valeur donnée du facteur Q supérieure à 7 par exemple. Entre cette valeur minimale et la valeur maximale de puissance utilisable sans apparition de fortes dégradations non linéaires, on pourra déterminer la région de meilleure performance d'un système en procédant à des simulations préliminaires avec les paramètres système souhaités (type de fibre, compensation de la dispersion, espacement des amplificateurs, espacement des canaux, etc.).

7.1.4.2 Dégradations de propagation dues aux effets de polarisation optiques

Le texte qui suit est fondé sur le § II.4.1/G.663 et est reproduit ici dans un souci de commodité pour le lecteur. Il est bien connu que les composants et les sous-systèmes optiques sont plus ou moins sensibles à l'état de polarisation du signal optique. Ces effets de polarisation peuvent être de trois types:

- PMD: dispersion des modes de polarisation;

- PDL: affaiblissement dû à la polarisation;
- PDG: variation du gain en fonction de la polarisation.

Ils sont décrits en détails dans les Recommandations UIT-T G.663, G.671, G.650.2 et dans la CEI 61282-3.

Tous ces effets dégradent le signal optique et doivent être pris en compte lorsque l'on conçoit des systèmes sous-marins de transmission optique. Ils dépendent en particulier de conditions externes telles que la température, qui entraîne une fluctuation de la performance dans le temps. Une approche statistique est recommandée pour calculer la dégradation induite.

7.1.4.2.1 Dispersion des modes de polarisation (PMD)

La biréfringence des fibres optiques, due à la non-uniformité des propriétés géométriques qui apparaît lors du processus de fabrication, induit une variation du temps de propagation en fonction de l'état de polarisation (SOP). La valeur de dispersion des modes de polarisation correspond à la moyenne des temps de propagation de groupe différentiel (DGD) entre deux modes polarisés orthogonalement. Cette dispersion entraîne un étalement de l'impulsion dans les systèmes de transmission optiques. Le texte qui suit est fondé sur le Supplément 39 aux Recommandations UIT-T de la série G et est reproduit ici dans un souci de commodité pour le lecteur.

Le temps DGD varie de façon aléatoire dans le temps selon une distribution de Maxwell, caractérisée par la valeur de la dispersion PMD. La dispersion PMD d'un câble à fibres optiques est également liée à un comportement statistique qui peut être combiné à la dispersion PMD d'autres éléments composant la liaison optique afin de déterminer un temps DGD maximal, défini comme une limite de probabilité. On pourra d'une part consulter l'Appendice I/G.650.2 et l'Appendice II/G.663 pour obtenir une description de la spécification statistique de la dispersion PMD pour les câbles à fibres optiques. On consultera d'autre part la Rec. UIT-T G.671 qui contient une description de la manière dont il faut combiner les spécifications concernant la dispersion PMD des autres éléments de la liaison avec celles des câbles à fibres optiques pour déterminer un temps DGD maximal combiné pour la liaison.

$$DGD_{max_{link}} = \left[DGD_{max_F}^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2} \quad (7-12)$$

où:

$DGD_{max_{link}}$ temps DGD maximal de la liaison (ps);

DGD_{max_F} temps DGD maximal après concaténation du câble à fibres optiques (ps);

S facteur d'ajustement de Maxwell (voir le Tableau 7-1);

PMD_{Ci} dispersion PMD de la ième composante (ps).

Dans l'équation 7-12 on suppose que les statistiques du temps DGD instantané suivent approximativement une distribution de Maxwell, la probabilité pour que le temps DGD instantané dépasse $DGD_{max_{link}}$ étant contrôlée par la valeur du facteur d'ajustement de Maxwell, donnée dans le Tableau 7-1.

**Tableau 7-1 – Valeurs moyennes du temps DGD et valeurs de probabilité
(voir la Rec. UIT-T G.959.1)**

Rapport entre valeur maximale et valeur moyenne	Probabilité de dépassement de la valeur maximale
3,0	$4,2 \times 10^{-5}$
3,5	$7,7 \times 10^{-7}$
4,0	$7,4 \times 10^{-9}$

Ainsi, la connaissance de la valeur DGD maximale que le système peut tolérer permet de déduire la valeur DGD moyenne équivalente en divisant DGD_{max} par le rapport entre la valeur maximale et la valeur moyenne qui correspond à une probabilité acceptable.

On se référera au Supplément 39 aux Recommandations UIT-T de la série G et à la Rec. UIT-T G.959.1 pour plus de détails, notamment pour le calcul de la valeur DGD maximale de 30 ps pour une application NRZ à 10 Gbit/s et une probabilité de 1×10^{-5} .

Dégradation de la puissance, liée à la dispersion des modes de polarisation

Comme il est indiqué dans le Supplément 39 aux Recommandations UIT-T de la série G, la dégradation de puissance induite par le temps DGD au point R du récepteur (voir la Figure 7-3) est fonction de la puissance relative des deux modes de polarisation orthogonaux. Elle varie dans le temps en fonction de l'alignement relatif des principaux états de polarisation du câble à fibres optiques et de la polarisation de la source. Le temps DGD maximal de la liaison est fixé de manière à ne pas dépasser une dégradation donnée au premier ordre du taux de répartition de la puissance dans le cas le plus défavorable (puissance égale dans les deux modes). Le format de transmission, NRZ ou RZ, a également une incidence sur cette dégradation.

Pour les applications à codage NRZ à 10 Gbit/s (décrites dans l'Appendice I/G.691 (Appendice I) et la Rec. UIT-T G.959.1), une tolérance de 1 dB pour la dégradation au premier ordre correspond à une limite de 30 ps pour le temps DGD au point R.

Le cas du codage RZ nécessite un complément d'étude.

7.1.4.2.2 Affaiblissement dû à la polarisation (PDL)

L'affaiblissement dû à la polarisation est défini dans la Rec. UIT-T G.671 comme étant la variation maximale de l'affaiblissement d'insertion due à une variation de l'état de polarisation (SOP) pour tous les états SOP. Dans les systèmes à amplification, un mode de commande d'amplification correspond au fonctionnement à une puissance de signal constante. Le signal et le bruit subissent tous deux des affaiblissements dus à la polarisation. Ils sont toutefois affectés de façons différentes, car le bruit n'est pas polarisé. Le bruit peut être décomposé en une composante parallèle et une composante orthogonale au signal. On peut montrer que l'effet combiné de l'affaiblissement PDL et de l'amplification optique est toujours d'accroître la composante de bruit orthogonale au signal. De plus, l'amplitude de la composante de bruit orthogonale varie dans le temps car la polarisation du signal varie en raison de la dispersion des modes de polarisation. Il en résulte une diminution du rapport OSNR et de la valeur Q au niveau du récepteur. En outre, cette fluctuation temporelle entraîne un évanouissement du rapport OSNR et de la valeur Q au niveau du récepteur, ce qui se traduit par une dégradation de la performance du système.

Pour réduire les dégradations du système dues à l'accumulation des affaiblissements PDL des différents composants optiques, on peut minimiser l'affaiblissement PDL de chacun d'eux. On notera que l'incidence de l'affaiblissement PDL sur la performance du système s'accroît lorsque le nombre d'amplificateurs augmente. Dans les systèmes sous-marins longue distance, les prescriptions sont très contraignantes, car le nombre d'amplificateurs peut être de plusieurs

centaines. On a montré que la modulation de polarisation, ou embrouillage, améliore la performance du système en réduisant les fluctuations et en améliorant la valeur Q moyenne.

7.1.4.2.3 Variation du gain en fonction de la polarisation (PDG)

La variation du gain en fonction de la polarisation est définie dans la Rec. UIT-T G.661 comme étant la variation maximale du gain due à une variation de l'état de polarisation du signal d'entrée dans des conditions nominales de fonctionnement. Les dégradations du système induites par la variation du gain en fonction de la polarisation appellent un complément d'étude.

7.1.4.3 Dégradations dues à la non-platitude de la courbe de gain cumulatif

Les dégradations dues à la non-platitude de la courbe de gain cumulatif ont trait aux dégradations liées à la préaccentuation non optimale (§ 7.1.4.4).

7.1.4.4 Dégradations liées à la préaccentuation non optimale

La préégalisation ou préaccentuation peut être utilisée au niveau de l'interface MPI-S pour réduire l'incidence de la variation de gain et du gradient de gain des amplificateurs en ligne intervenant lors de la propagation des signaux dans le système.

La préégalisation permet en partie de compenser la variation de gain et le gradient de gain des amplificateurs si on utilise la méthode décrite ci-après:

au point MPI-S, la puissance optique la plus élevée est attribuée au canal pour lequel le gain de l'amplificateur de ligne est le plus faible tandis que la puissance optique la plus faible est attribuée au canal pour lequel le gain de l'amplificateur de ligne est le plus élevé. La différence entre la puissance optique la plus élevée et la puissance optique la plus faible est appelée valeur de préaccentuation, pour une longueur d'onde donnée.

La préaccentuation de puissance de canal permet donc une égalisation de la performance de transmission du système pour tous les canaux. Cependant, le niveau de puissance étant différent d'un canal à l'autre, la propagation dans une fibre optique entraînera des dégradations supplémentaires (voir Figure 7-7).

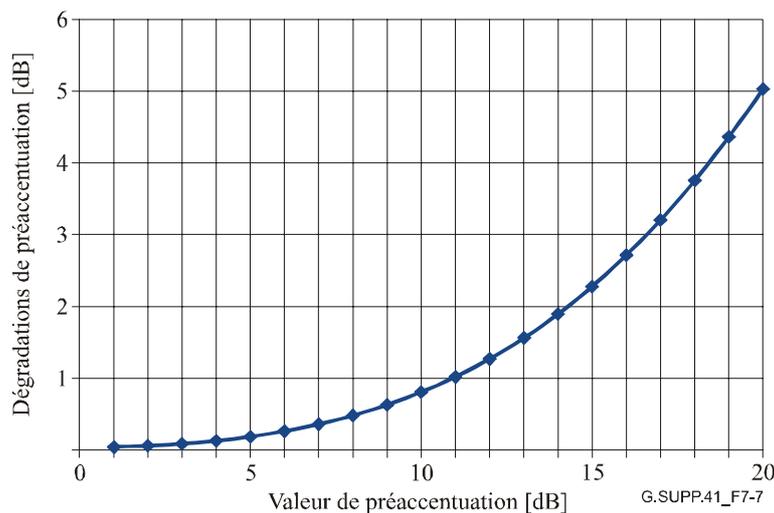


Figure 7-7 – Exemple de dégradations induites par le réglage de préaccentuation

7.1.4.5 Dégradations dues à un mauvais réglage de la ou des longueurs d'onde

Certaines dégradations supplémentaires peuvent être dues à un mauvais réglage des longueurs d'onde des signaux ou de tous les composants optiques responsables d'une fonction de filtrage (filtres optiques, multiplexeurs et démultiplexeurs). Par exemple, un décalage de longueur d'onde

entre un laser et le centre de la largeur de bande de multiplexeur correspondant peut introduire des affaiblissements supplémentaires entraînant une dégradation du facteur Q.

7.1.4.6 Dégradations dues à la surveillance

Ces dégradations sont liées à l'utilisation de commandes optiques envoyées sur la ligne pour surveiller certains équipements immergés. Par exemple, la plupart des répéteurs utilisés dans les systèmes sous-marins peuvent être interrogés et répondre en modulant le signal optique à une faible fréquence. Cette amplitude de modulation est faible comparée à l'amplitude de modulation des données, afin de dégrader le moins possible les caractéristiques du signal. Les dégradations dues à cette modulation supplémentaire sont évaluées et prises en compte pour l'estimation de la valeur Q de la ligne.

7.1.4.7 Dégradations dues au processus de fabrication et à l'environnement

Au cours du processus de fabrication, il n'est pas possible de garantir que tous les équipements fabriqués se comporteront exactement de la manière ou, en d'autres termes, qu'ils présenteront des performances identiques. Il convient donc de déterminer les dégradations liées à la variation de la qualité de transmission due à ces différences de fabrication. Le présent paragraphe porte également sur la variation des conditions d'environnement affectant le système (température et pression par exemple).

7.1.5 Dégradations dues aux imperfections des équipements de transmission terminaux

Les dégradations dues aux imperfections des équipements de transmission terminaux sont généralement exprimées à l'aide du facteur Q mesuré lorsque l'émetteur et le récepteur sont disposés suivant une configuration dos à dos. Pour calculer le facteur Q réel pour la totalité du segment, il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques réelles de l'émetteur et du récepteur. On utilise la formule suivante:

$$\frac{1}{Q_{Segment}^2} = \frac{1}{Q_{Ligne}^2} + \frac{1}{Q_{TTE\ dos\ à\ dos}^2} \quad (7-13)$$

7.1.6 Marges associées au système

La durée de vie nominale d'un système sous-marin étant de 25 ans, un certain nombre de marges supplémentaires sont nécessaires.

7.1.6.1 Dégradations dues aux opérations de réparation

Après la pose d'une ligne sous-marine, il faut, lors de chaque opération de réparation du câble, ajouter une longueur de câble supplémentaire, ce qui entraîne un accroissement de l'affaiblissement sur un tronçon et donc une dégradation du facteur Q.

Pour évaluer la marge liée aux opérations de réparation, on estime le nombre total de réparations requises au cours de la vie du système. Le scénario suivant est généralement utilisé:

- réparation de câble terrestre: 1 réparation tous les 4 km, avec un minimum de 2 réparations;
- réparation en eaux peu profondes: 1 réparation tous les 15 km, avec un minimum de 5 réparations;
- réparation en eaux profondes: 1 réparation tous les 1000 km.

Chaque réparation se traduira par l'adjonction d'une longueur de câble directement proportionnelle à la profondeur de l'eau à l'endroit de la réparation. Généralement, l'accroissement de longueur est compris entre 1,5 et 2,5 fois la profondeur de l'eau.

Pour calculer la marge requise pour les opérations de réparation, on évalue la longueur totale de câble additionnel dans le cas le plus défavorable après prise en compte de toutes les réparations estimées. On calcule un nouveau facteur Q en prenant pour longueur de ligne la somme de la

longueur totale initiale de la ligne et de la longueur de câble maximale supplémentaire ajoutée dans le cadre des réparations. La différence entre ce facteur Q et le facteur Q moyen correspond à la marge allouée aux réparations.

7.1.6.2 Dégradations dues au vieillissement des équipements

Les dégradations dues au vieillissement des équipements sont principalement liées aux fibres, qui entraînent progressivement un accroissement de l'affaiblissement des signaux en raison des effets physiques liés à l'environnement. On tient généralement compte de deux effets:

- l'effet de l'hydrogène sur les fibres: on fait généralement l'hypothèse d'une dégradation se traduisant par un affaiblissement supplémentaire après 25 ans d'environ 0,003 dB/km;
- l'effet des rayonnements: les fibres optiques sont sensibles aux rayonnements à haute énergie (rayons gamma) dont l'origine peut être liée aux sédiments, à l'eau de mer ou à des sources artificielles (site de déchets). On estime que l'affaiblissement s'accroît de moins de 0,002 dB/km après 25 ans.

Comme pour les opérations de réparation (voir le § 7.1.6.1), un facteur Q est calculé avec ces affaiblissements supplémentaires puis comparé à la valeur Q moyenne afin d'obtenir la valeur de marge requise pour tenir compte du vieillissement des équipements.

7.1.6.3 Dégradations dues aux pannes prévisibles de certains composants

En raison du coût et de la complexité des opérations maritimes de remplacement ou de réparation d'équipements immergés, les composants les plus sensibles sont redondants afin d'éviter autant que possible des interventions. Les pannes affectant les pompes de répéteurs sont les principales défaillances à considérer. Si la redondance de pompes évite l'interruption de la puissance de sortie en cas de panne d'une pompe, ce type d'incident conduira toujours à une dégradation de la puissance de sortie et du facteur de bruit, entraînant ainsi une diminution du facteur Q.

La marge additionnelle requise pour prendre en compte ces dégradations dépend de la fiabilité de la pompe et de la configuration de redondance.

7.1.6.4 Marge non attribuée

Les marges de réserve sont des marges résiduelles après prise en compte de toutes les marges liées aux réparations en conditions de fin de vie. La plupart du temps, les clients exigent ces marges de réserve pour accroître leur confiance dans le fonctionnement du système ou pour disposer d'une marge en cas de mise à niveau non prévue du système.

7.1.7 Conclusion

Les tableaux de bilan de puissance optique décrivent la façon dont le niveau de performance du système sera atteint. Un exemple de tableau de bilan de puissance optique préconisé est disponible dans l'Annexe A/G.977.

Dans les systèmes sous-marins utilisant des amplificateurs optiques (Recommandations UIT-T G.973 et G.977), la régénération n'a lieu que dans l'équipement de transmission terminal au niveau de l'interface électro-optique sous-marine. Entre l'émission et la réception, les canaux subiront des dégradations dues par exemple à l'accumulation de bruit optique ou à la propagation (non-linéarité des fibres, dispersion chromatique, etc.). Il est donc recommandé d'établir le bilan de puissance optique au niveau du tronçon de ligne numérique sous-marin. Etant donné que certains systèmes peuvent comprendre plusieurs tronçons de ligne numérique sous-marins ayant des niveaux de dégradation différents, il est en outre recommandé d'établir un bilan de puissance optique pour chaque tronçon de ligne numérique sous-marin.

On notera par ailleurs que dans certains cas (présence d'une unité WDM-BU par exemple), deux trajets (jonction et dérivation) risquent de présenter des niveaux de dégradation différents: un bilan

de puissance optique devrait alors être établi pour chaque trajet et le cas le plus défavorable devrait être considéré.

De plus, lorsque la conception d'un système à plusieurs points terrestres a été optimisée pour le tronçon de ligne numérique sous-marin le plus long en termes de dégradation du rapport signal optique sur bruit optique et d'espacement entre répéteurs, des marges supplémentaires peuvent être associées aux tronçons moins longs. Ces marges supplémentaires, généralement appelées marges de fournisseur/de segment non attribués, devraient être clairement indiquées dans les tableaux de bilan de puissance.

Le fournisseur devrait fournir suffisamment d'informations pour justifier la validité des tableaux de bilan de puissance, en particulier (liste non exhaustive):

- la distance totale de transmission et les longueurs de tronçon;
- le nombre de longueurs d'onde transmises;
- le taux d'extinction au niveau de l'émetteur;
- la valeur de la puissance nominale de sortie du répéteur;
- la valeur nominale du facteur de bruit;
- les valeurs des largeurs de bande optique et électrique au niveau du récepteur;
- la spécification du facteur Q en configuration dos à dos pour le terminal;
- les caractéristiques du code de correction d'erreur directe (notamment les courbes de taux BER avant et après correction).

Le fournisseur devrait également préciser si un dispositif quelconque situé soit au niveau de l'émetteur/du récepteur (embrouilleurs de polarisation et/ou canaux fictifs par exemple) soit dans les installations immergées (filtres d'égalisation de gain, égaliseurs de gradient et/ou égaliseurs de pente par exemple) est utilisé pour améliorer la qualité de transmission.

7.2 Considérations liées à la dispersion chromatique

La dispersion chromatique correspond à la variation des vitesses de groupe en fonction de la longueur d'onde de sorte que toutes les composantes spectrales d'un signal optique se propageront à des vitesses différentes. Il en résulte un étalement de l'impulsion, qui peut entraîner une importante dégradation. Suivant le système et en particulier suivant le nombre de longueurs d'onde (systèmes WDM), il peut être intéressant de gérer cette dispersion de façon tout à fait différente pour limiter l'étalement de l'impulsion et d'autres effets de propagation. Généralement, cette gestion conduit à une carte de la dispersion indiquant comment la dispersion est gérée tout au long de la liaison.

7.2.1 Étalement de l'impulsion dû à la dispersion chromatique

La dispersion chromatique dans une fibre optique monomode est la somme de la dispersion liée au matériau et de la dispersion liée au guide d'onde, et elle contribue à l'étalement et la distorsion de l'impulsion dans un signal numérique. La principale cause de ce phénomène est la présence de longueurs d'onde différentes dans le spectre optique de l'émetteur. A chaque longueur d'onde sont associés un temps de propagation de phase et un temps de propagation de groupe spécifiques le long de la fibre, de sorte que l'impulsion de sortie subit une distorsion dans le temps.

7.2.2 Carte de la dispersion chromatique

Comme on l'indique dans la Rec. UIT-T G.973 pour un système monocanal et dans la Rec. UIT-T G.977 pour un système WDM, la carte de la dispersion est le principal outil permettant de décrire les caractéristiques de dispersion chromatique d'un système. La dispersion cumulative est définie comme étant la dispersion mesurée entre la sortie de l'émetteur du terminal et un autre point quelconque sur le trajet optique. La carte de dispersion représente la dispersion chromatique locale, pour une longueur d'onde de fonctionnement donnée, en fonction de la distance entre l'émetteur

optique et le récepteur optique. La carte de dispersion dépendra principalement du type de système utilisé (SWS ou WDMS).

Pour un système SWS, on utilise généralement des fibres à dispersion chromatique de valeur faiblement négative proche de zéro mais non nulle le long de la liaison correspondant aux tronçons principaux, et des fibres à dispersion chromatique de valeur positive élevée pour la liaison correspondant à quelques tronçons à compensation de dispersion. Le but de cette gestion est de maintenir la dispersion cumulative de l'ensemble de la liaison à une valeur proche de zéro tout en maintenant la dispersion chromatique locale à une valeur non nulle.

Pour un système WDMS fonctionnant à 10 Gbit/s, on utilise généralement des fibres à dispersion chromatique de valeur faiblement négative mais éloignée de zéro (de l'ordre de -2 ps/(nm.km)) pour la plupart des tronçons (on peut parfois utiliser deux types de fibre: au début du tronçon, des fibres de grande section efficace et à la fin du tronçon, des fibres à faible pente) alors que l'on utilise généralement des fibres à dispersion chromatique de valeur positive élevée pour les tronçons à compensation de dispersion. Le but de cette gestion est de maintenir la dispersion cumulative de l'ensemble de la liaison à une valeur proche de zéro tout en maintenant la dispersion chromatique locale à une valeur élevée et non nulle, afin de limiter le mélange de quatre ondes et la modulation transphase.

Pour un système WDMS fonctionnant à 10 Gbit/s et comprenant un grand nombre de canaux optiques de ligne (Figure 7-8), on utilise généralement des fibres à dispersion chromatique élevée le long de la liaison pour tous les tronçons. Une partie du tronçon est généralement à dispersion positive avec pente positive (en principe, avec une très grande section efficace) et l'autre partie est à dispersion négative avec pente négative (en principe, avec une très petite section efficace).

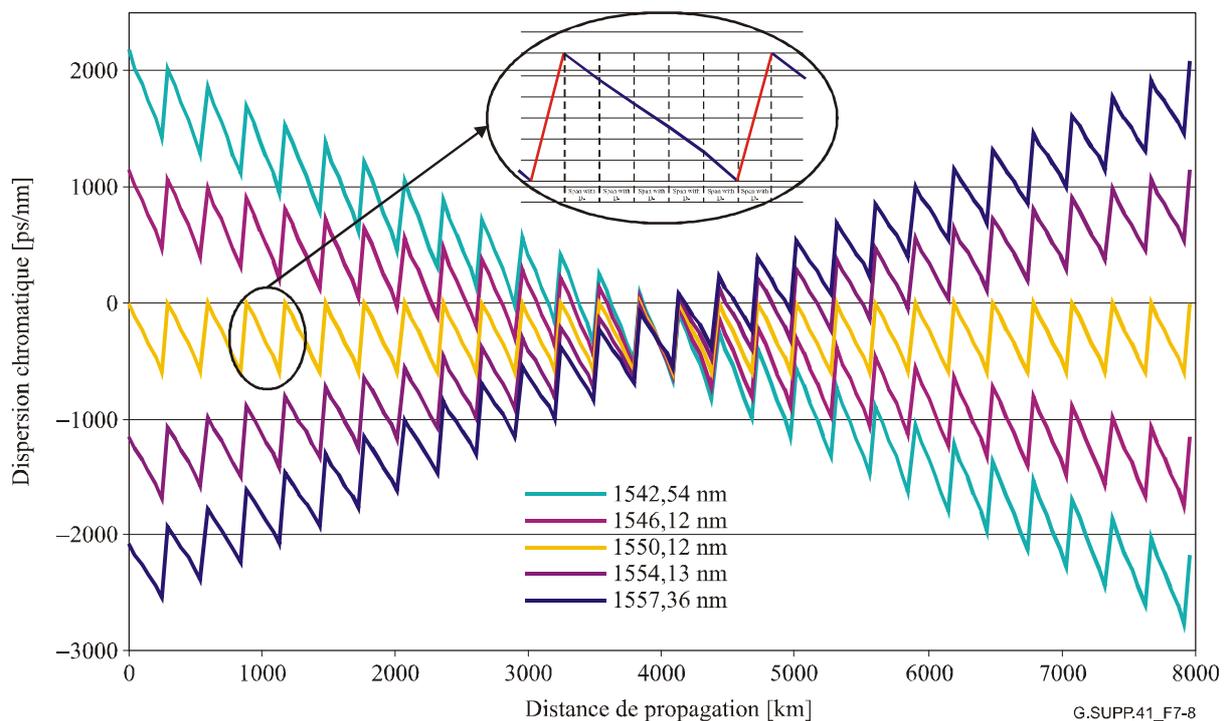


Figure 7-8 – Carte de dispersion chromatique type pour un système WDM sous-marin comprenant 163 tronçons devant transmettre 40 longueurs d'onde centrées autour de la longueur d'onde 1550,12 nm

7.2.3 Implémentation de la gestion de la dispersion

La carte de dispersion pour chaque tronçon optique doit respecter les exigences de transmission (limitation des effets non linéaires, de l'étalement de l'impulsion, etc.).

On peut, pour chaque longueur d'onde, compenser la dispersion cumulative résiduelle en utilisant une certaine longueur de fibre d'égalisation ou d'autres dispositifs passifs de compensation de la dispersion du côté émission (précompensation) et/ou du côté réception (postcompensation) dans l'équipement terminal de transmission sous-marin. La compensation se fait généralement à l'extrémité réception uniquement pour un système monocanal et aux extrémités émission et réception pour un système WDM.

Le concepteur du système doit tenir compte de toutes les causes de variation par rapport à la carte de dispersion prévue, tant aléatoires que systématiques, en particulier (liste non exhaustive):

- l'incertitude en ce qui concerne les mesures de la longueur d'onde correspondant à la dispersion nulle, la dispersion et la pente de dispersion des fibres constituantes DSF, NDSF, DCF, NZDSF, CSF, fibres à pente négative, EDF, etc.;
- l'incertitude résultant du réarrangement et du choix "aléatoire" de sous-ensembles de fibres dans l'assemblage de tronçons de câble élémentaires;
- l'incertitude en ce qui concerne la température, la pression et les coefficients de contrainte de ces fibres dans le câble et dans les appareils sous pression;
- l'incertitude en ce qui concerne la température et la contrainte exactes de ces fibres pendant les mesures de dispersion;
- l'incertitude en ce qui concerne la température de la fibre installée;
- le vieillissement;
- les opérations de réparation.

8 Correction d'erreur directe

A étudier.

9 Considération liée à la fiabilité

Les réseaux sous-marins nécessitent des systèmes à fibres optiques fiables et robustes pour éviter d'avoir à effectuer sous l'eau de coûteuses réparations. Par ailleurs, étant donné que les technologies utilisées sont susceptibles d'évoluer au cours de la vie du système, un plan de maintenance doit être établi en début de vie du système pour s'assurer que les réparations nécessaires seront effectuées au cours de la durée de vie contractuelle du système.

Les défaillances intervenant au cours de la vie du système peuvent être dues à des pannes internes (panne de dérivation, accroissement de l'affaiblissement de la fibre, défaillances de répéteurs, défaillances de cartes, etc.) ou à des agressions externes (provoquées par exemple par des ancres ou des activités de pêche pour des installations sous-marines ou liées à des opérations malveillantes dans le cas installations terrestres).

9.1 Prescriptions en matière de fiabilité

La fiabilité est définie comme la probabilité pour un composant ou un sous-système de réaliser une fonction requise dans des conditions particulières pendant un certain temps. Elle peut s'exprimer par le biais de différentes grandeurs:

- nombre de défaillances dans un temps donné (FIT, *failure in time*): il s'agit du nombre de défaillances par heure pour 10^9 dispositifs. Cette grandeur dépend de la température et doit

être déterminée à la température d'exploitation. D'un point de vue statistique, cette définition est équivalente au nombre de défaillances par dispositif pendant 10^9 heures;

- durée moyenne entre deux défaillances (MTBF, *mean time between failure*): durée probable entre deux défaillances consécutives.

Il convient de noter que ces grandeurs statistiques n'ont pas de signification pour un dispositif donné et indiquent seulement des probabilités de performance et non des prévisions absolues.

Dans un premier temps, on utilise la contrainte globale de fiabilité pour évaluer le niveau de fiabilité autorisé pour chaque sous-système puis pour chaque composant. On traduit ensuite la fiabilité requise d'un composant pour une certaine durée de vie du système en termes de taux de défaillances (FIT) ou de durée MTBF.

Dans le cas d'un système ou d'un sous-système, on définit les grandeurs suivantes:

- temps moyen de réparation (MTTR, *mean time to repair*): temps nécessaire prévu pour réparer une défaillance;
- indisponibilité = MTTR/MTBF: durée généralement exprimée en minutes par année au cours de laquelle le réseau n'est pas disponible pour remplir sa fonction;
- disponibilité du réseau (%) = (Durée totale – Indisponibilité)/Durée totale * 100%.

9.2 Panne interne

Pour atteindre l'objectif de fiabilité dans les systèmes sous-marins (en réduisant au minimum le nombre de pannes internes) et établir une politique de maintenance applicable au cours de la vie entière d'un système donné, il convient d'identifier les causes premières des pannes au niveau des composants, des sous-systèmes et du système. Il faut donc prouver que tous les composants utilisés dans le système seront fiables pendant la durée de vie contractuelle du système (généralement 25 ans). Les prévisions de fiabilité sont souvent fondées sur la Rec. UIT-T G.911, la CEI 62380, les documents MIL-HDBK-217 [7] et Telcordia SR 332 [8] ainsi que sur des données de fournisseurs de composants.

9.2.1 Analyse du taux de défaillances

9.2.1.1 Période de défaillances précoces

En début de vie, les unités ou les composants utilisés dans les systèmes sous-marins présentent un taux de défaillances élevé qui décroît avec le temps. Cette courte période est appelée période de défaillances précoces (elle dure généralement de un à deux ans). Elle est principalement due au caractère non idéal du processus de fabrication (matériaux de base défectueux, opérations inappropriées, environnement contaminé, saute de puissance, inefficacité des inspections ou transport par navire et manipulation inappropriés). Il convient de noter que cette période de défaillances précoces concerne tout un lot de dispositifs et ne peut refléter le comportement d'un seul dispositif. Dans le cas présent, un dispositif donné satisfera ou non à un test, tandis que le taux de défaillances d'un certain nombre d'unités suivra une courbe décroissante.

9.2.1.2 Période de défaillances aléatoires

La période qui suit la période de défaillances précoces est caractérisée par un taux de défaillances plus petit. Elle est appelée période de vie utile car le taux de défaillances reste pratiquement constant jusqu'au début de la dernière phase (période d'usure). Les défaillances qui se produisent pendant cette période obéissent à des processus aléatoires et ne sont généralement pas détectables, même dans le cas de processus très fortement contrôlés.

9.2.1.3 Période de vieillissement

La dernière période est celle au cours de laquelle les systèmes et leurs composants commencent à s'user. Les défaillances peuvent être dues au vieillissement, à la fatigue des matériaux d'une usure

excessive, à la corrosion par l'environnement, à un environnement inapproprié ou à des dommages cumulatifs.

On décrit généralement l'évolution du taux de défaillances au cours de la vie du système par une courbe en forme de baignoire (voir la Figure 9-1).

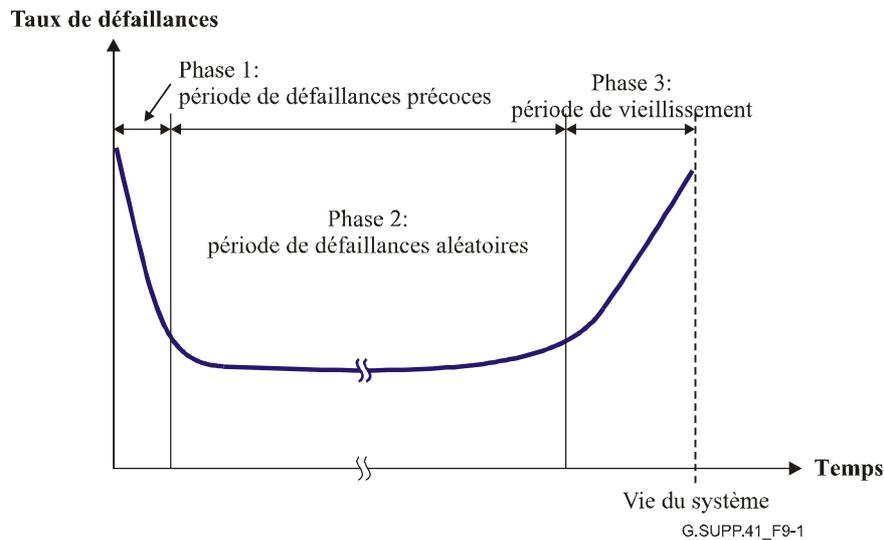


Figure 9-1 – Evolution type du taux de défaillances durant la vie d'un système

9.2.2 Fiabilité d'installations immergées

Une installation immergée est plus critique qu'une installation terrestre en termes de fiabilité car la durée MTTR qui lui est associée est plus élevée. Cette durée est généralement de deux semaines pour une installation immergée contre deux heures pour une installation terrestre. On comprend donc pourquoi le nombre FIT associé aux pompes laser utilisées dans les répéteurs est un paramètre sensible du système du point de vue de la fiabilité. Par exemple, le nombre FIT pour les amplificateurs de réseaux terrestres varie généralement entre 1000 et 10 000 alors que pour les amplificateurs sous-marins, il varie généralement entre 10 et 100 (c'est-à-dire environ 100 fois inférieur).

Concevoir des systèmes sous-marins extrêmement fiables signifie donc que la probabilité de défaillance due à l'usure au cours de la vie du système doit être pratiquement nulle et que la probabilité de défaillances aléatoires doit être aussi faible que possible.

Les répéteurs sont les équipements les plus critiques puisqu'ils contiennent des composants électroniques, optiques et optoélectroniques. On doit en outre garder à l'esprit que tout dommage interne, quelle que soit sa cause, peut avoir une incidence directe sur la qualité de transmission. De grandes précautions doivent donc être prises pour éviter les défaillances ou en réduire le risque. En particulier, une défaillance optique se produisant sur une fibre donnée ne doit pas dégrader la performance des autres fibres du système. Les tests requis avant et pendant l'installation d'un câble sont détaillés dans la Rec. UIT-T G.976.

i) Prescriptions générales

L'utilisation de composants fortement blindés, un contrôle attentif des matériaux de base, une conception robuste et simple, le soin apporté aux processus de fabrication et un contrôle approfondi de la qualité permettent d'obtenir des valeurs peu élevées pour le nombre FIT.

Il apparaît immédiatement qu'il faut disposer d'une condition de test permettant d'accélérer la survenue des défaillances d'une manière prévisible et compréhensible. Il convient par ailleurs de reconnaître qu'un système fait intervenir divers processus de fabrication et procédures d'assemblage

et que chacun d'eux devrait être testé. Chaque défaillance devrait être attribuée à un seul mécanisme de défaillance et ne devrait pas être corrélée à une éventuelle interaction entre le dispositif testé et la procédure de test proprement dite. Les exigences de fiabilité rendent nécessaires, tant pour des questions économiques que pour des questions de faisabilité technique, l'utilisation de tests accélérés.

ii) Redondance

Pour atteindre la fiabilité requise et pour diminuer en conséquence la valeur du nombre FIT pour les sous-systèmes, on utilise généralement des configurations redondantes. Par exemple, des configurations de pompes laser redondantes sont généralement utilisées pour faire en sorte que l'objectif de fiabilité associé à un amplificateur soit atteint.

9.2.3 Exemple de calcul de la fiabilité

Dans le cas d'un répéteur comportant quatre pompes dans une configuration de redondance quadruple, la probabilité de défaillances de chaque pompe, dans l'hypothèse d'une durée de vie de 25 ans, est la suivante (dans l'hypothèse d'un taux de défaillances constant):

$$p = 1 - e^{21,9 \times 10^{-5} FIT} \quad (9-1)$$

La valeur FIT (définie pour 10^9 dispositifs) considérée dans l'équation 9-1 est identique pour les quatre pompes. La valeur $21,9 \times 10^{-5}$ dans l'équation 9-1 résulte du calcul suivant:

$$\frac{25 \text{ années} \times 365 \text{ jours} \times 24 \text{ heures}}{10^9 \text{ dispositifs}} = 21,9 \times 10^{-5} \text{ h/dispositif} \quad (9-2)$$

La Figure 9-2 indique le nombre de pompes défaillantes au cours des 25 ans de vie du système pour un câble transatlantique type (150 répéteurs) comprenant une seule paire de fibres optiques. La valeur type du nombre FIT pour une pompe laser sous-marine est supposée être égale à 25. Pour évaluer le nombre de pompes défaillantes, on multiplie la probabilité p par le nombre total de pompes.

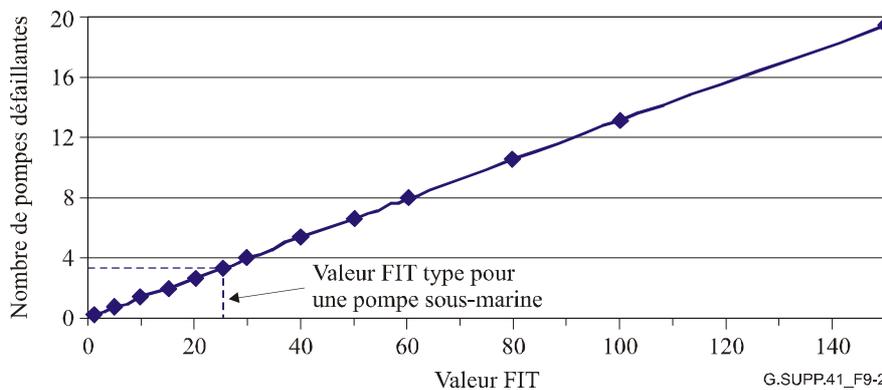


Figure 9-2 – Nombre estimé de pompes défaillantes en 25 ans pour une liaison transatlantique type composée d'une paire de fibres et de 150 répéteurs contenant chacun quatre pompes

Ces défaillances étant situées aléatoirement le long de la ligne de transmission, aucune indication ne peut être donnée pour ce qui est du ou des répéteurs touchés ou de la dégradation de sa transmission.

En supposant que la probabilité de défaillance d'une pompe laser est égale à p et en désignant par N le nombre total de pompes (c'est-à-dire quatre fois le nombre de répéteurs), on peut exprimer la probabilité de survenue d'une défaillance exactement dans l'ensemble du système.

Chaque pompe est désignée par une variable aléatoire X_i ($X_1 \leq X_i \leq X_N$). Nous avons donc N variables aléatoires obéissant à la loi suivante:

- i) la pompe X_i est hors d'état de fonctionnement ($X_i = 0$) avec une probabilité $p(X_i = 0) = p$;
- ii) la pompe X_i est en état de fonctionnement ($X_i = 1$) avec une probabilité $p(X_i = 1) = 1 - p(X_i = 0) = 1 - p$.

Le nombre estimé de pompes défaillantes est égal à $N \cdot p$ (Figure 9-2) et la variance est égale à $Np(1 - p)$. Cette loi de probabilité est une loi binomiale. La probabilité d'avoir exactement n pompes défaillantes au cours de la vie du système est la suivante:

$$P(n, N) = \frac{N!}{(N - n)!n!} p^n (1 - p)^{N - n} \quad (9-3)$$

Dans l'hypothèse où il existe déjà une pompe défaillante dans un répéteur, la probabilité d'avoir une seconde pompe défaillante dans le même répéteur est la suivante:

$$P_2(N) = P(1,3) = 3p(1 - p)^2 \quad (9-4)$$

En reprenant le système utilisé pour la Figure 9-2 et en utilisant la probabilité donnée par l'équation 9-4, on obtient la valeur MTBF entre la première et la seconde défaillance dans un même répéteur représentée sur la Figure 9-3. La durée MTBF pour un nombre FIT type égal à 25 est de plus de 1500 ans!

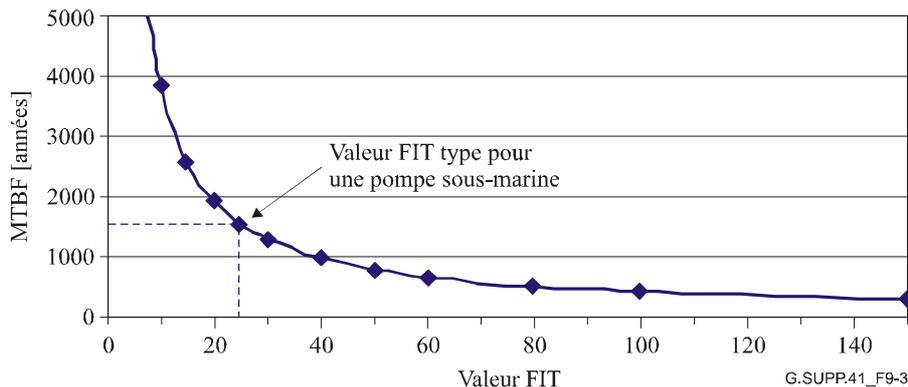


Figure 9-3 – Durée MTBF dans le cas d'une deuxième de pompe défaillante dans le même répéteur pour une liaison transatlantique type composée d'une paire de fibres et de 150 répéteurs contenant chacun quatre pompes

9.3 Panne d'origine externe

Des pannes d'origine externe se produisent généralement dans des tronçons de câble. De fait, les principales causes de défaillance sont des agressions telles que celles que peuvent provoquer la pêche de fond, les chalutiers, les courants océaniques, les événements géologiques (tremblements de terre et éruptions volcaniques) ou les défaillances thermiques dues à une surcharge. Près de 90% des défaillances sont provoquées par des activités de pêche et des ancres de navire. Pour protéger le câble contre ces diverses menaces, l'installation sous-marine peut être enfouie en eaux peu profondes sauf lorsqu'il s'agit d'une zone rocailleuse dont les fonds marins interdisent l'enfouissement. En outre, le choix du trajet de câble vise à réduire autant que possible les risques géologiques.

En cas de défaillance au sein d'une installation immergée, des opérations maritimes sont nécessaires et un navire câblé est mobilisé pour effectuer les réparations. Le tronçon de câble endommagé est découpé, relevé et remplacé par des éléments de rechange à bord du navire câblé. On estime que le temps moyen de réparation (MTTR) est de 1 à 3 semaines suivant l'emplacement de la panne, la

profondeur de la mer, la disponibilité du navire câblé, la cause principale du dommage et les conditions météorologiques (qui sont susceptibles de retarder fortement les opérations maritimes).

Pour réduire au minimum l'incidence de ces pannes sur le trafic, on accroît la disponibilité totale du réseau grâce à la diversité d'acheminement lorsque cela est possible (voir le § 6 pour des détails sur les topologies de réseaux sous-marins). Lorsqu'une défaillance dans l'installation sous-marine entraîne un affaiblissement de transmission, le trafic est généralement réacheminé sur un chemin de protection.

9.4 Localisation des pannes

Dans la plupart des cas, le soin apporté à la conception d'un réseau n'empêche pas la survenue de défaillances imprévues. Il faut diagnostiquer et supprimer rapidement ces défaillances afin de minimiser l'interruption du trafic. Les paramètres essentiels devraient donc être surveillés (en utilisant un mécanisme de surveillance) et utilisés pour détecter les pannes soudaines ou progressives et déterminer leur emplacement.

Comme on le détaille dans la Rec. UIT-T G.976, certains tests peuvent être effectués en service et d'autres hors service à partir de la station terminale suivant le dispositif utilisé (surveillance des répéteurs ou moyens externes tels que réflectométrie OTDR, réflectométrie OTDR cohérente, mesures de résistance ou de capacité du conducteur, etc.). Ces tests servent à localiser et à identifier le type de panne avec une précision optimale. En général, la réflectométrie OTDR est utilisée pour vérifier la qualité de la portion du câble située entre l'équipement TTE et le premier répéteur immergé, tandis que la réflectométrie COTDR sert à localiser des défaillances dans des systèmes longue distance à répéteurs.

Durant la réparation, une technique d'électrodage peut (le cas échéant) être appliquée à partir du navire pour localiser le trajet de câble. Elle permet de relever dans les meilleurs délais le tronçon de câble défectueux ou l'équipement immergé.

10 Considérations liées à la mise à niveau des équipements

A étudier.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

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