



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.977

(04/2000)

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

Sections numériques et systèmes de lignes numériques –
Systèmes sous-marins à câbles optiques

**Caractéristiques des systèmes de câbles
optiques sous-marins à amplification optique**

Recommandation UIT-T G.977

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

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

CONNEXIONS ET CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX	G.100–G.199
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES COMMUNES À TOUS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	G.200–G.299
CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX À COURANTS PORTEURS SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.300–G.399
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX HERTZIENS OU À SATELLITES ET INTERCONNEXION AVEC LES SYSTÈMES SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.400–G.449
COORDINATION DE LA RADIOTÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
EQUIPEMENTS DE TEST	G.500–G.599
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.600–G.699
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999
Généralités	G.900–G.909
Paramètres pour les systèmes à câbles optiques	G.910–G.919
Sections numériques à débits hiérarchisés multiples de 2048 kbit/s	G.920–G.929
Systèmes numériques de transmission par ligne à débits non hiérarchisés	G.930–G.939
Systèmes de transmission numérique par ligne à supports MRF	G.940–G.949
Systèmes numériques de transmission par ligne	G.950–G.959
Section numérique et systèmes de transmission numériques pour l'accès usager du RNIS	G.960–G.969
Systèmes sous-marins à câbles optiques	G.970–G.979
Systèmes de transmission par ligne optique pour les réseaux locaux et les réseaux d'accès	G.980–G.989
Réseaux d'accès	G.990–G.999

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

Caractéristiques des systèmes de câbles optiques sous-marins à amplification optique

Résumé

La présente Recommandation est consacrée aux spécifications d'interface et de performance des systèmes sous-marins optiques utilisant des amplificateurs à fibres optiques comme répéteurs de ligne. Elle traite des aspects liés aux systèmes à mono-onde (SWS, *single wavelength system*) ainsi qu'aux systèmes à multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDMS, *wavelength division multiplexing system*). L'Annexe A porte sur l'implémentation physique de systèmes sous-marins à fibres optiques et à amplification optique.

Source

La Recommandation G.977 de l'UIT-T, élaborée par la Commission d'études 15 (1997-2000) de l'UIT-T, a été approuvée le 4 avril 2000 selon la procédure définie dans la Résolution 1 de la CMNT.

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

NOTE

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

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

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

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

© UIT 2001

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

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application	1
2	Références normatives	1
3	Termes et définitions	2
3.1	Termes définis dans d'autres Recommandations	2
3.2	Définitions	3
4	Abréviations.....	6
5	Caractéristiques et performance du système.....	8
5.1	Caractéristiques et performance des tronçons de ligne numérique (DLS, <i>digital line section</i>).....	8
5.1.1	Caractéristiques des signaux numériques aux interfaces ITI et TI	8
5.1.2	Caractéristiques d'erreurs globales à l'interface TI	8
5.1.3	Disponibilité du système à l'interface TI	9
5.1.4	Caractéristiques de gigue aux interfaces ITI et TI.....	9
5.1.5	Attribution de la performance aux différentes parties du système	9
5.1.6	Indépendance des tronçons DLS.....	10
5.2	Bilan de puissance optique.....	10
5.2.1	Facteur de qualité (facteur Q, <i>Q factor</i>).....	11
5.2.2	Paramètres applicables pour le bilan de puissance	11
5.3	Fiabilité du système	12
5.4	Mise à niveau de la capacité du système.....	12
6	Caractéristiques et performance des équipements TTE.....	13
6.1	Généralités	13
6.1.1	Définition des points de référence de signaux aux interfaces ITI, TI, SEOI et SCOI	13
6.2	Qualité de transmission.....	13
6.2.1	Caractéristiques du signal numérique à l'interface TI.....	13
6.2.2	Caractéristiques du signal à l'interface SCOI	13
6.2.3	Caractéristiques de gigue à l'interface TI.....	14
6.3	Actions consécutives à une alarme	14
6.4	Commutation automatique.....	14
7	Caractéristiques et performance des répéteurs sous-marins optiques (OSR, <i>optical submarine repeater</i>).....	14
7.1	Caractéristiques mécaniques.....	14
7.1.1	Enceinte du répéteur	14
7.1.2	Unité interne	15
7.1.3	Protection contre la corrosion.....	15

	Page
7.1.4	Résistance à la pression de l'eau 15
7.1.5	Isolement contre les hautes tensions 15
7.1.6	Régulation thermique 15
7.1.7	Étanchéité de l'enceinte du répéteur 15
7.1.8	Contrôle de l'atmosphère ambiante..... 15
7.2	Caractéristiques électriques 15
7.2.1	Modules de puissance 15
7.2.2	Protection contre les surtensions 15
7.3	Caractéristiques optiques 15
7.3.1	Caractéristiques des amplificateurs OFA 15
7.3.2	Paramètres applicables..... 16
7.3.3	Effets de polarisation 16
7.4	Fonctionnalités de surveillance..... 16
7.5	Localisation des pannes 16
7.6	Fiabilité 18
8	Caractéristiques et performance de l'unité de dérivation (BU, <i>branching unit</i>) en ligne 18
8.1	Généralités 18
8.2	Caractéristiques mécaniques..... 18
8.2.1	Enceinte de l'unité de dérivation..... 18
8.2.2	Protection contre la corrosion..... 19
8.2.3	Résistance à la pression de l'eau 19
8.2.4	Isolement contre les hautes tensions..... 19
8.2.5	Régulation thermique 19
8.2.6	Étanchéité de l'enceinte de l'unité de dérivation..... 19
8.2.7	Contrôle de l'atmosphère ambiante..... 19
8.3	Caractéristiques électriques 19
8.3.1	Electrode de mer 19
8.3.2	Commutation de puissance..... 19
8.3.3	Modules de puissance..... 19
8.3.4	Protection contre les surtensions 19
8.4	Caractéristiques optiques 20
8.4.1	Fonctionnalités..... 20
8.4.2	Paramètres applicables..... 20
8.4.3	Effets de polarisation 20
8.5	Fonctionnalités de surveillance..... 20
8.6	Localisation des pannes 20
8.7	Fiabilité 20

	Page	
9	Caractéristiques et performance du câble sous-marin.....	20
9.1	Domaine d'application	20
9.2	Caractéristiques de transmission.....	21
9.3	Caractéristiques des fibres du câble sous-marin	21
9.3.1	Généralités	21
9.3.2	Affaiblissement le long des fibres	22
9.3.3	Non-linéarité des fibres.....	22
9.3.4	Dispersion modale de polarisation (PMD)	22
9.3.5	Dispersion chromatique.....	22
9.4	Caractéristiques mécaniques et résistance à l'environnement.....	23
9.4.1	Protection des fibres par la structure du câble	23
9.4.2	Caractéristiques mécanique des fibres.....	24
9.4.3	Caractéristiques mécaniques du câble	24
9.4.4	Protection du câble	25
9.5	Caractéristiques électriques	25
Annexe A – Implémentation de systèmes de câbles optiques sous-marins avec répéteurs utilisant des amplificateurs à fibres optiques.....		25
A.1	Introduction.....	25
A.2	Configuration du système	25
A.2.1	Constituants d'un système de câbles optiques sous-marins avec répéteurs ...	25
A.2.2	Configuration de transmission.....	26
A.2.3	Surveillance et télémaintenance du système.....	27
A.2.4	Intégration de systèmes.....	27
A.3	Performance du système	27
A.3.1	Bilan de puissance	27
A.3.2	Performance des tronçons de ligne numérique	29
A.4	Exploitation du système.....	29
A.4.1	Communication de terminal à terminal	29
A.4.2	Fonction et caractéristiques de l'équipement de téléalimentation.....	30
A.5	Caractéristiques des répéteurs sous-marins optiques (OSR, <i>optical submarine repeater</i>) et des unités de dérivation.....	31
A.5.1	Généralités	31
A.5.2	Constituants d'un répéteur OSR (ou d'une unité de dérivation).....	31
A.5.3	Surveillance et contrôle	31
A.6	Fabrication	31
A.6.1	Qualité d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques avec répéteurs.....	31
A.6.2	Procédure d'assemblage et de chargement.....	32

	Page
A.7 Installation du système.....	33
A.7.1 Analyse du tracé sous-marin.....	33
A.7.2 Installation des câbles sous-marins.....	33
A.7.3 Installation des câbles terrestres et tests	33
A.7.4 Installation des équipements de stations terminales et tests	33
A.8 Mise en service du système.....	34
A.9 Maintenance.....	34
A.9.1 Maintenance périodique.....	34
A.9.2 Maintenance en mer.....	34

Caractéristiques des systèmes de câbles optiques sous-marins à amplification optique

1 Domaine d'application

La présente Recommandation est consacrée aux spécifications d'interface et de performance des systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques utilisant des amplificateurs à fibres optiques comme répéteurs de ligne. Elle traite des aspects liés aux systèmes à une mono-longueur d'onde (SWS, *single wavelength system*) ainsi qu'aux systèmes à multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDMS, *wavelength division multiplexing system*). Suivant les spécifications du système (nombre de terminaisons, connectivité, capacité totale, distance maximale de bout en bout, coût du système, etc.), l'un de ces deux types de système peut être mieux adapté. On peut acheminer un grand volume de données sur une seule longueur d'onde en utilisant un débit élevé ou sur plusieurs longueurs d'onde en utilisant un débit plus faible.

D'un point de vue général, les caractéristiques et les spécifications de performance des équipements submersibles sont, pour la plupart, identiques pour les systèmes SWS et WDMS. En fait, les systèmes SWS apparaissent comme un cas particulier de systèmes WDMS utilisant une seule longueur d'onde. En conséquence, les indications générales données dans la présente Recommandation s'appliquent aux systèmes SWS comme aux systèmes WDMS. Toutefois, en cas de nécessité, des Recommandations plus détaillées souligneront la spécificité de ces deux types de systèmes.

L'Annexe A porte sur l'implémentation physique de systèmes sous-marins à fibres optiques et à amplification optique.

2 Références normatives

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

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

- [8] UIT-T G.701 (1993), *Vocabulaire relatif à la modulation par impulsions et codage (MIC), au multiplexage et à la transmission numériques.*
- [9] UIT-T G.702 (1988), *Débits binaires de la hiérarchie numérique.*
- [10] UIT-T G.703 (1998), *Caractéristiques physiques et électriques des jonctions numériques hiérarchiques.*
- [11] UIT-T G.707 (1996), *Interface de nœud de réseau pour la hiérarchie numérique synchrone.*
- [12] UIT-T G.708 (1999), *Interface de nœud de réseau infra STM-0 pour la hiérarchie numérique synchrone.*
- [13] UIT-T G.783 (1997), *Caractéristiques des blocs fonctionnels des équipements de la hiérarchie numérique synchrone.*
- [14] UIT-T G.821 (1996), *Caractéristiques d'erreur d'une connexion numérique internationale fonctionnant à un débit inférieur au débit primaire et faisant partie d'un réseau numérique à intégration de services.*
- [15] UIT-T G.823 (1993), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques fondés sur la hiérarchie à 2048 kbit/s.*
- [16] UIT-T G.826 (1999), *Paramètres et objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur pour les conduits numériques internationaux à débit constant égal ou supérieur au débit primaire.*
- [17] UIT-T G.921 (1988), *Sections numériques fondées sur la hiérarchie à 2048 kbit/s.*
- [18] UIT-T G.955 (1996), *Systèmes de ligne numériques des hiérarchies à 1544 kbit/s et à 2048 kbit/s sur câbles à fibres optiques.*
- [19] UIT-T G.957 (1999), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone.*
- [20] UIT-T G.958 (1994), *Systèmes de ligne numérique fondés sur la hiérarchie numérique synchrone, pour utilisation sur câbles à fibres optiques.*
- [21] UIT-T G.664 (1999), *Procédures et prescriptions de sécurité optique applicables aux systèmes de transport optiques.*
- [22] UIT-T G.692 (1998), *Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques.*
- [23] UIT-T G.971 (2000), *Caractéristiques générales des systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques.*
- [24] UIT-T G.972 (1997), *Définition des termes relatifs aux systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques.*
- [25] UIT-T G.975 (1996), *Correction directe d'erreur pour les systèmes sous-marins.*
- [26] UIT-T G.976 (1997), *Méthodes de test applicables aux systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques.*

3 Termes et définitions

3.1 Termes définis dans d'autres Recommandations

La présente Recommandation utilise les termes suivants définis dans d'autres Recommandations.

- charge de rupture d'un câble: voir UIT-T G.972 [24];
- facteur de compression: voir UIT-T G.976 [26];
- tronçon de ligne numérique (DLS, *digital line section*): voir UIT-T G.701 [8];

- câble à double armure: voir UIT-T G.972 [24];
- charge de rupture des fibres d'un câble: voir UIT-T G.972 [24];
- correction d'erreur directe (FEC, *forward error correction*): voir UIT-T G.972 [24] et G.975 [25];
- platitude du gain: voir UIT-T G.976 [26];
- différence maximale de puissance entre canaux: voir UIT-T G.692 [22];
- rayon de courbure minimal d'un câble: voir UIT-T G.972 [24];
- préfixe de tronçon de multiplex (MSOH, *multiplex section overhead*): voir UIT-T G.783 [13];
- facteur de bruit: voir UIT-T G.661 [6];
- gain nominal: voir UIT-T G.976 [26];
- résistance nominale à la traction pendant les manipulations: voir UIT-T G.972 [24];
- résistance nominale permanente à la traction: voir UIT-T G.972 [24];
- niveau nominal d'entrée du signal: voir UIT-T G.976 [26];
- niveau nominal de sortie du signal: voir UIT-T G.976 [26];
- résistance nominale transitoire à la traction: voir UIT-T G.972 [24];
- amplificateur à fibres optiques (OFA, *optical fibre amplifier*): voir UIT-T G.661 [6];
- variation du gain en fonction de la polarisation: voir UIT-T G.661 [6];
- affaiblissement dû à la polarisation: voir UIT-T G.661 [6];
- saturation spectralement sélective due à la polarisation: voir UIT-T G.661 [6];
- dispersion modale de polarisation: voir UIT-T G.661 [6];
- câble superarmé: voir UIT-T G.972 [24];
- points de référence S', R': voir UIT-T G.661 [6] et G.662 [7];
- points de référence S, R: voir UIT-T G.955 [18] et G.957 [19];
- câble à simple armure: voir UIT-T G.972 [24];
- gain pour les petits signaux: voir UIT-T G.661 [6];
- hiérarchie numérique synchrone (SDH, *synchronous digital hierarchy*): voir UIT-T G.708 [12];
- module de transport synchrone (STM, *synchronous transport module*): voir UIT-T G.708 [12].

3.2 Définitions

La présente Recommandation utilise les définitions suivantes. Les Figures 1, 2 et 3, qui illustrent ces définitions, décrivent un équipement terminal de système WDMS. Dans le cas d'un système SWS, l'interface optique multiplexeur/démultiplexeur doit être supprimée de manière à ne considérer qu'une seule longueur d'onde.

3.2.1 canal optique de ligne (LOC, *line optical channel*): canal de transmission de données optique bidirectionnel fonctionnant à une fréquence/longueur d'onde optique particulière pour chaque sens de transmission.

3.2.2 système mono-onde (SWS, *single wavelength system*): système optique bidirectionnel ne comportant qu'un seul canal LOC.

- 3.2.3 multiplex par répartition en longueur d'onde (WDM, *wavelength division multiplex*):** ensemble de plusieurs canaux LOC devant constituer tout ou partie de la ligne sous-marine sur une même fibre.
- 3.2.4 système à multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDMS, *wavelength division multiplexing system*):** système optique bidirectionnel comportant plusieurs canaux LOC.
- 3.2.5 N-WDM:** multiplex WDM de N canaux LOC (N étant un entier).
- 3.2.6 multiplexeur de longueur d'onde (WM, *wavelength multiplexer*):** équipement nécessaire à la combinaison de plusieurs canaux LOC et/ou multiplex WDM provenant de différentes fibres en un multiplex WDM commun comprenant tous les canaux LOC combinés.
- 3.2.7 démultiplexeur de longueur d'onde (WD, *wavelength demultiplexer*):** équipement nécessaire à la subdivision d'un multiplex WDM en plusieurs canaux LOC et/ou multiplex WDM ayant pour support différentes fibres.
- 3.2.8 équipement terminal de transmission (TTE, *terminal transmission equipment*):** équipement inclus dans la partie terrestre d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques pour les opérations de multiplexage et démultiplexage au niveau du terminal de transmission, le codage et la conversion des affluents entrants en signal de ligne optique, la conversion et le décodage du signal de ligne optique reçu en affluents sortants, la commutation de protection sous-marine et la supervision des installations sous-marines et la terminaison optique de câble.
- 3.2.9 interface optique de câble sous-marin (SCOI, *submarine cable optical interface*):** interface optique bidirectionnelle entre le câble sous-marin (y compris le tronçon de câble terrestre) et l'équipement TTE. Elle est composée d'un canal LOC ou d'un multiplex WDM.
- 3.2.10 LOC-TTE:** équipement TTE dont l'interface SCOI est composée d'un seul canal LOC.
- 3.2.11 WDM-TTE:** équipement TTE doté d'un multiplexeur WM et d'un démultiplexeur WD, dont l'interface SCOI est un multiplex WDM.
- 3.2.12 interface électro-optique sous-marine (SEOI, *submarine electro-optic interface*):** interface bidirectionnelle à l'intérieur de l'équipement TTE où sont exécutées la conversion électro-optique et la régénération optique entre un canal LOC et un canal électrique.
- 3.2.13 tronçon de ligne numérique sous-marine (SDLS, *submarine digital line section*):** trajet optique continu bidirectionnel le long duquel un canal LOC relie deux équipements TTE au niveau de leurs interfaces SEOI.
- 3.2.14 interface terrestre (TI, *terrestrial interface*):** interface entre le système sous-marin et le réseau terrestre.
- 3.2.15 interface terrestre intermédiaire (ITI, *intermediate terrestrial interface*):** il est à noter que l'équipement TTE peut être composé de deux équipements distincts reliés par une interface: le premier – appelé équipement terminal de transmission de câble sous-marin (SCTTE, *submarine cable transmission terminal equipment*) – étant du côté câble sous-marin et le second – appelé équipement terminal de transmission de réseau terrestre (TNTTE, *terrestrial network transmission terminal equipment*) – étant du côté réseau terrestre. Dans ce cas, il faut une interface intermédiaire pour relier les deux équipements. Cette interface est composée d'interfaces de données bidirectionnelles et, au besoin, d'une liaison supplémentaire servant à échanger des informations entre les deux équipements de l'équipement TTE.
- 3.2.16 liaison ombilicale:** liaison supplémentaire servant, au niveau de l'interface ITI, à échanger des informations entre les deux équipements de l'équipement TTE (équipement SCTTE et équipement TNTTE).
- 3.2.17 unité de dérivation (BU, *branching unit*):** équipement sous-marin optique inséré dans la partie sous-marine d'un réseau de transmission par câble sous-marin à fibres optiques dans lequel il faut interconnecter électriquement et optiquement trois tronçons de câble.

3.2.18 unité de dérivation avec extraction de toutes les fibres optiques (FFD-BU, *full fibre drop BU*): unité de dérivation dans laquelle l'interconnexion optique des trois câbles sous-marins est réalisée par le raccordement physique de toutes les paires de fibres entre les câbles.

3.2.19 WDM-BU: unité de dérivation dans laquelle l'interconnexion optique des trois câbles sous-marins est réalisée par l'intermédiaire d'un multiplexeur WM et d'un démultiplexeur WD, c'est-à-dire par l'insertion et l'extraction d'un ou de plusieurs canaux LOC de multiplex N-WDM.

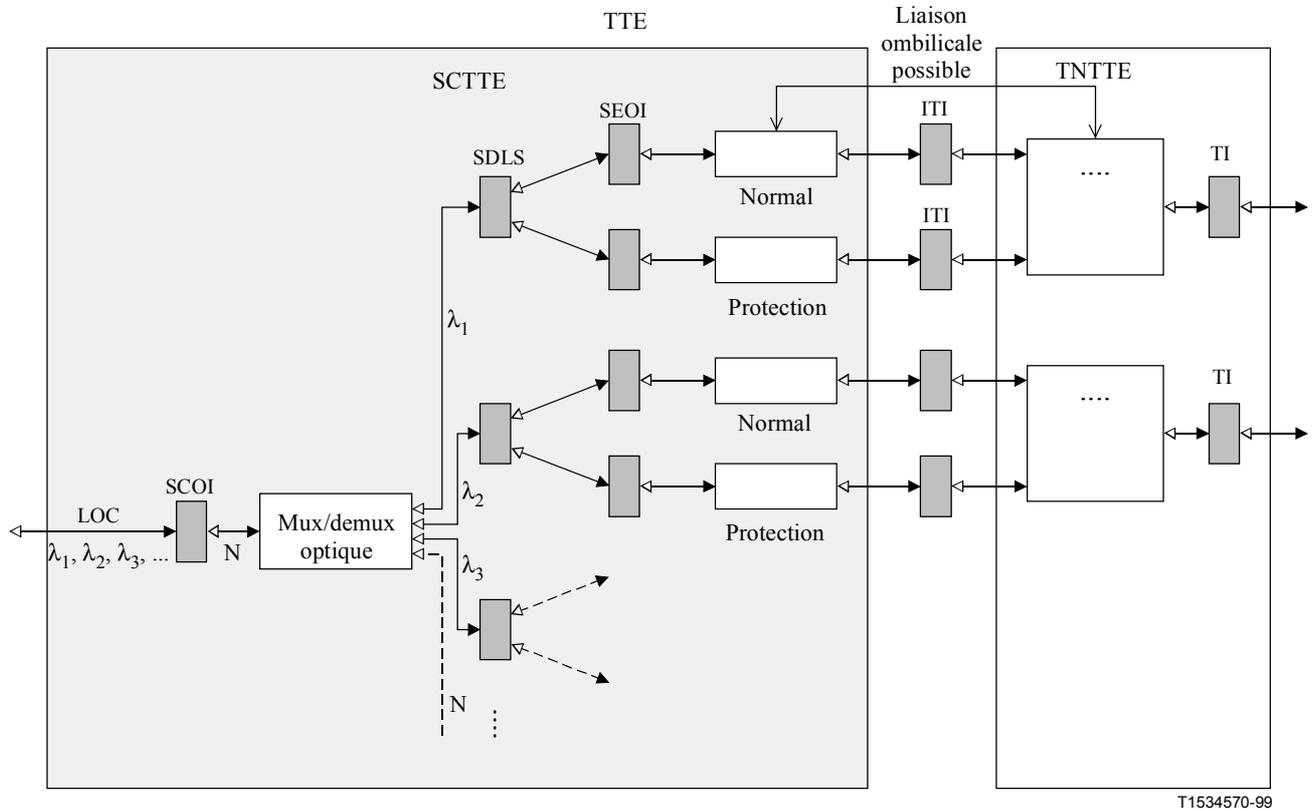


Figure 1/G.977 – Illustrations relatives au paragraphe 3: Termes et définitions

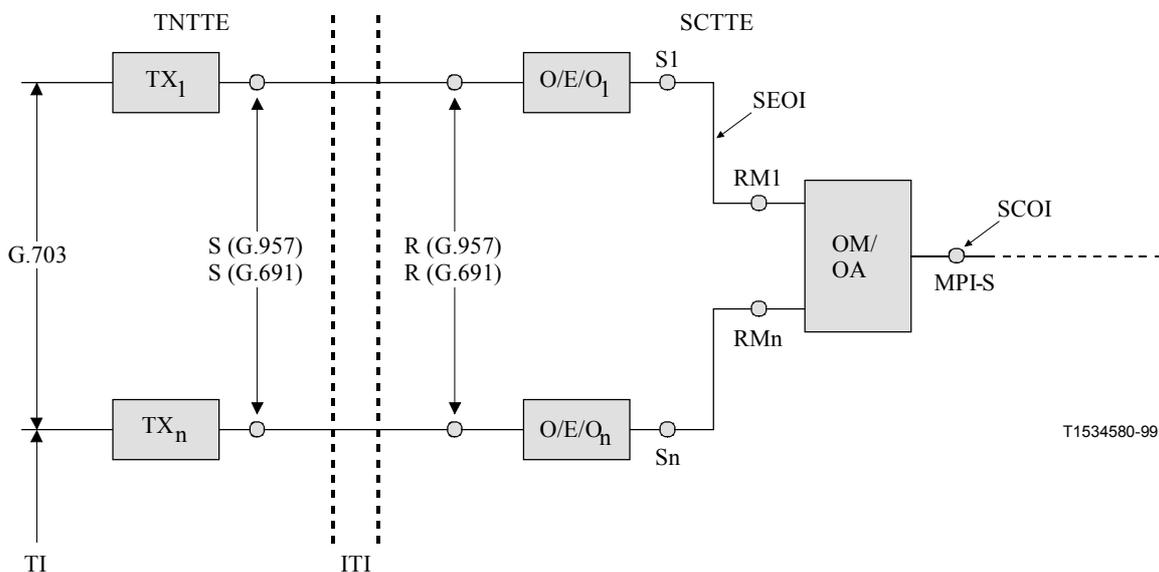


Figure 2/G.977 – Côté émission

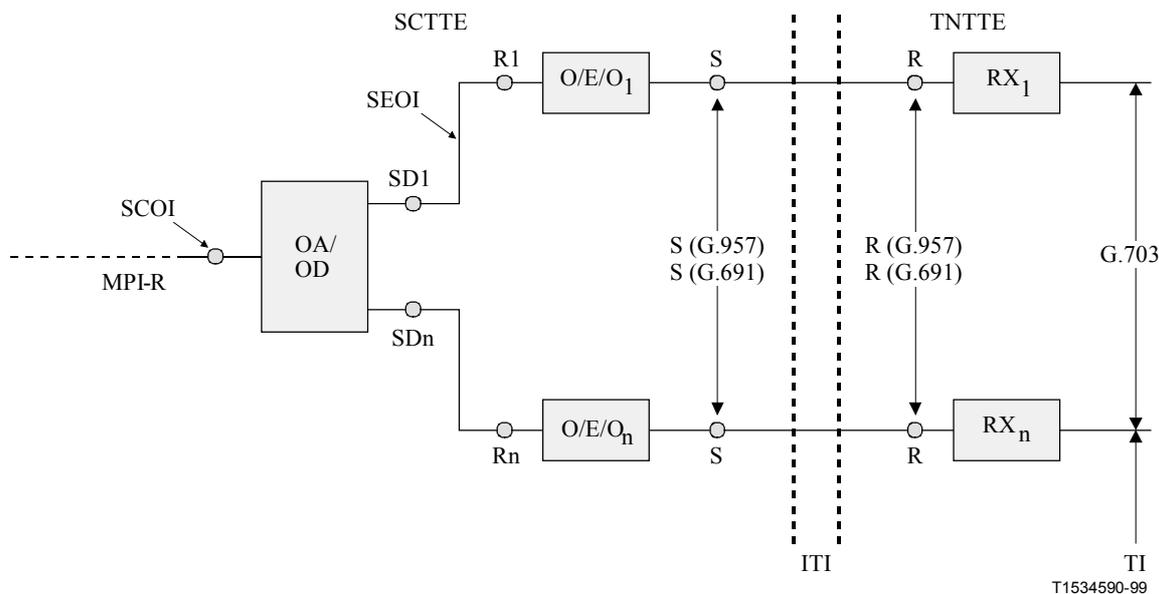


Figure 3/G.977 – Côté réception

4 Abréviations

La présente Recommandation UIT-T utilise les abréviations suivantes:

Aeff	surface efficace (<i>effective area</i>)
ALC	commande automatique de niveau (<i>automatic level control</i>)
APR	réduction automatique de puissance (<i>automatic power reduction</i>)
BER	taux d'erreurs sur les bits (<i>bit error ratio</i>)
BOL	début de vie (<i>begin of life</i>)
BU	unité de dérivation (<i>branching unit</i>)
CF	facteur de compression (<i>compression factor</i>)
COTDR	réflectométrie optique temporelle cohérente (<i>coherence optical time domain reflectometry</i>)
CSF	fibre monomode à longueur d'onde de coupure décalée (<i>cut-off shifted single mode fibre</i>)
DCF	fibre monomode à compensation de dispersion (<i>dispersion compensation single mode fibre</i>)
DLS	tronçon de ligne numérique (<i>digital line section</i>)
DSF	fibre monomode à dispersion décalée (<i>dispersion shifted single mode fibre</i>)
EDF	fibre dopée à l'erbium (<i>erbium doped fibre</i>)
EOL	fin de vie (<i>end of life</i>)
FFD-BU	unité de dérivation avec extraction de toutes les fibres optiques (<i>full fibre drop-branching unit</i>)
FWM	mélange de quatre ondes (<i>four-wave mixing</i>)
GF	platitude du gain (<i>gain flatness</i>)

ITI	interface terrestre intermédiaire
LOC	canal optique de ligne (<i>line optical channel</i>)
LOC-TTE	équipement terminal de transmission à un seul canal optique de ligne (<i>line optical channel-terminal transmission equipment</i>)
MPI	interface principale sur le trajet (<i>main path interface</i>)
MPI-R	point de référence de réception de l'interface principale sur le trajet (<i>receive main path interface reference point</i>)
MPI-S	point de référence d'émission de l'interface principale sur le trajet (<i>source main path interface reference point</i>)
MSOH	préfixe de section de multiplexage (<i>multiplex section overhead</i>)
NDSF	fibre optique à dispersion non décalée (<i>non-dispersion shifted fibre</i>)
NF	facteur de bruit (<i>noise figure</i>)
NG	gain nominal (<i>nominal gain</i>)
NRZ	non-retour à zéro (<i>no return to zero</i>)
NSIP	puissance nominale d'entrée du signal (<i>nominal signal input power</i>)
NSOP	puissance nominale de sortie du signal (<i>nominal signal output power</i>)
N-WDM	multiplex par répartition en N longueurs d'onde (<i>N-wavelength division multiplex</i>)
NZDSF	fibre à dispersion décalée non nulle (<i>non-zero dispersion shifted fibre</i>)
OFA	amplificateur à fibres optiques (<i>optical fibre amplifier</i>)
OSR	répéteur sous-marin optique (<i>optical submarine repeater</i>)
PDG	variation du gain en fonction de la polarisation (<i>polarization dependent gain</i>)
PDH	hiérarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous digital hierarchy</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 modale de polarisation (<i>polarization mode dispersion</i>)
RZ	retour à zéro (<i>return to zero</i>)
SCOI	interface de sortie de câble sous-marin (<i>submarine cable output interface</i>)
SDH	hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SDLS	tronçon de ligne numérique sous-marine (<i>submarine digital line section</i>)
SEOI	interface de sortie électro-optique sous-marine (<i>submarine electro-optic output interface</i>)
SSG	gain pour les petits signaux (<i>small signal gain</i>)
STM	module de transport synchrone (<i>synchronous transport module</i>)
SWS	système mono-onde (<i>single wavelength system</i>)
TI	interface terrestre (<i>terrestrial interface</i>)
TSE	équipement terminal de station (<i>terminal station equipment</i>)
TTE	équipement terminal de transmission (<i>terminal transmission equipment</i>)

WD	démultiplexeur de longueur d'onde (<i>wavelength demultiplexing</i>)
WDM	multiplex par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplex</i>)
WDM-BU	unité de dérivation à multiplex par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplex-branching unit</i>)
WDMS	système à multiplexage par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplexing system</i>)
WDM-TTE	équipement terminal de transmission à multiplex par répartition en longueur d'onde (<i>wavelength division multiplex-terminal transmission equipment</i>)
WM	multiplexeur de longueur d'onde (<i>wavelength multiplexing</i>)

5 Caractéristiques et performance du système

5.1 Caractéristiques et performance des tronçons de ligne numérique (DLS, *digital line section*)

Les tronçons de ligne numérique du système doivent être conformes aux Recommandations applicables de l'UIT-T.

5.1.1 Caractéristiques des signaux numériques aux interfaces ITI et TI

A l'interface TI, les signaux numériques doivent être conformes aux UIT-T G.702 [9], G.703 [10], G.707 [11] et G.957 [19] applicables.

A l'interface ITI, il est recommandé que les signaux numériques soient conformes aux paramètres physiques décrits dans UIT-T G.957 [19].

5.1.2 Caractéristiques d'erreurs globales à l'interface TI

Les caractéristiques d'erreurs d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques doivent être conformes aux Recommandations applicables de l'UIT-T en ce qui concerne la durée de vie nominale du système (par exemple UIT-T G.821 [14] pour les interfaces PDH et UIT-T G.826 [16] pour les interfaces SDH).

Pour les systèmes PDH, les paramètres applicables – minutes avec dégradation, secondes gravement erronées et secondes erronées – découlent de l'UIT-T G.821 [14] conjointement avec les caractéristiques à 64 kbit/s pour un km. L'UIT-T G.821 [14] (Annexe D), *Livre bleu*, donne des informations sur la projection des caractéristiques de système à 64 kbit/s.

Pour les systèmes SDH, les paramètres applicables – secondes gravement erronées et secondes erronées – découlent de l'UIT-T G.826 [16].

5.1.3 Disponibilité du système à l'interface TI

Pour les interfaces PDH:

- la caractéristique de temps de disponibilité découle de l'UIT-T G.821 [14] (Annexe A), *Livre bleu*, pour un km. L'attribution pour chaque tronçon DLS est obtenue en multipliant l'attribution pour un km par la longueur du tronçon DLS;
- conformément à l'Annexe A de l'UIT-T G.821 [14], *Livre bleu*, une période d'indisponibilité commence lorsque le taux d'erreurs sur les bits (BER, *bit error ratio*) pour chaque seconde est supérieur à 1.10^{-3} pendant dix secondes consécutives, lesquelles sont considérées comme faisant partie du temps d'indisponibilité. La période d'indisponibilité se termine lorsque le taux BER pour chaque seconde est inférieur à 1.10^{-3} pendant dix secondes consécutives, lesquelles sont considérées comme faisant partie du temps de disponibilité.

Pour les interfaces SDH:

- la caractéristique de temps d'indisponibilité et sa définition découlent de l'UIT-T G.826 [16].

Il est clair que la disponibilité du système dépend de la disponibilité aux diverses interfaces TI. Il est recommandé de définir l'indisponibilité du système pendant une période quelconque comme le cumul temporel de toutes les indisponibilités aux interfaces TI pendant cette période (il convient de ne pas cumuler plusieurs indisponibilités aux interfaces TI se produisant dans le même intervalle temporel).

La spécification de l'indisponibilité s'applique au temps d'indisponibilité dû à la défaillance d'un composant du système et inclut par exemple les opérations de commutation, les pannes de terminal et les opérations de surveillance et de maintenance conduisant à des interruptions d'une durée égale ou supérieure à dix secondes. Elle n'inclut pas les pannes causées par des facteurs externes (chaluts, ancres, alimentation d'équipement TTE, etc.) ni les périodes pendant lesquelles l'alimentation du système est coupée pour cause de réparation. De même, les pannes nécessitant l'intervention d'un navire ne sont pas incluses dans le calcul du temps d'indisponibilité.

5.1.4 Caractéristiques de gigue aux interfaces ITI et TI

Les caractéristiques de gigue d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques aux interfaces ITI et TI doivent être conformes aux UIT-T G.823 [15], G.957 [19] et aux autres Recommandations applicables pendant la durée de vie nominale du système.

5.1.5 Attribution de la performance aux différentes parties du système

La performance de bout en bout pour un tronçon de ligne numérique (DLS) donné est obtenue en multipliant l'attribution spécifiée pour un km par la longueur du tronçon DLS. Lorsqu'il faut attribuer une dégradation de la performance à différentes parties du tronçon DLS, une valeur correspondant à une longueur fixe (habituellement 125 km) est attribuée à chaque équipement terminal de station et une valeur égale à la différence entre la spécification pour le tronçon DLS et l'attribution aux terminaux est attribuée à la partie sous-marine km par km.

5.1.6 Indépendance des tronçons DLS

Les défaillances, opérations de maintenance, opérations de surveillance, etc., sur un tronçon DLS quelconque ne doivent pas avoir d'incidence sur la performance spécifiée des autres tronçons DLS du système. En particulier:

- a) pour les systèmes WDMS:
 - 1) les défaillances concernant la moitié ou moins des canaux LOC à l'intérieur d'un multiplex WDM ne doivent pas avoir d'effet sur les autres canaux LOC du multiplex WDM;
- b) pour les systèmes SWS et WDMS:
 - 1) les défaillances concernant une paire de fibres ne doivent pas avoir d'effet sur les autres paires de fibres du système;
 - 2) les défaillances concernant des affluents à n'importe quel niveau de multiplexage ou de démultiplexage (optique ou électrique) du système ne doivent pas avoir d'effet sur les autres parties du système.

Les effets à court terme des transitoires doivent normalement être considérés comme tolérables, si leur risque d'occurrence est faible.

5.2 Bilan de puissance optique

Les tableaux de bilan de puissance optique doivent décrire la manière dont la performance du système sera atteinte en ce qui concerne les caractéristiques d'erreur.

Dans les systèmes sous-marins comportant des amplificateurs optiques en ligne, la régénération n'intervient que dans les équipements TTE au niveau de l'interface SEOI. Entre deux équipements TTE, les canaux subiront des dégradations dues par exemple à l'accumulation ou à la propagation de bruit optique (non-linéarités des fibres, dispersion chromatique). Il est donc recommandé d'établir un bilan de puissance optique au niveau des tronçons SDLS. Etant donné que certains systèmes pourront comporter plusieurs tronçons SDLS présentant des dégradations différentes, il est en outre recommandé d'établir un bilan de puissance optique pour chacun de ces tronçons SDLS.

Par ailleurs, dans certains cas (réseaux WDM avec unité de dérivation WDM-BU par exemple), les deux sens peuvent subir des dégradations différentes: dans ce cas, un bilan de puissance peut être établi pour chaque sens du tronçon SDLS en question et le bilan pour lequel les dégradations sont les plus fortes doit être considéré comme le bilan de puissance du tronçon SDLS.

En outre, lorsqu'un système comportant plusieurs points d'atterrissage a été optimisé pour le tronçon SDLS le plus long en termes de dégradation du rapport signal/bruit optique et d'espacement des répéteurs, des marges supplémentaires peuvent être prévues pour les tronçons plus courts. Ces marges, généralement appelées marges non attribuées du fournisseur, doivent être clairement indiquées dans les tableaux de bilan de puissance.

Pour chaque tronçon SDLS, il est recommandé d'établir deux bilans de puissance distincts, l'un pour le début de vie (BOL, *begin of life*) et l'autre pour la fin de vie (EOL, *end of life*):

- le bilan de puissance pour le début de vie est représentatif de la performance du tronçon SDLS lorsque le système est mis en service et sert de repère pour les résultats des tests réalisés à ce moment-là. Il est recommandé d'inclure dans ce bilan de puissance une marge garantie pour assurer la conformité aux conditions de fin de vie;
- le bilan de puissance pour la fin de vie est représentatif de la performance du système à la fin de la durée de vie nominale et doit inclure les dégradations dues au vieillissement et aux défaillances des composants ainsi qu'au vieillissement des câbles et spécifier des marges pour les réparations.

Le fournisseur doit donner suffisamment d'informations pour justifier la validité des tableaux de bilan de puissance, notamment – la liste n'est pas exhaustive – i) la valeur nominale de la puissance de sortie du répéteur, ii) la valeur nominale du facteur de bruit, iii) les valeurs de largeur de bande optique et électrique côté récepteur, servant au calcul du bilan de puissance. Le fournisseur doit également préciser si un dispositif quelconque situé soit au niveau de l'émetteur ou du récepteur (embrouilleur de polarisation par exemple) soit dans les installations submersibles (filtre d'égalisation par exemple) est supposé améliorer la qualité de transmission.

5.2.1 Facteur de qualité (facteur Q, *Q factor*)

Il est recommandé d'utiliser le facteur Q dans le bilan de puissance de chaque tronçon SDLS comme décrit dans l'UIT-T G.976 [26] et d'exprimer les dégradations en termes de dégradation du facteur Q.

La performance d'un tronçon SDLS doit être caractérisée par la mesure de son facteur Q ou par une mesure directe du taux BER devant permettre de retrouver la limite contractuelle du facteur Q pour la mise en service indiquée dans le bilan de puissance.

5.2.2 Paramètres applicables pour le bilan de puissance

Il est recommandé, dans le bilan de puissance, de tenir compte au moins des dégradations suivantes:

- dégradations dues à l'accumulation de bruit optique;
- dégradations de propagation dues aux effets combinés de la dispersion chromatique, des effets de Kerr non linéaires, des effets du mélange de quatre ondes entre les canaux LOC et avec le bruit, de la diffusion Raman stimulée;

- dégradations de propagation dues aux effets de polarisation optique (dispersion modale de polarisation (PMD, *polarization mode dispersion*), affaiblissement dû à la polarisation (PDL, *polarization dependent loss*), variation du gain en fonction de la polarisation (PDG, *polarization dependent gain*), etc.). Etant donné que ces dégradations fluctuent dans le temps, il faut tenir compte séparément des variations de performance dans le temps;
- dégradations dues à la non-platitude de la courbe de gain cumulatif sur la totalité du segment;
- dégradations dues à un mauvais réglage de la ou des longueurs d'onde du tronçon SDLS;
- dégradations dues à un mauvais réglage des puissances optiques relatives des canaux LOC à l'intérieur d'un multiplex WDM. Ces dégradations s'appliquent aux systèmes sous-marins utilisant des multiplex WDM. Il faut en tenir compte à chaque multiplexage de longueur d'onde;
- dégradations dues aux fonctions de supervision et de localisation des pannes;
- dégradations dues aux imperfections des équipements TTE (liées aux caractéristiques de facteur Q de boucle des équipements TTE).

Le mélange de quatre ondes entre canaux LOC, la diffusion Raman stimulée, la non-platitude de la courbe de gain cumulatif et le mauvais réglage des puissances optiques relatives des canaux LOC causent des dégradations qui s'appliquent tout spécialement aux systèmes WDMS étant donné qu'elles sont dues à la propagation de plusieurs signaux optiques sur la même fibre.

Par ailleurs, pour le bilan de puissance en fin de vie, il faut tenir compte des dégradations suivantes:

- dégradations dues aux opérations de réparation (épissures de réparation, longueur de câble supplémentaire après réparation).
- dégradations dues au vieillissement des câbles et des composants.
- dégradations dues au vieillissement des équipements TTE (diminution de la valeur du facteur Q de boucle des équipements TTE).
- dégradations dues aux pannes prévisibles de certains composants (pannes de lasers de pompage par exemple).

En ce qui concerne les dégradations dues aux opérations de réparation, il faut tenir compte des différents types de scénarios de réparation de câble étant donné que les dégradations sont différentes selon que le câble est situé en eau peu profonde, en eau profonde ou dans la partie terrestre (entre le littoral et la station terrestre).

En outre, dans le bilan de puissance, il faut clairement indiquer le facteur Q minimal requis pour obtenir les caractéristiques d'erreurs spécifiées pour le système et préciser l'amélioration de marge découlant de l'utilisation de la correction FEC (si cela est applicable).

5.3 Fiabilité du système

La fiabilité de la partie sous-marine d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques est généralement caractérisée par:

- le nombre prévisible de réparations nécessitant l'intervention d'un navire câblé et dues à des défaillances de composants du système au cours de la durée de vie nominale du système: la spécification habituelle concernant la fiabilité du système est de moins de trois défaillances nécessitant l'intervention d'un navire câblé au cours de la durée de vie nominale du système.

- la durée de vie nominale du système:

il s'agit de la période pendant laquelle le système de câbles sous-marins à fibres optiques est censé être opérationnel conformément à ses spécifications de performance. Cette durée est généralement de 25 ans à compter de la date d'acceptation provisoire du système, c'est-à-dire la date après l'installation à laquelle le système est conforme aux spécifications de performance.

5.4 Mise à niveau de la capacité du système

Etant donné que les amplificateurs à fibres optiques (OFA, *optical fibre amplifier*) ont une large bande de gain et présentent une certaine souplesse du point de vue du débit, il peut être avantageux d'augmenter la capacité de transmission en augmentant le débit des signaux et/ou le nombre de canaux de transmission (WDM). Une telle mise à niveau peut être bénéfique car la réutilisation de câbles longs, de nombreux amplificateurs en ligne et d'équipements de téléalimentation peut se faire de façon rentable sur toute la durée de vie des équipements (généralement 25 ans).

Pour la mise à niveau par augmentation du débit, il faut que les systèmes comportent des câbles et des amplificateurs en ligne optimisés pour un débit plus élevé, tandis qu'on peut utiliser au départ les équipements TTE à plus faible débit. Même après mise à niveau, le débit à la sortie des équipements TTE doit être conforme aux spécifications SDH pour assurer la compatibilité avec les équipements terrestres standard.

Pour la mise à niveau par utilisation de la technique WDM, il faut aussi que les câbles et les amplificateurs en ligne installés au départ conviennent pour le système comportant le nombre maximal de canaux prévus ultérieurement.

Les deux types de mises à niveau sont très différentes à bien des égards (caractéristiques et commande des amplificateurs à fibres, bilan de puissance, rapport signal/bruit, dispersion chromatique des fibres, non-linéarités des fibres, etc.). Il est donc recommandé de concevoir correctement les systèmes compte tenu des éventuelles mises à niveau ultérieures.

6 Caractéristiques et performance des équipements TTE

6.1 Généralités

Un équipement terminal est conçu pour assembler les affluents en vue de leur transmission dans le système de câbles sous-marins à fibres optiques et pour assurer des fonctionnalités de surveillance et de maintenance.

6.1.1 Définition des points de référence de signaux aux interfaces ITI, TI, SEOI et SCOI

Référence étant faite aux Figures 2 et 3, il convient de spécifier la liste minimale suivante de paramètres pour les interfaces de référence E/O:

- a) les interfaces TI et ITI sont conformes aux UIT-T G.703 [10], UIT-T G.957 [19];
- b) pour les points S1, Sn à la sortie des interfaces O/E/O, il faut au moins spécifier les paramètres suivants:
 - 1) caractéristiques spectrales;
 - 2) puissance injectée moyenne;
 - 3) taux d'extinction;
 - 4) fréquence des canaux;
 - 5) espacement des canaux;
 - 6) écart de fréquence des canaux;

- 7) format de modulation (RZ, NRZ);
- 8) débit;
- c) pour le point MPI-S, il faut au moins spécifier les paramètres suivants:
 - 1) différence maximale de puissance entre canaux;
 - 2) puissance de sortie des canaux;
 - 3) rapport signal/bruit des canaux;
- d) pour le point MPI-R, il faut au moins spécifier les paramètres suivants:
 - 1) rapport signal/bruit des canaux (en fonction du débit et de l'implémentation d'une correction FEC);
 - 2) différence maximale de puissance entre canaux;
- e) pour les points R1, Rn à l'entrée des interfaces O/E/O, il faut au moins spécifier les paramètres suivants:
 - 1) sensibilité du récepteur (si la correction FEC est exclue);
 - 2) surcharge du récepteur;
 - 3) plage de longueurs d'onde du récepteur;
 - 4) rapport signal/bruit optique.

6.2 Qualité de transmission

6.2.1 Caractéristiques du signal numérique à l'interface TI

Le signal numérique à l'interface TI doit être conforme aux Recommandations applicables de l'UIT-T.

6.2.2 Caractéristiques du signal à l'interface SCOI

A compléter.

6.2.3 Caractéristiques de gigue à l'interface TI

Les caractéristiques de gigue des équipements TTE d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques doivent être conformes à l'UIT-T G.823 [15] tout au long de la durée de vie nominale du système. En particulier:

- la tolérance de gigue, pour chaque tronçon de ligne numérique, à l'interface d'entrée du système;
- la gigue maximale à la sortie, pour chaque tronçon de ligne numérique, à l'interface de sortie du système;
- la caractéristique de transfert de gigue lorsque le terminal est dans une configuration de boucle, pour chaque tronçon de ligne numérique, entre l'interface d'entrée et l'interface de sortie du système,

doivent être conformes à l'UIT-T G.823 [15].

Pour les systèmes PDH, les caractéristiques de gigue des équipements TTE (tolérance de gigue, gigue maximale à la sortie, caractéristique de transfert de gigue) à l'interface TI de sortie n'ont à être compatibles qu'avec la spécification de chaque système.

Pour les systèmes SDH, les caractéristiques de gigue des équipements TTE (tolérance de gigue, gigue maximale à la sortie, caractéristique de transfert de gigue) à l'interface optique doivent être conformes à l'UIT-T G.957 [19].

6.3 Actions consécutives à une alarme

Il convient d'aligner la présente Recommandation sur l'UIT-T G.664 [21], en soulignant qu'aucune procédure d'arrêt n'est nécessaire si la puissance totale de sortie de l'amplificateur est dans la catégorie 3A (<+17 dBm). En outre, aucune procédure d'arrêt ne doit être appliquée aux équipements submersibles car l'interface SCOI est intrinsèquement sûre. Tout équipement terminal dépassant la catégorie 3A doit inclure une fonctionnalité de réduction automatique de puissance (APR) afin d'être conforme aux exigences de l'UIT-T G.664 [21].

6.4 Commutation automatique

En cas d'utilisation de la commutation automatique pour répondre à l'exigence globale de disponibilité:

- la dégradation de trafic due à la commutation doit être réduite au minimum et compatible avec la performance globale du système;
- il faut indiquer quels équipements sont en service;
- il doit être possible de neutraliser manuellement la commutation automatique tout en assurant une dégradation minimale de la performance du système.

Suivant l'architecture des équipements TTE, les équipements de secours peuvent être maintenus en service partiellement ou entièrement et surveillés comme les équipements de service.

7 Caractéristiques et performance des répéteurs sous-marins optiques (OSR, *optical submarine repeater*)

7.1 Caractéristiques mécaniques

7.1.1 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 de la performance mécanique, électrique et optique. Les enceintes mixtes doivent supporter le transfert de lourdes charges depuis le câble sous-marin via un couplage souple.

7.1.2 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.

7.1.3 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.

7.1.4 Résistance à la pression de l'eau

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

7.1.5 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.

7.1.6 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.

7.1.7 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.

7.1.8 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.

7.2 Caractéristiques électriques

7.2.1 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.

7.2.2 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).

7.3 Caractéristiques optiques

7.3.1 Caractéristiques des amplificateurs OFA

Les amplificateurs OFA utilisent des fibres dopées à l'erbium (EDF, *erbium doped fibre*) pour amplifier le signal optique. La fibre EDF peut être pompée dans le sens de la propagation ou dans le sens inverse par un ou plusieurs lasers de pompage redondants. Des isolateurs optiques peuvent être inclus pour garantir une bonne stabilité contre les réflexions optiques. On peut recourir à une commande automatique du niveau (ALC, *automatic level control*) pour réguler le niveau optique de sortie.

Il faut prévoir des fonctionnalités de surveillance pour contrôler à distance l'état et la performance des amplificateurs OFA.

7.3.2 Paramètres applicables

L'UIT-T G.661 [6] définit les paramètres génériques relatifs aux amplificateurs OFA et donne des méthodes de mesure. Plus particulièrement, pour les liaisons optiques amplifiées de systèmes SWS ou WDMS à grande distance, il faut prendre en considération 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*).

De plus, surtout pour les systèmes WDMS, il faut aussi prendre en considération le paramètre suivant:

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

7.3.3 Effets de polarisation

Chacun des composants optiques d'un amplificateur OFA peut être choisi de sorte que sa performance soit raisonnablement insensible aux 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 comme l'embrouillage de polarisation du signal dans l'émetteur de l'équipement TTE.

7.4 Fonctionnalités de surveillance

Il faut prévoir un système de surveillance pour contrôler, depuis la station terrestre, l'état et la performance des amplificateurs OFA. Ce système doit pouvoir fonctionner lorsque la liaison est en service sans perturber la performance du système.

7.5 Localisation des pannes

Un point de rupture de câble est généralement situé dans une partie hors service. Dans ce cas, on utilise généralement la réflectométrie OTDR, en particulier la réflectométrie COTDR est efficace pour la localisation des pannes dans les systèmes à amplificateurs OFA à grande distance en raison de sa plus grande sensibilité et de sa meilleure sélectivité en fréquence.

Si des isolateurs optiques sont utilisés dans chaque amplificateur OFA, l'impulsion optique rétrodiffusée, qui est indispensable pour la mesure de la réflectométrie OTDR, est bloquée. Pour résoudre ce problème, une solution consiste à utiliser un trajet de retour (trajet de réflectométrie COTDR) qui ne doit pas perturber le trafic en service comme indiqué sur la figure. La dégradation de transmission causée par le trajet de réflectométrie COTDR doit être prise en considération dans le bilan de puissance. Lorsqu'on a recours à une telle solution, on peut implémenter des fonctionnalités de réflectométrie COTDR dans les systèmes à amplificateurs OFA pour surveiller l'état de tronçons de fibres. En outre, en cas de recours à la réflectométrie COTDR dans une partie en service de systèmes à amplificateurs OFA via un trajet de retour, cette méthode permettra de surveiller l'état du gain de chaque amplificateur OFA.

Un trajet de réflectométrie COTDR peut être mis en œuvre de deux façons différentes à l'intérieur d'un répéteur:

- la première consiste à raccorder les deux sorties d'un couple d'amplificateurs au moyen de coupleurs optiques (voir Figure 4);
- la deuxième consiste à raccorder la sortie d'un amplificateur optique à l'entrée de l'amplificateur optique situé dans le sens opposé (voir les Figures 5 et 6).

Les deux solutions permettent d'effectuer une surveillance bidirectionnelle.

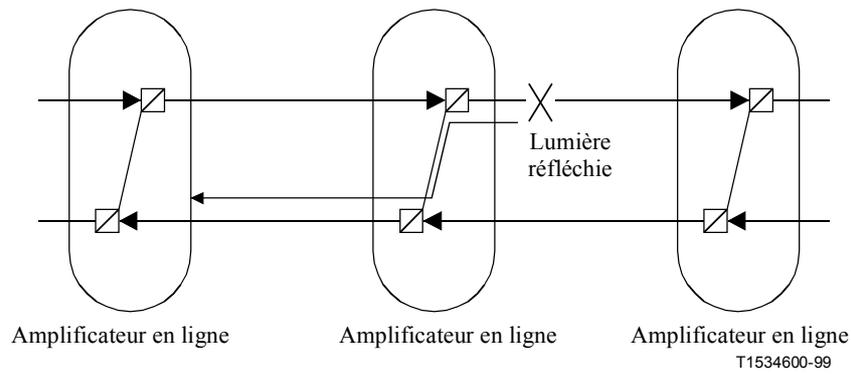


Figure 4/G.977 – Exemple de localisation de panne au moyen de la réflectométrie COTDR pour des amplificateurs OFA avec couplage sortie-sortie

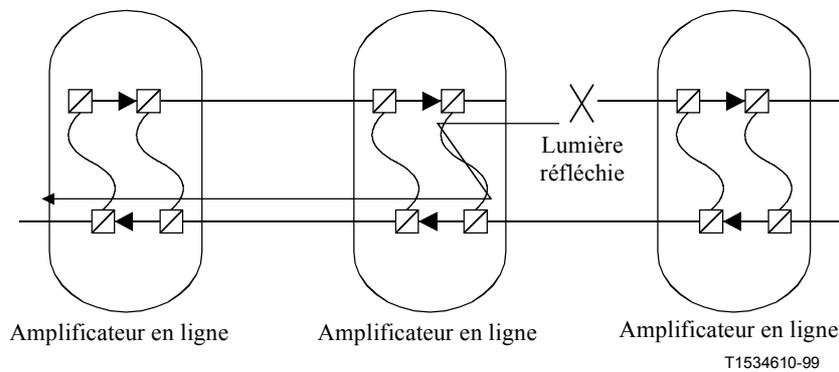


Figure 5/G.977 – Exemple de localisation de panne au moyen de la réflectométrie COTDR pour des amplificateurs OFA avec couplage sortie-entrée

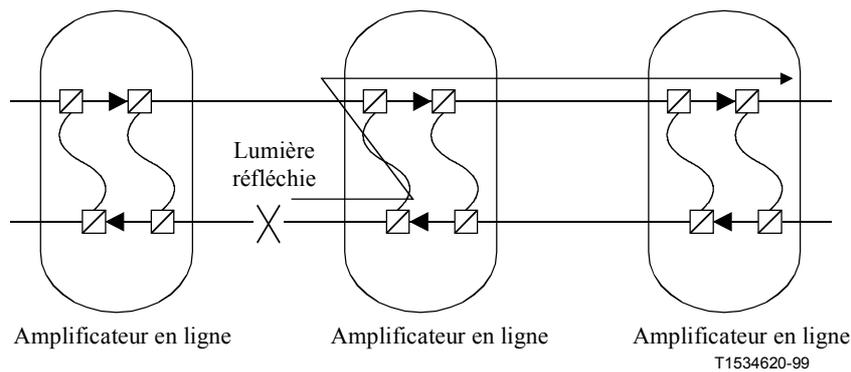


Figure 6/G.977 – Exemple de localisation de panne au moyen de la réflectométrie COTDR pour des amplificateurs OFA avec couplage sortie-entrée

7.6 Fiabilité

Tous les composants des répéteurs doivent faire l'objet d'une qualification et de tests de durée de vie afin de garantir que les exigences de fiabilité sont respectées.

8 Caractéristiques et performance de l'unité de dérivation (BU, *branching unit*) en ligne

8.1 Généralités

Les systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques peuvent utiliser une unité de dérivation lorsque plusieurs points d'atterrissage sont nécessaires. Une unité de dérivation est conçue pour terminer trois câbles de ligne. L'une des terminaisons – la terminaison de dérivation – permet d'extraire une partie du trafic provenant des deux autres terminaisons appelées terminaisons de circuit. Il peut exister différents types d'unité de dérivation pour répondre à des besoins particuliers suivant la configuration du système.

En ce sens, une unité de dérivation peut offrir:

- i) des fonctions d'extraction de toutes les fibres pour les systèmes SWS.
- ii) des fonctions d'extraction de toutes les fibres et/ou des fonctions d'insertion/extraction sur multiplex WDM pour les systèmes WDMS.

L'amplification optique ainsi que d'autres fonctionnalités (commutation de puissance, système de surveillance, commande automatique de gain, filtrage optique, couplage pour la réflectométrie COTDR, etc.) peuvent être fournies.

8.2 Caractéristiques mécaniques

8.2.1 Enceinte de l'unité de dérivation

L'enceinte mécanique de l'unité de dérivation comporte trois entrées de câble et une terre reliée à la mer. Elle doit être conçue de manière à permettre l'exploitation, la pose, le relevage et la nouvelle pose de l'unité de dérivation par grands fonds sans dégradation de la performance mécanique, électrique et optique. Les enceintes mixtes doivent supporter le transfert de lourdes charges depuis le câble sous-marin via un couplage souple.

A l'intérieur de l'enceinte de l'unité de dérivation, l'unité interne peut contenir des circuits de commutation de puissance et des amplificateurs OFA pour amplifier le signal optique provenant d'un ou de plusieurs couples de fibres. Elle peut aussi contenir des modules d'insertion/extraction pour assurer les fonctions de multiplexage et de démultiplexage de longueurs d'onde.

8.2.2 Protection contre la corrosion

Il faut prévoir une protection afin d'éviter la corrosion de l'unité de dérivation par l'eau de mer.

8.2.3 Résistance à la pression de l'eau

L'unité de dérivation doit être conçue pour supporter de fortes pressions.

8.2.4 Isolement contre les hautes tensions

Un isolement contre les hautes tensions est nécessaire entre l'enceinte de l'unité de dérivation et l'unité interne afin de garantir un fonctionnement correct de l'unité de dérivation.

8.2.5 Régulation thermique

La chaleur générée par les composants électroniques à l'intérieur de l'unité de dérivation peut être suffisamment dissipée par conduction thermique avec l'enceinte de l'unité de dérivation.

8.2.6 Etanchéité de l'enceinte de l'unité de dérivation

L'unité de dérivation doit être dotée 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 de l'unité de dérivation.

8.2.7 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 de l'unité de dérivation.

8.3 Caractéristiques électriques

8.3.1 Electrode de mer

Une électrode de mer permettra de raccorder une ou plusieurs des trois terminaisons de câble au potentiel de la mer.

8.3.2 Commutation de puissance

Deux câbles entrants quelconques avec conducteurs d'alimentation peuvent être raccordés ensemble et isolés de l'électrode de mer de l'unité de dérivation à laquelle le troisième câble est raccordé. Différentes configurations sont possibles pour assurer la récupération du trafic dans certains cas de défaillance d'équipement de téléalimentation ou de rupture de câble.

En cas de panne dans un segment de réseau sous-marin utilisant des unités de dérivation, le système et en particulier les circuits de commutation de puissance électrique de l'unité de dérivation doivent avoir la capacité de récupérer le trafic dans tous les autres segments, soit en présence de cette panne soit pendant la réparation.

8.3.3 Modules de puissance

Les unités de dérivation sont alimentées en courant constant par la station d'extrémité du terminal via le conducteur électrique du câble. Si cela est applicable, des modules de puissance alimentent les couples d'amplificateurs OFA pour assurer l'amplification optique. Les unités de dérivation peuvent accepter les deux polarités électriques.

8.3.4 Protection contre les surtensions

Les unités de dérivation doivent être protégées 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).

8.4 Caractéristiques optiques

8.4.1 Fonctionnalités

Une unité de dérivation peut être une unité FDD-BU ou une unité WDM-BU ou un mélange des deux. Dans tous les cas, les fonctionnalités de l'unité de dérivation peuvent garantir autant que possible l'indépendance des tronçons DLS afin d'éviter qu'une défaillance se produisant sur un canal LOC perturbe les autres. Dans le cas d'une unité WDM-BU, des composants optiques spécifiques peuvent assurer les fonctions de multiplexage et de démultiplexage.

8.4.2 Paramètres applicables

Lorsqu'une unité de dérivation contient des amplificateurs optiques, les paramètres optiques définis pour les répéteurs OSR doivent s'appliquer. En outre, il faut caractériser entièrement les modules d'insertion/extraction.

8.4.3 Effets de polarisation

Chacun des composants optiques d'une unité de dérivation peut être choisi de sorte que sa performance soit raisonnablement insensible aux effets de polarisation tels que l'affaiblissement PDL ou la dispersion PMD. D'autres effets de polarisation tels que la variation de gain PDG ou la

saturation PHB sont des effets intrinsèques des amplificateurs OFA éventuellement contenus dans l'unité de dérivation et ne peuvent être évités ou limités que par l'utilisation de fonctionnalités externes comme l'embrouillage de polarisation du signal dans l'émetteur de l'équipement TTE.

8.5 Fonctionnalités de surveillance

Il faut prévoir un système de surveillance pour contrôler, depuis la station terrestre, l'état et la performance de l'unité de dérivation. Ce système doit pouvoir fonctionner lorsque la liaison est en service sans perturber la performance du système.

8.6 Localisation des pannes

La localisation des pannes dans les systèmes comprenant une unité de dérivation peut généralement se faire au moyen de la réflectométrie COTDR. Lorsqu'une unité de dérivation comporte une fonction d'extraction de toutes les fibres, la réflectométrie COTDR permet de localiser directement une panne à l'intérieur de l'unité de dérivation ou au-delà de celle-ci. Lorsqu'une unité de dérivation comporte une fonction d'insertion/extraction sur multiplex WDM, la réflectométrie COTDR avec une source réglable en longueur d'onde permet de surveiller une ligne principale et une ligne en dérivation de manière indépendante en positionnant la longueur d'onde de la source sur la longueur d'onde de transmission de chaque ligne. Si un amplificateur OFA est inclus dans l'unité de dérivation, un trajet de retour tel que décrit au 7.5 peut être appliqué en vue de la localisation des pannes au-delà de l'amplificateur OFA.

8.7 Fiabilité

Tous les composants de l'unité de dérivation doivent faire l'objet d'une qualification et de tests de durée de vie afin de garantir que les exigences de fiabilité sont respectées.

9 Caractéristiques et performance du câble sous-marin

9.1 Domaine d'application

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

En outre, le câble doit 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 standard.

9.2 Caractéristiques de transmission

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 UIT-T G.652 [2], G.653 [3], G.654 [4] ou G.655 [5]. 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.

9.3 Caractéristiques des fibres du câble sous-marin

9.3.1 Généralités

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

- le coefficient d'affaiblissement (en dB/km) à la longueur d'onde de fonctionnement pour les systèmes SWS et à toutes les longueurs d'onde de fonctionnement pour les systèmes WDMS;
- le coefficient de dispersion chromatique en ps/nm.km;
- la longueur d'onde de dispersion nulle λ_0 en nm;
- la pente de dispersion autour des longueurs d'onde de fonctionnement en ps/nm².km;
- l'indice de réfraction non linéaire n_2 en m²/W;
- la surface effective A_{eff} en μm^2 ;
- le coefficient de non-linéarité n_2/A_{eff} en W⁻¹;
- la dispersion modale de polarisation (PMD) 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, *non-dispersion shifted single mode fibre*) définies dans l'UIT-T G.652 [2];
- les fibres monomodes à dispersion décalée (DSF, *dispersion shifted single mode fibre*) définies dans l'UIT-T G.653 [3];
- les fibres monomodes à longueur d'onde de coupure décalée (CSF, *cut-off shifted single mode fibre*) définies dans l'UIT-T G.654 [4];
- les fibres monomodes à dispersion décalée non nulle (NZDSF, *non-zero dispersion shifted single mode fibre*) définies dans l'UIT-T G.655 [5];
- les fibres monomodes à compensation de la dispersion (DCF, *dispersion compensation single mode fibre*).

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), on peut utiliser diverses combinaisons de ces types de fibre pour garantir la performance du système. On parle alors de gestion de la dispersion.

9.3.2 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).

9.3.3 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. La

non-linéarité entraîne une modulation autophase 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.

9.3.4 Dispersion modale de polarisation (PMD)

De faibles écarts par rapport à la symétrie cylindrique parfaite du cœur 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 peut également être exprimée en $\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$.

9.3.5 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 (système WDMS), 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.

9.3.5.1 Carte de la dispersion

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 cumulative, à une longueur d'onde de fonctionnement donnée, en fonction de la distance à l'émetteur optique. On utilise généralement deux plages de dispersion (anormale et normale) le long de la liaison, correspondant à de longs tronçons de la fibre en ligne principale et à des tronçons plus courts de fibre à compensation de la dispersion. Le but de la gestion de la dispersion est de maintenir la dispersion cumulative de l'ensemble de la liaison à une valeur proche de zéro tout en maintenant la dispersion moyenne en ligne à la "valeur adéquate". Cette valeur peut dépendre de la nature de la transmission, sachant qu'il peut être intéressant de la maintenir:

- à une valeur proche de zéro pour les systèmes SWS;
- à une valeur éloignée de zéro pour les systèmes WDMS afin de limiter les produits du mélange de quatre ondes.

9.3.5.2 Implémentation d'une 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).

À l'extrémité réception d'une liaison, on peut, pour chaque longueur d'onde, compenser la dispersion cumulative en utilisant une certaine longueur de fibre d'égalisation ou d'autres dispositifs passifs de compensation de la dispersion dans l'équipement TTE.

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, y compris (liste non exhaustive):

- l'incertitude en ce qui concerne les mesures de la longueur d'onde correspondant à la dispersion nulle, de la dispersion et de la pente de dispersion des fibres DSF, NDSF, DCF, NZDSF, CSF et EDF constituantes;

- 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;
- l'incertitude résultant du réarrangement et du choix "aléatoire" de sous-ensembles de fibres dans l'assemblage de tronçons de câble élémentaires;
- le vieillissement;
- les réparations.

9.4 Caractéristiques mécaniques et résistance à l'environnement

9.4.1 Protection des fibres par la structure du câble

La capacité de survie d'une fibre est liée à la croissance des défauts à l'intérieur de la structure du verre. Elle dépend de l'état mécanique initial de la fibre avant le câblage, état qui dépend lui-même de la structure physique de la fibre (type de revêtement, contrainte interne), des conditions environnementales pendant sa fabrication et du niveau des tests d'épreuve qui lui sont appliqués après son allongement. Cette capacité dépend aussi de l'environnement de la fibre dans le câble et de l'effet cumulatif des contraintes appliquées à la fibre tout au long de sa durée de vie.

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 couramment utilisés pour protéger les fibres optiques:

- la structure de câble serrée, pour laquelle les fibres sont maintenues fermement dans le câble, de sorte que l'élongation des fibres est essentiellement égale à celle du câble;
- la structure de câble lâche, pour laquelle les fibres peuvent se déplacer à l'intérieur du câble, de sorte que l'élongation des fibres est inférieure à celle du câble, restant nulle jusqu'à ce que l'élongation du câble atteigne une valeur donnée.

Par ailleurs, le câble doit protéger les fibres contre l'eau, l'humidité et la pression externe et limiter la pénétration longitudinale d'eau après une rupture du câble à la profondeur d'utilisation.

9.4.2 Caractéristiques mécanique 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).

9.4.3 Caractéristiques 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.

L'UIT-T G.972 [24] définit plusieurs paramètres permettant de caractériser le câble d'un point de vue mécanique et de déterminer la capacité à installer, relever et réparer le câble, ces paramètres donnant des indications pour la manipulation des câbles:

- la charge de rupture du câble, mesurée pendant les tests de qualification;
- la charge de rupture des fibres, mesurée pendant les tests de qualification;
- la charge transitoire du câble, qui pourrait être rencontrée accidentellement, notamment pendant des opérations de relevage;
- la charge du câble pendant les manipulations, qui pourrait être rencontrée pendant les opérations de réparation;
- l'élongation permanente du câble, qui caractérise l'état du câble après la pose;
- le rayon de courbure minimal du câble, qui sert d'indication pour la manipulation des câbles.

9.4.4 Protection du câble

Le câble sous-marin à fibres optiques doit être muni d'une protection contre les risques environnementaux à sa profondeur d'utilisation: protection contre la faune marine, les morsures de poisson et l'abrasion, ainsi que d'armures contre les agressions et les activités des navires. Différents types de câble protégé sont définis dans l'UIT-T G.972, notamment:

- les câbles à simple armure;
- les câbles à double armure;
- les câbles superarmés.

Le câble terrestre à fibres optiques doit assurer une protection du système et du personnel contre les décharges électriques, les brouillages industriels et la foudre. Deux types de câble terrestre protégé sont couramment utilisés:

- le câble terrestre armé muni d'une armure devant être maintenue au potentiel de la terre et destiné à être directement enfoui;
- le câble blindé en conduite revêtu d'un blindage de sécurité circulaire (qui peut être le blindage de protection contre les morsures de poisson) et destiné à être tiré dans des conduites.

9.5 Caractéristiques électriques

Les systèmes de câbles optiques sous-marins avec répéteurs utilisant des amplificateurs OFA doivent être alimentés via un conducteur électrique à l'intérieur du câble, ce conducteur ayant une faible résistance linéique et étant doté d'un isolateur avec capacité d'isolement contre les hautes tensions.

Ce conducteur peut également être utile pour effectuer un electroding dans les tests en service ou hors service.

Implémentation de systèmes de câbles optiques sous-marins avec répéteurs utilisant des amplificateurs à fibres optiques

A.1 Introduction

La présente annexe porte sur divers aspects des pratiques couramment employées concernant les systèmes de câbles sous-marins utilisant des amplificateurs optiques. Elle traite à la fois de la réalisation de systèmes SWS et de systèmes WDMS.

Les informations données dans la présente annexe sont des indications concernant les pratiques actuelles et n'ont pas pour but de donner des recommandations relatives aux systèmes existants ou futurs.

A.2 Configuration du système

A.2.1 Constituants d'un système de câbles optiques sous-marins avec répéteurs

Un système de câbles optiques sous-marins est destiné à établir des liaisons de transmission entre deux stations terminales ou davantage. Lorsque le système ne raccorde que deux stations terminales, il peut être désigné par liaison de transmission par câble optique sous-marin. Dans les autres cas, il peut être désigné par réseau de transmission par câble optique sous-marin.

La Figure 1/G.974 illustre le concept de base des systèmes de câbles optiques sous-marins et les limites. On peut inclure des répéteurs sous-marins optiques et/ou des unités de dérivation sous-marines optiques, en fonction des spécifications de chaque système.

Dans la Figure 1/G.974, A désigne les interfaces système dans la station terminale (où le système est raccordé à des liaisons numériques terrestres ou à d'autres systèmes de câbles sous-marins) et B désigne les jonctions littorales ou les points d'atterrissage. Les lettres figurant entre parenthèses dans les paragraphes qui suivent renvoient à la figure susmentionnée.

Un système de câbles optiques sous-marins comprend:

- une partie terrestre, entre l'interface système dans la station terminale (A) et la jonction littorale ou le point d'atterrissage (B), qui inclut le câble terrestre à fibres optiques, les jonctions terrestres et les équipements terminaux du système;
- une partie sous-marine au fond de la mer, entre les jonctions littorales ou les points d'atterrissage (B), qui inclut le câble optique sous-marin et, lorsque c'est nécessaire, des équipements sous-marins, c'est-à-dire un ou plusieurs répéteurs sous-marins optiques, une ou plusieurs unités de dérivation et un ou plusieurs boîtiers de raccordement de câbles.

Le câble contient un ou plusieurs couples de fibres optiques (un couple de fibres optiques sert à établir la transmission dans les deux sens).

Le câble optique sous-marin est protégé selon les besoins: il existe différents types de câble caractérisés par leur structure mécanique (câble léger, câble protégé léger, câble armé léger, câble à simple armure, câble à double armure, câble superarmé, etc.).

Le câble terrestre à fibres optiques nécessite aussi une protection. En particulier, c'est lui qui achemine le courant d'alimentation des répéteurs OSR et des unités de dérivation et, dans ces conditions, il peut exister une grande différence de potentiel entre le conducteur du câble et le sol, de sorte qu'il est nécessaire d'assurer une protection des personnes.

Les répéteurs sous-marins optiques incluent des amplificateurs optiques qui sont conçus pour accepter un signal optique entrant situé dans un intervalle donné et pour l'amplifier de sorte que le signal optique de sortie soit situé dans un autre intervalle donné. Les répéteurs incluent également des unités permettant d'assurer des fonctions de surveillance, de protection et d'alimentation. Ces

circuits constituent l'unité électronique du répéteur et sont contenus dans l'enceinte du répéteur, qui est étanche et résistante à la pression.

Une unité de dérivation sous-marine optique est insérée dans la partie sous-marine d'un réseau de transmission par câble sous-marin à fibres optiques lorsqu'il faut interconnecter plus de deux tronçons de câble. Conformément aux spécifications du réseau, cet équipement peut comprendre tout ou partie des sous-assemblages suivants: une connexion directe des fibres, une unité de commutation de fibres, un amplificateur optique pour chaque fibre et une unité de commutation du trajet d'alimentation. En outre, l'unité de dérivation peut fournir aux systèmes WDMS une fonctionnalité d'échange de signaux entre les trajets de signaux optiques, elle est alors appelée unité WDM-BU.

A.2.2 Configuration de transmission

La configuration de transmission caractérise le flux d'informations entre les stations terminales du système de câbles sous-marins à fibres optiques.

La trame de ligne et le débit de ligne résultent des opérations de multiplexage et de codage exécutées par l'équipement TTE, compte tenu de l'inclusion des canaux de service et de surveillance. Le code de ligne est choisi de manière à répondre au mieux aux exigences du système.

Un tronçon de câble à fibres optiques peut contenir un certain nombre de couples de fibres optiques, chaque couple pouvant servir de support à un certain nombre de tronçons de ligne numérique. Le nombre de tronçons de ligne numérique contenus dans un tronçon de câble à fibres optiques est donné par le produit de ces deux nombres.

Les tronçons de ligne numériques ayant pour support le même couple de fibres optiques suivent ce couple dans les répéteurs et les unités de dérivation. Ils peuvent être séparés entre différents couples de fibres lors du passage dans un multiplexeur de dérivation sous-marin.

A.2.3 Surveillance et télémaintenance du système

Le contrôleur de surveillance et de maintenance situé dans le terminal, en association avec l'unité de surveillance des répéteurs (ou des unités de dérivation), assure normalement la localisation des pannes, la surveillance de la performance des répéteurs et la télécommutation sur élément redondant.

Les fonctionnalités de surveillance incluent généralement une ou plusieurs des fonctionnalités suivantes:

- fourniture, en service, d'informations suffisantes pour permettre une maintenance préventive, en particulier si des éléments redondants commutables sont prévus;
- fonctionnalités complémentaires de surveillance du système ou de localisation des pannes hors service via un bouclage télécommandé depuis des terminaux appropriés;
- indication d'une panne imminente dans l'équipement en service, de manière à pouvoir entreprendre ou planifier une mesure préventive;
- fonctionnalités permettant de localiser les pannes sévères et les pannes intermittentes de durée et de fréquence telles qu'elles causent une défaillance du système, afin de respecter les spécifications de qualité de fonctionnement.

D'autres fonctionnalités, par exemple la réflectométrie COTDR si les répéteurs OSR et les unités de dérivation sont équipés d'un mécanisme de bouclage, et des mesures électriques au moyen d'équipements installés dans les stations terminales ou à bord du navire câblé peuvent permettre d'améliorer la précision de la localisation des pannes.

La surveillance du système peut être facilitée si des équipements informatisés sont installés à l'une ou l'autre des extrémités ou aux deux.

A.2.4 Intégration de systèmes

Une liaison ou un réseau de transmission par câble sous-marin à fibres optiques peut être construit à partir de deux systèmes sous-marins à fibres optiques ou davantage (c'est-à-dire à partir d'ensembles d'équipements – câble, répéteur, équipement terminal, unité de dérivation, etc.) conçus de manière indépendante par différents fournisseurs.

Pour intégrer le réseau sous-marin à fibres optiques, il faut garantir la compatibilité de ces systèmes. C'est l'objet de la spécification d'intégration.

A.3 Performance du système

A.3.1 Bilan de puissance

Les tableaux de bilan de puissance doivent permettre de calculer les marges qu'il faut considérer comme correspondant à une spécification minimale pour le système en début de vie. Ces marges doivent être exprimées sous la forme d'une valeur du facteur Q. Les fournisseurs doivent indiquer, au minimum, les valeurs des paramètres servant à calculer le bilan de puissance et spécifier toutes les informations complémentaires nécessaires, par exemple l'utilisation d'un embrouillage de polarisation optique ou d'une modulation de phase pour minimiser les effets de polarisation ou les effets non linéaires.

Un exemple de tableau de bilan de puissance est donné dans le Tableau A.1.

Tableau A.1/G.977 – Un exemple de tableau de bilan de puissance

	Paramètre	Q (en dB) en début de vie	Q (en dB) en fin de vie
1	Valeur moyenne du facteur Q (à partir d'un calcul simple du rapport signal/bruit)		
1.1	Dégradations de propagation dues aux effets combinés de la dispersion chromatique, des effets non linéaires, des effets du mélange de quatre ondes, des effets de diffusion Raman stimulée, etc.		
1.2	Dégradations liées à la platitude du gain		
1.3	Dégradations liées à la préaccentuation optique non optimale		
1.4	Dégradations liées à la tolérance de longueur d'onde		
1.5	Dégradations moyennes liées à l'affaiblissement PDL		
1.6	Dégradations moyennes liées à la variation de gain PDG		
1.7	Dégradations moyennes liées à la dispersion PMD		
1.8	Dégradations liées à la surveillance		
1.9	Dégradations liées à la fabrication et à l'environnement		
2	Performance du système variable dans le temps (règle de 5 sigma)		
3	Valeur du facteur Q de ligne (1-1.1 à 1.9-2)		
4	Valeur spécifiée du facteur Q de l'équipement TTE (boucle)		
5	Valeur du facteur Q pour un segment (calculée à partir de 3 et 4)		
5.1	Taux BER correspondant au facteur Q pour un segment sans correction FEC		
5.2	Taux BER correspondant au facteur Q pour un segment avec correction FEC		

Tableau A.1/G.977 – Un exemple de tableau de bilan de puissance (fin)

	Paramètre	Q (en dB) en début de vie	Q (en dB) en fin de vie
5.3	Valeur effective du facteur Q pour un segment avec correction FEC		
6	Limite du facteur Q pour la conformité à la Rec. G.826 après correction FEC		
7	Marges pour les réparations Dégradations dues au vieillissement des composants et des fibres Dégradations dues à une défaillance de la ou des pompes Seuil de décision non optimal		
8	Marges pour un segment		
9	Marge du fournisseur non attribuée		
10	Limite pour la mise en service		

Le Tableau A.1 doit être rempli comme suit:

- ligne 1 – Valeur moyenne du facteur Q (calcul simple du rapport signal/bruit);
- les lignes 1.1 à 1.9 donnent une liste non exhaustive de sources de dégradation qui ont une incidence sur la performance du système. Ces dégradations doivent être déduites de la ligne 1;
- ligne 2 – Performance du système variable dans le temps:
cette ligne définit une autre dégradation due aux phénomènes de fluctuation de polarisation qui diminuent la performance moyenne;
- ligne 3 – Valeur du facteur Q de ligne:
cette ligne donne la valeur du facteur Q de ligne. C'est le résultat de l'opération suivante:
ligne 3 = Ligne 1 (Lignes 1.1 à 1.9) – Ligne 2;
- ligne 4 – Valeur spécifiée du facteur Q de boucle de l'équipement TTE:
cette ligne donne le facteur Q en début de vie et en fin de vie;
- ligne 5 – Valeur du facteur Q pour un segment:
cette ligne donne le facteur Q pour un segment calculé à partir des lignes 3 et 4 en utilisant la formule suivante:

$$\frac{1}{Q^2_{segment}} = \frac{1}{Q^2_{ligne}} + \frac{1}{Q^2_{TTE(boucle)}}$$
- ligne 5.1 – Taux BER correspondant au facteur Q pour un segment sans correction FEC:
ligne 5 convertie en taux d'erreurs sur les bits (BER) avant correction d'erreur directe;
- ligne 5.2 – Taux BER correspondant au facteur Q pour un segment avec correction FEC:
taux BER après correction FEC;
- ligne 5.3 – Valeur effective du facteur Q pour un segment avec correction FEC:
ligne 5.2 convertie en facteur Q;

- ligne 6 – Limite du facteur Q pour la conformité à la Rec. G.826 après correction FEC:
facteur Q correspondant au taux d'erreurs sur les bits le plus élevé qui puisse être attribué avant correction FEC. 11,2 dB correspond à un taux BER de $2,4 \cdot 10^{-4}$. Un taux BER de $2,4 \cdot 10^{-4}$ est converti par correction FEC en un taux BER meilleur que 10^{-11} . Un facteur Q de 11,2 couvre donc toutes les longueurs de tronçon DLS;
- ligne 7 – Réparations, vieillissement et défaillances de pompe:
la ligne 7 est donnée par la ligne 5 (début de vie) moins la ligne 5 (fin de vie);
- ligne 8 – Marges pour un segment:
les marges pour un segment sont généralement de 1 dB (valeur des fournisseurs) en fin de vie;
la ligne 8 (début de vie) est donnée par la ligne 7 plus la ligne 8 (fin de vie);
- ligne 9 – Marge du fournisseur non attribuée:
c'est la marge pour les autres dégradations et les dégradations inconnues;
- ligne 10 – Limite pour la mise en service:
cette ligne donne la limite contractuelle du facteur Q pour la mise en service de chaque tronçon DLS.

A.3.2 Performance des tronçons de ligne numérique

La performance de chaque tronçon de ligne numérique doit au moins être conforme à l'UIT-T G.826.

A.4 Exploitation du système

A.4.1 Communication de terminal à terminal

Généralement, au moins deux canaux de service sont établis entre deux stations terminales: l'un via le système de câbles sous-marins à fibres optiques pour l'exploitation et la maintenance du système, l'autre via des installations externes pour le maintien de la communication entre les deux stations terminales en cas de panne du système.

En particulier, un canal de service sert normalement à transmettre des messages de terminal à terminal entre les équipements de surveillance des stations terminales correspondantes, permettant ainsi de fournir des informations sur l'état du système et des tronçons de ligne numérique et sur les activités de surveillance en cours afin de contribuer à la surveillance globale du système ainsi qu'à la localisation des pannes.

Au moins un canal d'ordre est établi entre les stations terminales pour l'échange de trafic de télécommunication entre le personnel des stations terminales.

A.4.2 Fonction et caractéristiques de l'équipement de tél'alimentation

A.4.2.1 Condition normale de fonctionnement de l'équipement de tél'alimentation

L'équipement de tél'alimentation fournit, via le conducteur d'alimentation du câble avec retour par la mer, un courant électrique stabilisé pour alimenter les circuits électriques du ou des répéteurs sous-marins optiques et de la ou des unités de dérivation sous-marines optiques. Ce courant est généralement réglable et décroît légèrement en fonction de la charge résistive de l'équipement de tél'alimentation.

Les variations temporelles du courant de l'équipement de tél'alimentation, pouvant résulter de variations de la température ambiante dans un certain intervalle, de variations et de transitoires de tension de la source d'énergie ou d'une commutation sur élément redondant dans l'équipement de tél'alimentation, sont maintenues dans un intervalle donné. La définition de la stabilité du courant de l'équipement de tél'alimentation est telle que les exigences globales de stabilité du système de câbles

sous-marins à fibres optiques sont respectées. La stabilité du courant de l'équipement de téléalimentation est généralement exprimée sous la forme d'un pourcentage par rapport au courant nominal de l'équipement de téléalimentation.

La tension de sortie de l'équipement de téléalimentation est ajustée automatiquement de manière à maintenir constant le courant de l'équipement de téléalimentation en présence de tensions induites naturellement. On considère généralement que ces tensions induites naturellement s'accumulant le long d'une liaison peuvent atteindre une valeur de 0,3 V/km (est-ouest) et qu'elles varient lentement dans le temps (moins de 10 V/s).

A.4.2.2 Protection du système

L'équipement de téléalimentation est normalement doté de fonctionnalités destinées à protéger l'équipement lui-même et la partie sous-marine contre un courant excessif ou une tension excessive en cas de panne électrique survenant dans l'équipement de téléalimentation ou n'importe où dans le système.

En particulier, une protection de terre de l'équipement de téléalimentation est prévue pour diriger automatiquement le courant d'alimentation vers la terre de la station en cas de déconnexion de l'électrode d'alimentation du système ou si la différence de potentiel entre l'électrode et la terre de la station devient excessive. Ce dispositif est destiné à éviter toute interruption du système de câbles sous-marins à fibres optiques et toute montée du potentiel de terre de l'équipement de téléalimentation de nature à endommager l'équipement ou à mettre en danger le personnel.

A.4.2.3 Protection du personnel au niveau de l'équipement de téléalimentation

Une protection du personnel au niveau de l'équipement de téléalimentation est prévue afin d'éviter que le personnel soit en contact avec des potentiels dangereux, qu'ils soient générés à l'extrémité proche ou à l'extrémité distante du système de câbles sous-marins à fibres optiques. L'équipement de protection permet notamment d'effectuer un verrouillage au niveau de l'équipement de terminaison de câble ou d'effectuer un arrêt d'urgence au niveau de l'équipement de téléalimentation et contient des dispositifs de mise à la terre permettant de décharger vers la terre le conducteur d'alimentation du câble avant toute manipulation.

A.5 Caractéristiques des répéteurs sous-marins optiques (OSR, *optical submarine repeater*) et des unités de dérivation

A.5.1 Généralités

Les répéteurs OSR et les unités de dérivation peuvent être exploités conformément aux recommandations relatives à la performance du système au cours de sa durée de vie nominale et dans les conditions environnementales sous-marines (température, pression, etc.).

Les répéteurs OSR et les unités de dérivation sont conçus pour pouvoir être manipulés (c'est-à-dire posés, relevés et reposés) sans dégradation de la performance du câble, des boîtiers de raccordement des câbles, des répéteurs, des unités de dérivation et des terminaisons de câble, sous réserve que les spécifications de manipulation soient respectées.

Les répéteurs OSR et les unités de dérivation sont conçus pour être transportés et stockés dans des conditions de température données sans affecter la durée de vie nominale du système, sous réserve que les spécifications de stockage et de transport soient respectées.

Les répéteurs OSR et les unités de dérivation peuvent être exploités à bord d'un navire câblé pendant les opérations de pose et de réparation sans affecter la durée de vie nominale du système.

La taille des répéteurs OSR et des unités de dérivation est telle qu'ils peuvent être manipulés par des équipements appropriés de navire câblé.

L'interface d'entrée optique du répéteur (point R) sur chaque fibre entrante est définie à l'endroit de l'épissure de la fibre entre le répéteur et le câble.

L'interface de sortie optique du répéteur (point S) sur chaque fibre sortante est définie à l'endroit de l'épissure de la fibre entre le répéteur et le câble.

A.5.2 Constituants d'un répéteur OSR (ou d'une unité de dérivation)

Les principaux constituants d'un répéteur OSR (ou d'une unité de dérivation) sont les suivants:

- l'enceinte du répéteur OSR (ou de l'unité de dérivation):
il s'agit de la partie mécanique, contenant l'unité électronique. L'enceinte doit avoir les caractéristiques suivantes: résistance à la pression sous-marine, étanchéité, grande résistance mécanique, raccordement électrique et optique aux tronçons de câble de chaque côté du répéteur OSR (ou de l'unité de dérivation), isolement contre les hautes tensions et faible impédance thermique entre l'unité électronique du répéteur OSR (ou de l'unité de dérivation) et la mer;
- l'unité électronique/optique du répéteur OSR (ou de l'unité de dérivation):
il s'agit de la partie comprenant le ou les amplificateurs optiques et le ou les circuits de surveillance et le ou les circuits d'alimentation et de protection et le ou les multiplexeurs optiques et le ou les démultiplexeurs optiques et le ou les commutateurs sur élément redondant.

A.5.3 Surveillance et contrôle

En association avec le contrôleur de maintenance situé dans le terminal, l'unité de surveillance des répéteurs OSR (ou des unités de dérivation) permet de contrôler la performance des répéteurs. Des bouclages optiques peuvent permettre de contrôler les tronçons de câble entre deux répéteurs OSR grâce à la réflectométrie COTDR.

A.6 Fabrication

A.6.1 Qualité d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques avec répéteurs

L'exigence de haute performance et de fiabilité établie pour un système de câbles sous-marins à fibres optiques ne peut être respectée que si des procédures strictes relatives à la qualité sont appliquées pendant la conception, la fabrication et la pose du système. Ces procédures sont propres à chaque fournisseur de câbles sous-marins à fibres optiques, mais les principes de base suivants s'appliquent de façon générale.

A.6.1.1 Qualification des composants, des assemblages et des techniques

Cette activité, qui fait partie du processus de développement, est destinée à montrer que les caractéristiques d'une technique, d'un composant ou d'un assemblage sont compatibles avec le respect de la performance globale du système et permettent d'être raisonnablement assuré que l'objectif de fiabilité pourra être atteint. La qualification inclut des essais sous contrainte élevée, visant à évaluer la robustesse de la technique, du composant ou du sous-assemblage et à déterminer la procédure de tri et les tests de durée de vie à long terme (certains pouvant être accélérés, par exemple par la température), dont le but est de confirmer la validité de la procédure de tri et d'évaluer la durée de vie et/ou la fiabilité de la technique, du composant ou de l'assemblage. La qualification d'un câble ou d'un équipement sous-marin peut également inclure des essais en mer.

A.6.1.2 Certification des composants et des sous-assemblages

Cette activité, qui fait partie du processus de fabrication, est destinée à garantir l'aptitude de chaque composant ou assemblage à fonctionner conformément à ses spécifications de qualité et de fiabilité une fois installé. Pour les équipements sous-marins, chaque composant est certifié individuellement.

La certification est fondée sur les résultats des tests de tri, visant à supprimer tout élément ou composant non satisfaisant, notamment ceux qui sont exposés à des défaillances prématurées.

A.6.1.3 Inspection en cours de fabrication

Cette activité, qui fait partie du processus de fabrication, est destinée à vérifier que le plan de qualité est respecté, que chaque opération est accomplie suivant la procédure convenue et que le résultat est satisfaisant.

La responsabilité de l'inspection en cours de fabrication peut être partagée entre le fabricant et les acheteurs d'un système de câbles sous-marins à fibres optiques.

A.6.1.4 Tests d'acceptation en usine

À la fin de la fabrication de chaque élément (équipement TSE et équipement submersible), il faut exécuter des tests de fonctionnement et de qualité avant que l'équipement ne sorte de l'usine.

Cette activité, menée en usine, doit comprendre tous les tests nécessaires pour confirmer que l'équipement TSE (y compris le logiciel définitif) et l'équipement submersible (répéteur et tronçons de câble) sont prêts pour être installés ou assemblés. Les tests doivent montrer que les exigences de la spécification technique seront respectées par les segments et la totalité du réseau une fois installés ou assemblés, en l'absence de divergence pendant l'installation ou l'assemblage.

Une fois les tests en usine terminés, les équipements peuvent être soumis à un essai de confiance afin de contrôler leur stabilité.

A.6.2 Procédure d'assemblage et de chargement

L'assemblage d'une liaison consiste à raccorder les tronçons de câble, les répéteurs et les unités de dérivation ainsi qu'à contrôler que la marge garantie est présente pour chaque fibre de chaque tronçon de câble, de manière à constituer la partie sous-marine. Cet assemblage est généralement effectué en usine avant le chargement.

Le chargement à bord du navire consiste à installer la partie sous-marine ou des fractions de celle-ci à bord du navire câblé, avant la pose. Pour les opérations de chargement, la liaison est généralement mise hors tension. Des tests sont faits régulièrement pendant le chargement pour confirmer que la performance de l'équipement assemblé n'a pas été affectée par les opérations de chargement.

A.7 Installation du système

A.7.1 Analyse du tracé sous-marin

Avant de poser le câble, une analyse est faite en vue de choisir le tracé et les moyens de protection des câbles (protection légère, armure, enfouissement). L'analyse du tracé consiste à déterminer le profil, la température et les variations saisonnières, la morphologie et la nature des fonds marins, la position des câbles et conduits existants, l'historique des pannes de câbles, les activités de pêche et d'exploitation minière, les courants marins, l'activité sismique, la législation, etc.

Une étude du tracé des câbles doit normalement être menée avant le début d'une analyse de tracé pour déterminer tous les aspects environnementaux, politiques, économiques et pratiques relatifs au tracé. Pour cela, il faut prendre contact avec les autorités locales et les associations de pêcheurs et inspecter les sites d'atterrissement et les points d'accès selon les besoins.

Il faut également évaluer la possibilité d'enfouissement dans le cadre de l'analyse du tracé, soit par des mesures continues directes: analyse en vue de l'évaluation de l'enfouissement (BAS, *burial assesment survey*) soit par des mesures régulières discrètes: test du pénétromètre conique (CPT, *cone penetrometer testing*).

A.7.2 Installation des câbles sous-marins

La pose d'un câble se fait normalement au moyen d'un navire câblé agréé après avoir effectué tout dégagement nécessaire du tracé en eau peu profonde (par exemple utilisation d'un grappin de prépose).

Généralement, la pose n'est entreprise que lorsque les conditions météorologiques et maritimes ne sont pas susceptibles d'entraîner un fort risque d'endommagement de la partie sous-marine, du navire câblé et des équipements de pose ou un fort risque de blessure du personnel.

Il est possible d'enfouir le câble au fond de la mer afin d'en augmenter la protection. L'enfouissement peut être entrepris pendant la pose au moyen d'une charrue marine tractée par le navire câblé de pose ou après la pose au moyen d'un robot submersible à aut propulsion ou par un autre moyen.

Pendant l'installation, on pose une certaine longueur supplémentaire de câble (mou), de manière à garantir que le câble repose convenablement au fond de la mer.

Le système doit être testé pendant la pose et à la fin de la pose, de manière à garantir qu'aucune dégradation importante du système ne s'est produite. Ces tests comprennent des tests de transmission et de fonctionnement et peuvent comprendre des tests sur des sous-assemblages redondants. Pour que des tests puissent être faits pendant la pose du câble, la liaison peut être mise sous tension, sous réserve que les règles de sécurité soient respectées.

A.7.3 Installation des câbles terrestres et tests

Les tests sur les câbles terrestres seront réalisés à la fin de leur installation au niveau de chaque site pour confirmer la performance.

En particulier, le système de retour par la terre sera testé après son installation.

A.7.4 Installation des équipements de stations terminales et tests

Une fois terminée l'installation des équipements d'une station terminale de câble, un programme de tests d'acceptation sur le site doit être exécuté sur la base du programme de tests d'acceptation en usine déjà exécuté. Les résultats des deux programmes doivent être comparés. En cas de divergence, il faut déterminer la cause des irrégularités.

Il faut tester tous les équipements fournis en réserve pour vérifier qu'ils fonctionnent correctement en les mettant à la place des équipements de travail.

A la fin de la série de tests, les équipements doivent être soumis à un essai de confiance continu à définir en fonction du type d'équipement.

Après les tests d'acceptation sur le site pour chaque élément, il faut interconnecter les équipements pour contrôler leur interopérabilité. Un plan de tests d'intégration spécifique doit alors être exécuté. Les résultats obtenus peuvent être comparés aux résultats précédents (y compris la démonstration technique). En cas de divergence, il faut déterminer la cause des irrégularités.

A.8 Mise en service du système

Des tests de mise en service sont réalisés avant de faire passer du trafic dans le système pour garantir que le système respecte l'exigence contractuelle globale de qualité de transmission et que toutes les fonctionnalités relatives à la gestion de réseau sont en service. Lorsque des marges supplémentaires sont indiquées en début de vie, il est recommandé de les évaluer une par une pour suivre le vieillissement du système.

En cas de recours à la redondance pour garantir la fiabilité, on peut utiliser des composants redondants pour remédier aux pannes se produisant pendant la pose ou avant la mise en service. Toutefois, le but est de s'assurer que le nombre de dispositifs redondants restant disponibles suffit pour pouvoir répondre, avec une forte probabilité, à l'objectif du nombre de réparations par navire.

A la fin de la mise en service du système, il faut faire un essai de confiance continu hors service du segment de transmission. Il faut établir des procédures soigneusement contrôlées pour éviter d'introduire des erreurs humaines. Il faut examiner toute irrégularité, toute alarme de variation ou tout événement anormal observé.

A.9 Maintenance

A.9.1 Maintenance périodique

La maintenance périodique est effectuée à partir des stations terminales au moyen du système de surveillance. Elle consiste à contrôler régulièrement les paramètres du système et, en cas de besoin, à procéder à une commutation préventive sur élément redondant.

A.9.2 Maintenance en mer

Les systèmes de câbles sous-marins à fibres optiques peuvent être sujets à des pannes dues notamment à des agressions externes ou à des défaillances de composants. Il est important de définir et de mettre au point des procédures et des équipements de réparation bien établis et efficaces pour faciliter la réparation et limiter les pertes de trafic.

La maintenance en mer est généralement effectuée au moyen de navires câbliers de réparation spécialisés.

A.9.2.1 Localisation des pannes

En ce qui concerne les systèmes équipés de répéteurs sous-marins optiques, le système de surveillance permet de procéder à une première localisation à un tronçon de surveillance près.

En ce qui concerne les tronçons de câble situés aux extrémités, on peut localiser les pannes à partir des stations terminales, en utilisant des mesures électriques adéquates (résistance, capacité, isolement, etc.) et la réflectométrie optique.

De même, la localisation des pannes dans un câble peut se faire depuis le navire câblier après relevage du câble, en appliquant les mêmes méthodes.

On peut recourir à l'electroding pour repérer le câble.

A.9.2.2 Relevage de câble

Pendant le relevage d'un câble, il peut être nécessaire, afin de réduire la tension mécanique appliquée au câble, de couper celui-ci au fond de la mer avant de relever séparément chaque extrémité.

A.9.2.3 Réparation en mer

Plusieurs méthodes, à choisir selon la profondeur, peuvent être utilisées pour la réparation en mer:

- en ce qui concerne la réparation en eau peu profonde, il peut être nécessaire d'ajouter une certaine longueur de câble, sans ajouter de répéteur; une marge pour réparation est généralement incluse dans le bilan de puissance optique des tronçons en eau peu profonde étant donné que ces tronçons sont les plus exposés au risque d'agression externe, même si des précautions sont prises;
- en ce qui concerne la réparation en eau profonde, il est généralement nécessaire d'ajouter une certaine longueur de câble et il est parfois nécessaire d'ajouter un répéteur pour compenser l'affaiblissement supplémentaire, si celui-ci est plus élevé que la marge disponible; en général, la marge pour réparation incluse dans le bilan de puissance optique des tronçons en eau profonde est très faible car les réparations en eau profonde sont peu fréquentes.

Lorsqu'une panne est localisée à un tronçon de surveillance près, le tronçon entier peut être remplacé par un minisystème, sans pousser plus loin la localisation. Cette méthode permet de gagner du temps mais elle nécessite de prévoir un plus grand nombre d'équipements redondants.

Des procédures de sécurité pour les réparations sont appliquées à bord des navires câblés et dans les stations terminales, de manière à protéger le personnel travaillant à bord des navires câblés. En particulier, les procédures de sécurité en matière d'énergie électrique comprennent la mise à la terre du câble dans les stations terminales, à bord des navires câblés et au niveau des unités de dérivation.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

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