UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

O.201

(07/2003)

SÉRIE O: SPÉCIFICATIONS DES APPAREILS DE MESURE

Appareils de mesure des paramètres des canaux optiques

Equipement de test du facteur Q pour l'évaluation des performances de transmission des canaux optiques

Recommandation UIT-T O.201

RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE O

SPÉCIFICATIONS DES APPAREILS DE MESURE

Généralités	O.1–O.9
Accès pour la maintenance	O.10–O.19
Systèmes de mesure automatiques et semi-automatiques	O.20–O.39
Appareils de mesure des paramètres analogiques	O.40–O.129
Appareils de mesure des paramètres numériques et analogiques/numériques	O.130–O.199
Appareils de mesure des paramètres des canaux optiques	**O.200–O.209**

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

Recommandation UIT-T O.201

Equipement de test du facteur Q pour l'évaluation des performances de transmission des canaux optiques

Résumé

La présente Recommandation définit les caractéristiques de l'équipement de mesure du facteur Q (QFME, *Q-factor measurement equipment*), qui fait appel aujourd'hui à la méthode de séparation des niveaux utilisée pour l'évaluation des performances de transmission des canaux optiques.

Source

La Recommandation O.201 de l'UIT-T a été approuvée par la Commission d'études 4 (2001-2004) de l'UIT-T selon la procédure définie dans la Recommandation UIT-T A.8 le 22 juillet 2003.

Mots clés

Equipement de mesure du facteur Q, facteur Q, rapport signal/bruit, réseau de transport optique, seuil de décision, taux d'erreur sur les bits (BER, *bit error ratio*).

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

NOTE

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

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

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

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

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

© UIT 2004

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

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application	1
2	Références normatives	1
3	Définitions	2
4	Abréviations et acronymes	2
5	Présentation du facteur Q	3
6	Caractéristiques de l'équipement de mesure du facteur Q	4
6.1	Interfaces physiques et débits binaires	4
6.2	Précision requise et essais de recettes	8
6.3	Présentation des résultats	10
7	Fonctions diverses	10
7.1	Accès de télécommande	10
7.2	Interface de réseau de gestion des télécommunications (RGT)	10
8	Conditions d'exploitation	10
8.1	Conditions ambiantes	10
8.2	Comportement en cas de défaillance de l'alimentation en énergie	10
9	Bibliographie	10
10	Lectures complémentaires	11
Annexe A – Procédure mathématique pour l'évaluation du facteur Q par la méthode de séparation des niveaux de décision		11
A.1	Conditions préalables	11
A.2	Dépendance théorique du BER à l'égard du seuil	11
A.3	Séparation du BER(0) et du BER(1)	11
A.4	Calcul des résultats	12
Appendice I – Théorie du facteur Q		13
I.1	Théorie du facteur Q	13
I.2	Détermination approchée de la fonction erfc	13
I.3	Fonctions erfc(x) et erfc^{-1} (x) inverses	14
Appendice II – Performances de transmission et caractéristiques des canaux optiques		15
II.1	Performances de transmission des canaux optiques	15
II.2	Caractéristiques des canaux optiques	15
Appendice III – Imperfections à prendre en considération dans les conditions rencontrées dans la pratique		17
III.1	Dégradations analogiques	17
III.2	Interdépendance des séquences d'essai	17
III.3	Caractéristiques du récepteur	17
III.4	Partie retenue pour la phase d'échantillonnage	17
III.5	Effets sur le facteur Q	18

Page

Appendice IV – Propositions d'implémentation de l'équipement de mesure du facteur Q..... 18
IV.1 Schémas de principe 18
IV.2 Description fonctionnelle 19
IV.3 Modes de mesure 22
Appendice V – Autres essais de vérification 23
V.1 Réponse impulsionnelle du récepteur 23

Recommandation UIT-T O.201

Equipement de test du facteur Q pour l'évaluation des performances de transmission des canaux optiques

1 Domaine d'application

La mesure du facteur Q est une méthode utilisée depuis longtemps pour la caractérisation des canaux optiques (voir par exemple les Recommandations UIT-T G.972 [7] et G.976 [8]). En particulier, pour des taux d'erreur sur les bits peu élevés, cette méthode présente l'avantage de prendre moins de temps qu'une mesure classique du taux d'erreur sur les bits (BER, *bit error ratio*), qui impose de compter les erreurs sur les bits sur une période de temps qui soit statistiquement significative.

On entend par facteur Q le rapport signal/bruit (électrique) à l'entrée du circuit de décision d'un récepteur de signaux numériques (voir Annexe A, Appendice I et [B1]).

Il existe diverses méthodes de mesure du facteur Q, dont on peut établir les relations mathématiques avec le taux d'erreur sur les bits (voir également les méthodes mentionnées dans les Recommandations UIT-T G.972 [7] et G.976 [8] pour les systèmes sous-marins). La présente Recommandation traite de la méthode de séparation des niveaux et s'applique à l'équipement QFME qui utilise cette méthode.

Les objectifs de la présente Recommandation en ce qui concerne l'équipement de mesure du facteur Q (QFME) sont les suivants:

- **compatibilité entre les équipements de mesure produits par différents fabricants**:

  les résultats des mesures des performances de transmission des canaux optiques effectuées au moyen d'un équipement QFME conforme à la présente Recommandation doivent être compris entre les limites de précision définies dans la présente Recommandation;

- **évaluation des performances effectives du système**:

  l'évaluation, au moyen d'un équipement QFME, du taux d'erreur sur les bits (BER) pouvant être obtenu sur un canal optique donné, vise à déterminer le BER minimal qui peut être obtenu avec un équipement de réseau de conception optimale.

La présente Recommandation n'a pas pour objet de définir les applications propres à la méthode de mesure du facteur Q. Certains domaines d'application possibles sont décrits dans ses appendices.

Si les caractéristiques de l'équipement QFME sont définies dans la présente Recommandation, la réalisation de la configuration de l'équipement n'y est pas abordée et devrait être examinée attentivement par le concepteur et l'utilisateur.

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. La référence à un document figurant dans la présente Recommandation ne donne pas à ce document, en tant que tel, le statut d'une Recommandation.

[1] Recommandation UIT-T G.691 (2000), *Interfaces optiques pour les systèmes STM-64, STM-256 et autres systèmes SDH monocanaux à amplificateurs optiques*.

[2] Recommandation UIT-T G.707/Y.1322 (2000), *Interface de nœud de réseau pour la hiérarchie numérique synchrone*.

[3] Recommandation UIT-T G.709/Y.1331 (2001), *Interfaces pour le réseau de transport optique*.

[4] Recommandation UIT-T G.825 (2000), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques à hiérarchie numérique synchrone*.

[5] Recommandation UIT-T G.8251 (2001), *Régulation de la gigue et du dérapage dans le réseau de transport optique (OTN)*.

[6] Recommandation UIT-T G.957 (1999), *Interfaces optiques pour les équipements et les systèmes relatifs à la hiérarchie numérique synchrone*.

[7] Recommandation UIT-T G.972 (2000), *Définition des termes relatifs aux systèmes de câbles optiques sous-marins*.

[8] Recommandation UIT-T G.976 (2000), *Méthodes de test applicables aux systèmes de câbles optiques sous-marins*.

[9] Recommandation UIT-T O.3 (1992), *Conditions climatiques et essais correspondants applicables aux appareils de mesure*.

[10] Recommandation UIT-T O.181 (2002), *Appareils utilisés pour l'évaluation des caractéristiques d'erreur sur les interfaces STM-N*.

[11] CEI 61300-3-29, *Measurement techniques for characterising the amplitude of the spectral transfer functions of DWDM components*.

3 Définitions

La présente Recommandation définit le terme suivant:

3.1 facteur Q: rapport signal/bruit électrique (ESNR) à l'entrée du circuit de décision du récepteur (voir l'Annexe A et l'Appendice I).

4 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

AGC commande automatique de gain (*automatic gain control*)

APD photodiode à avalanche (*avalanche photo diode*)

BER taux d'erreur sur les bits (*bit error ratio*)

BERT appareil de mesure du taux d'erreur sur les bits (*bit error ratio tester*)

CEI Commission électrotechnique internationale

DFB réaction répartie (diode laser) (*distributed feed-back*)

DWDM multiplexage par répartition en longueur d'onde à haute densité (*dense wavelength division multiplex*)

EDFA amplificateur à fibres dopées à l'erbium (*erbium doped fiber amplifier*)

ER rapport d'extinction (*extinction ratio*)

ESNR rapport signal/bruit électrique (*electrical signal-to-noise ratio*)

FEC correction d'erreur directe (*forward error correction*)

ISI brouillage intersymboles (*inter-symbol interference*)

ISO	Organisation internationale de normalisation (*International Organization for Standardization*)
OADM	multiplexeur optique d'insertion-extraction (*optical add-drop multiplexer*)
OCh	canal optique (*optical channel*)
OSA	analyseur de spectre optique (*optical spectrum analyzer*)
OSNR	rapport signal optique/bruit optique (*optical signal-to-noise ratio*)
OTM	multiplexeur de terminaison optique (*optical termination multiplexer*)
OTN	réseau de transport optique (*optical transport network*)
OTUk	unité de transmission optique de niveau k (*optical transport unit-k*)
OXC	brasseur optique (*optical cross connect*)
QFME	équipement de mesure du facteur Q (*Q-factor measurement equipment*)
PRBS	séquence binaire pseudo-aléatoire (*pseudo-random binary sequence*)
RX	récepteur (*receiver*)
SNR	rapport signal/bruit (*signal-to-noise ratio*)
SPM	modulation autophase (*self phase modulation*)
STM-N	module de transport synchrone de niveau N (*synchronous transport module-N*)
TIA	Association des industries de télécommunication (*Telecommunications Industry Association*)
WDM	multiplex par répartition en longueur d'onde (*wavelength division multiplex*)

5 Présentation du facteur Q

L'Annexe A et l'Appendice I définissent la théorie d'évaluation du facteur Q. Dans des conditions idéales, on part du principe que le facteur Q est donné par les niveaux logiques μ_0 et μ_1 ainsi que par les répartitions du bruit gaussien au voisinage de ces niveaux logiques, qui correspondent aux écarts types σ_0 et σ_1. La zone de chevauchement des queues de répartition correspond à la probabilité d'apparition de décisions erronées. L'Appendice IV présente plusieurs méthodes de mesure des répartitions du bruit et de détermination du facteur Q.

Dans la pratique, plusieurs influences engendrent des distorsions qui ont pour effet de faire perdre aux répartitions leur forme gaussienne (voir la liste de ces influences dans l'Appendice III). Toutefois, il apparaît que ces distorsions affectent principalement les parties supérieures de la répartition, alors que les queues continuent de pouvoir faire l'objet d'une approximation très précise par répartition gaussienne.

Le calcul du coefficient de corrélation conformément à l'Annexe A permettra de confirmer l'applicabilité d'une telle approximation des queues par répartition gaussienne. Pour chaque mesure du facteur Q pour laquelle on devra observer les limites de précision spécifiées au § 6, le coefficient de corrélation retenu se situera entre 0,95 et 1,0.

Si l'ajustement gaussien constitue la méthode de base qui a fait ses preuves pour "l'extrapolation des queues", il existe sans doute des modèles de répartition plus élaborés, qui satisfont également aux caractéristiques de précision définies au § 6. Ces modèles feront l'objet d'un complément d'étude.

6 Caractéristiques de l'équipement de mesure du facteur Q

6.1 Interfaces physiques et débits binaires

6.1.1 Interfaçage des systèmes de transmission

L'équipement de mesure du facteur Q doit pouvoir fonctionner aux points de surveillance de l'amplificateur optique dans le cas où il est procédé à des mesures en service. Il doit aussi pouvoir remplacer les récepteurs des systèmes de transmission aux fins de mesures hors service.

Dans le premier cas, on veillera à dûment compenser tout effet de dispersion du signal, au point de surveillance de l'amplificateur optique.

Par ailleurs, dans le cas de systèmes DWDM, la mise en place d'un filtre de canal optique permettant de sélectionner le canal voulu aux fins de la mesure du facteur Q s'impose et on peut en outre recourir à une amplification optique en amont du filtre.

Des réserves ont été émises quant à l'efficacité des mesures en service aux points de surveillance optique à rendre dûment compte des performances de transmission des canaux optiques, compte tenu des divers dispositifs d'optimisation – compensateurs de la dispersion chromatique ou égaliseurs de ligne, par exemple – mis en place pour obtenir les performances de transmission de bout en bout voulues. L'applicabilité de ce type de mesures en service ainsi que les dispositions connexes à prévoir appellent un complément d'étude.

6.1.2 Débits binaires et tolérance de gigue

L'équipement de mesure du facteur Q (QFME) doit fonctionner à l'un ou à plusieurs des débits binaires définis dans la Rec. UIT-T G.707/Y.1322 [2] pour les signaux du module de transport synchrone de niveau N (STM-N) ou dans la Rec. UIT-T G.709/Y.1331 (réseau de transport optique) pour les signaux de l'unité de transmission optique de niveau k (OTUk).

La gigue maximale admissible aux débits binaires spécifiés pris en charge par l'équipement QFME doit être conforme aux Recommandations UIT-T G.825 [4] ou G.8251 [5], selon le cas.

6.1.3 Réponse du récepteur QFME

La réponse globale amplitude/fréquence du récepteur (RX, *receiver*) – y compris le convertisseur optoélectronique et, le cas échéant, les circuits de filtrage passe-bas, de commande automatique de gain (AGC, *automatic gain control*) et de décision ou d'échantillonnage – doit être choisie de telle sorte que la réponse aux impulsions ISI (brouillage intersymboles) soit aussi faible que possible et exempte de suroscillation.

Il convient de retenir comme objectif général de conception les caractéristiques de filtrage passe-bas du 4e ordre du Bessel-Thompson (ou des caractéristiques équivalentes), conformément aux définitions du récepteur de référence figurant dans les Recommandations UIT-T G.957 [6] et G.691 [1].

La largeur de bande de bruit électrique B_e nominale du récepteur (RX) doit être de:

$$0{,}75 \times f_{clk},$$

où f_{clk} est la fréquence d'horloge exprimée en hertz (voir le § 6.1.7 pour de plus amples précisions sur la procédure de correction de la largeur de bande).

Au lieu de définir un gabarit de tolérance pour la réponse en fréquence, il est préférable d'utiliser un gabarit d'impulsion pour définir de manière appropriée la réponse impulsionnelle du récepteur. La définition et la vérification du gabarit d'impulsion appellent un complément d'étude.

D'autres méthodes pouvant être utilisées pour définir la réponse impulsionnelle du récepteur sont exposées dans l'Appendice V.

6.1.4 Filtre de canal optique

Si un filtre de canal optique est nécessaire pour la mesure du facteur Q, ce filtre doit satisfaire aux caractéristiques suivantes: la largeur de bande optique B_{ch} de 3 dB doit être supérieure à $2 \times f_{clk}$, avec une courbe de réponse rectangulaire ayant une largeur de –1 dB, d'au moins $1 \times f_{clk}$ (f_{clk} étant la fréquence d'horloge exprimée en hertz).

L'affaiblissement diaphonique entre canaux total, mesuré conformément à la norme CEI 61300-3-29 [11], doit être supérieur à 20 dB.

6.1.5 Gamme des niveaux d'entrée du signal optique

Pour des appareils de mesure fonctionnant à des débits binaires multiples inférieurs ou égaux à 10,7 Gbit/s, les niveaux d'entrée du signal optique doivent s'échelonner au minimum de –6 à –13 dBm pour des récepteurs à diode PIN, et de –9 à (valeur à déterminer) dBm pour des récepteurs à photodiode à avalanche (APD).

Pour les appareils de mesure fonctionnant à un "seul" débit binaire allant de 9,95 à 10,7 Gbit/s, les niveaux d'entrée du signal optique doivent s'échelonner de –6 à –13 dBm pour des récepteurs à diode PIN, et de –9 à (valeur à déterminer) dBm pour des récepteurs APD, ainsi que de –18 à –25 dBm pour des récepteurs APD fonctionnant à 2,5 Gbit/s.

La gamme des niveaux d'entrée du signal optique pour la gamme des 40 Gbit/s appelle un complément d'étude.

Il convient de réduire au minimum les effets de non-linéarité, du fait que la méthode de mesure du facteur Q doit fonctionner en mode linéaire.

6.1.6 Prise en compte du bruit du récepteur

En règle générale, le récepteur (RX) de l'équipement QFME et celui du système de transmission différeront en termes de sensibilité et de largeur de bande, d'où les écarts constatés dans les prévisions des performances de transmission. Il est possible d'éliminer du facteur Q obtenu l'influence du récepteur de l'équipement QFME en procédant à des calculs pour déterminer le facteur Q du seul signal optique.

Par ailleurs, il est possible d'évaluer les caractéristiques d'erreur de ce signal ainsi que celles du récepteur du système, si l'on connaît la dépendance du taux d'erreur sur les bits (BER) du récepteur à l'égard de la puissance d'entrée.

6.1.6.1 Paramètres de bruit du récepteur

Pour faciliter l'évaluation du taux d'erreur sur les bits (BER) du système à partir des résultats obtenus pour le facteur Q, l'équipement QFME doit indiquer la tension de bruit intrinsèque du récepteur à la puissance d'entrée effective du signal optique et au débit binaire de fonctionnement effectif. Ces tensions de bruit doivent être indiquées sous une forme normalisée représentant des valeurs *Q* intrinsèques:

$$Q_{i1} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_{i1}}; Q_{i0} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_{i0}}; Q_i = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_{i1} + \sigma_{i0}} \qquad (6\text{-}1)$$

Les valeurs *Q* intrinsèques sont étalonnées selon une mesure "dos à dos" utilisant un émetteur de référence tel que représenté à la Figure 1, mais modifié comme suit:

L'amplificateur EDFA et un des affaiblisseurs variables sur le trajet du signal, ainsi que la source de diaphonie, sont supprimés. Comme séquence de modulation, on utilisera un signal STM-N ou OTUk trame ou une séquence PRBS-23 pure.

Le rapport d'extinction (ER, *extinction ratio*) du signal est censé être infini pour les valeurs Q intrinsèques indiquées. Si l'étalonnage du récepteur de l'équipement QFME (RX-QFME) est

effectué pour un rapport ER fini, les valeurs Q intrinsèques doivent être multipliées par (ER + 1)/(ER – 1) avant d'être indiquées.

6.1.6.2 Calcul des valeurs *Q* du signal (facultatif)

Conformément à l'Annexe A, parallèlement à l'évaluation du facteur *Q mesuré*, les grandeurs μ_0, μ_1, σ_0 et σ_1 sont connues et les grandeurs suivantes peuvent être calculées:

$$Q_0 = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0}, \quad Q_1 = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1}$$

Connaissant les paramètres de bruit du récepteur (équation 6-1), il est possible de compenser le bruit intrinsèque de l'équipement QFME, qui est contenu dans σ_0 et σ_1, pour déterminer les valeurs Q du *seul* signal.

$$\frac{1}{Q_{sig1}^2} = \frac{1}{Q_1^2} - \frac{k^2}{Q_{i1}^2}; \quad \frac{1}{Q_{sig0}^2} = \frac{1}{Q_0^2} - \frac{k_2}{Q_{i0}^2};$$

pour $k = (ER + 1)/(ER - 1)$, ER = rapport d'extinction du signal

$$\frac{1}{Q_{sig}} = \frac{1}{Q_{sig0}} + \frac{1}{Q_{sig1}} \tag{6-2}$$

Etant donné que le rapport d'extinction (ER) du signal est inconnu dans de nombreuses applications pratiques, on doit pouvoir assurer la compensation du bruit pour $k = 1$, ce qui correspond à un *rapport d'extinction* infini (débouchant concrètement sur une sous-compensation du bruit dans certains cas).

Quoi qu'il en soit, il convient d'indiquer clairement dans la présentation des résultats du facteur Q si la compensation du bruit intrinsèque est active et, s'il n'est pas infini, le *rapport d'extinction* pris en considération doit également être indiqué.

6.1.6.3 Evaluation des valeurs *Q* du système (facultative)

Connaissant la valeur Q_{sig} du signal à l'entrée du récepteur, il est possible d'évaluer le facteur Q global Q_{syst}, y compris les propriétés du récepteur du système (dans le cas le plus défavorable, par exemple). Cette évaluation peut être effectuée par une fonction facultative de l'équipement QFME, selon les procédures et équations suivantes:

en premier lieu, on définit le récepteur (RX) du système d'après son propre facteur Q intrinsèque Q_{RX}, qui est fonction de la puissance du signal optique à l'entrée du récepteur et qui peut être obtenu d'après le comportement du récepteur, si on connaît le rapport taux d'erreur sur les bits (BER)/puissance d'entrée. Si le récepteur (RX) a été défini d'après un rapport d'extinction ER_{char} différent de la valeur effective, le facteur Q_{RX} doit être modifié selon la formule suivante:

$$Q_{RXactual} = \frac{ER_{char} + 1}{ER_{char} - 1} \times \frac{ER_{actual} - 1}{ER_{actual} + 1} \times Q_{RX}$$

si le récepteur (RX) du système a une largeur de bande électrique B_{RX} différente de la valeur nominale de la largeur de bande électrique (B_e), les résultats obtenus pour Q_{sig} doivent être corrigés par le facteur:

$$\sqrt{\frac{B_e}{B_{RX}}}$$

En reprenant les valeurs Q_{sig0} et Q_{sig1} de l'équation 6-2, l'évaluation du facteur Q est effectuée d'après la formule suivante:

$$\frac{1}{Q_{syst}} = \sqrt{\frac{B_{RX}/B_e}{Q_{sig0}^2} + \frac{1}{4Q_{RX}^2}} + \sqrt{\frac{B_{RX}/B_e}{Q_{sig1}^2} + \frac{1}{4Q_{RX}^2}} \qquad (6\text{-}3)$$

Le taux d'erreur sur les bits (BER) correspondant est évalué selon l'équation A-5.

6.1.7 Etalonnage du récepteur

L'étalonnage du récepteur vise à éliminer l'effet de tout écart de la largeur de bande électrique par rapport aux valeurs nominales définies au § 6.1.3. L'étalonnage est effectué au niveau d'entrée du signal optique le plus élevé admissible de manière que le bruit intrinsèque du récepteur puisse ne pas être pris en considération.

L'étalonnage est effectué pour un facteur Q de 7, correspondant à un BER de $\approx 10^{-12}$, un signal STM-N ou OTUk tramé ou une séquence PRBS-23 pure étant pris comme signal de modulation.

La largeur de bande électrique B_e variant en fonction du débit binaire, il convient d'appliquer la procédure d'étalonnage à chaque débit binaire pris en charge par l'équipement QFME.

Le montage utilisé pour l'étalonnage est représenté sur la Figure 1.

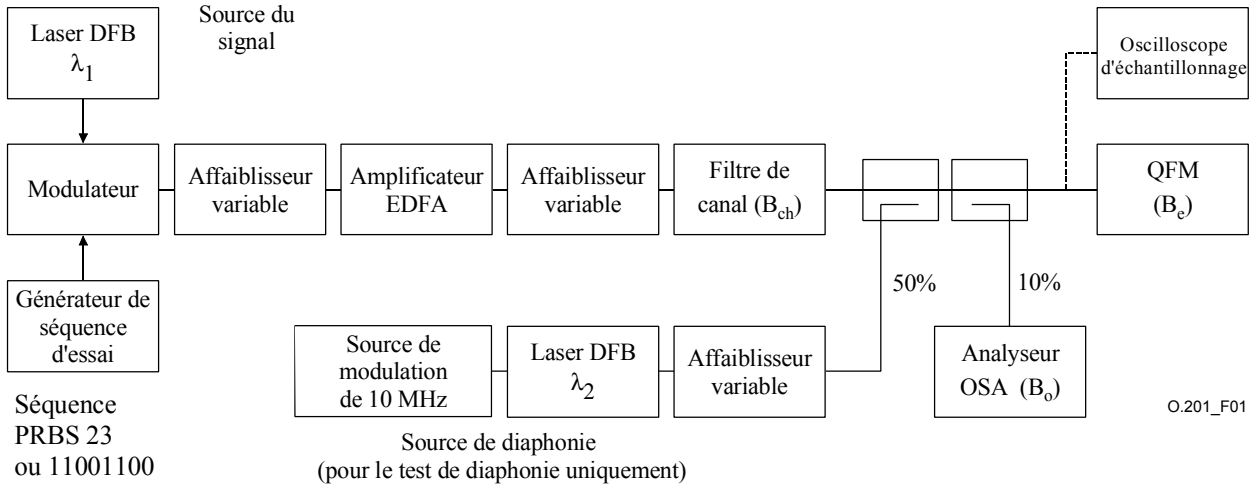


Figure 1/O.201 – Montage utilisé pour l'étalonnage et l'essai de diaphonie

Le principe de base de l'étalonnage consiste à émettre un signal de transmission optique numérique, qui ne soit dégradé que par le bruit d'émission spontanée amplifiée (ASE, *amplified spontaneous emission*). Dans le cas présent, il est possible de prévoir le facteur *Q* du signal d'après le rapport *OSNR* (mesuré avec un analyseur OSA) et d'après le rapport d'extinction *ER* (mesuré avec un oscilloscope d'échantillonnage).

A noter que le signal d'étalonnage doit être visuellement indépendant du brouillage ISI, de la suroscillation ou de la fermeture du diagramme en oeil en raison de l'insuffisance de la largeur de bande de modulation.

Dans le cas où le bruit intrinsèque du récepteur peut ne pas être pris en considération, la relation entre le facteur *Q*, le rapport *OSNR* et le *rapport d'extinction* pour des signaux sans retour à zéro (NRZ) est donnée par la formule suivante:

$$OSNR = \frac{(ER+1)}{(ER-1)^2} \times \left[Q^2 \times \left(\frac{B_e}{B_o} \right) \times (ER+1) + Q \times \sqrt{\frac{B_e \times (8ER \times Q^2 \times B_e + (ER-1)^2 \times (2B_{ch} - B_e))}{2B_0^2}} \right] \quad (6\text{-}4)$$

Dans l'hypothèse où $Q = 7$ et $B_e = 0{,}75\ f_{clk}$, le rapport OSNR se calcule selon l'équation 6-4.

On aligne sur la valeur ainsi obtenue pour le rapport OSNR le signal d'étalonnage que l'on mesure avec l'équipement QFME (résultat du facteur Q = $Q_{measured}$).

On calcule ensuite le facteur de correction:

$$CF = \frac{7}{Q_{measured}}$$

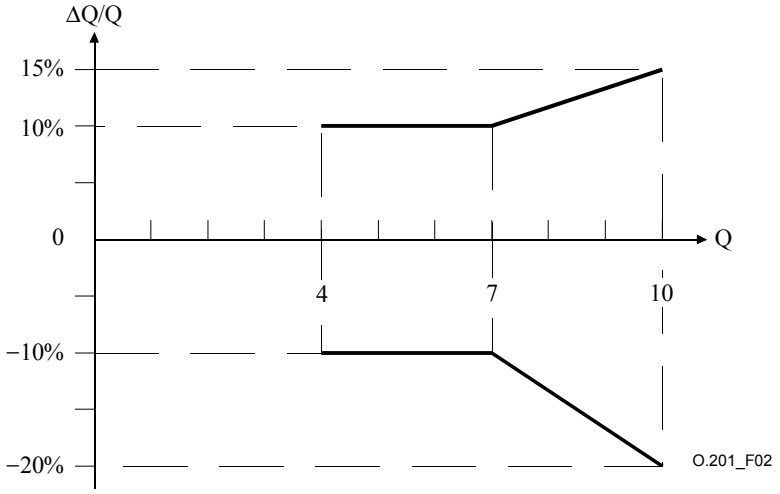
que l'on multipliera par tous les résultats Q que l'on obtiendra avec l'équipement QFME.

A noter qu'il y a lieu de modifier l'équation 6-4 dans le cas de signaux avec retour à zéro (RZ).

6.2 Précision requise et essais de recettes

6.2.1 Précision

Tout équipement QFME conforme à la présente Recommandation, quelle que soit la technique de mesure qu'il utilise, doit satisfaire aux limites de précision suivantes pour un facteur Q équivalent calculé mathématiquement d'après des mesures du rapport OSNR et du rapport d'extinction (ER) effectuées (comme indiqué au § 6.1.7, équation 6-4) sur un signal d'essai ayant un rapport d'extinction $ER \geq 8$ dB.



NOTE – L'équipement QFME fonctionne à la puissance optique d'entrée optimale.

Figure 2/O.201 – Limites de précision en fonction du facteur Q

La puissance optique d'entrée optimale doit être spécifiée par le fabricant.

Si l'équipement QFME ne fonctionne pas à la puissance optique d'entrée optimale, la marge d'erreur supplémentaire qui en résulte doit être comprise dans les limites indiquées par la Figure 3:

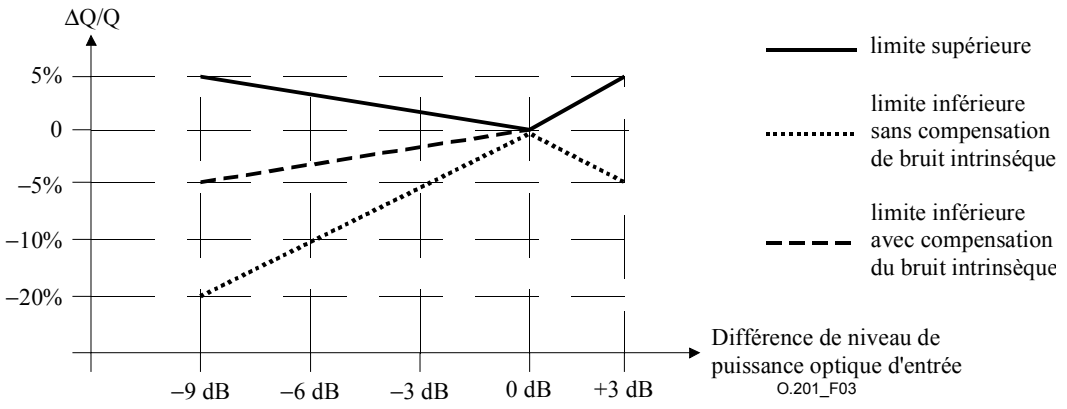


Figure 3/O.201 – Limites de tolérance pour l'imprécision liée à l'accroissement de niveau

6.2.2 Essais de recette

6.2.2.1 Essai de diaphonie

Comme indiqué dans l'Appendice III, un certain nombre d'effets (brouillage intersymboles (ISI), modulation autophase (SPM, *self phase modulation*) et diaphonie, par exemple) peuvent déformer le diagramme en œil et donner lieu à des répartitions non gaussiennes en raison de la séparation des niveaux logiques. Toutefois, même en pareils cas, il est possible d'appliquer l'ajustement gaussien uniquement aux points de mesure proches du centre de l'œil et d'utiliser les courbes d'ajustement pour extrapoler la valeur de Q.

Un équipement QFME conforme à la présente Recommandation doit pouvoir évaluer de façon adéquate des diagrammes en œil déformés dans les conditions retenues pour l'essai de diaphonie suivant.

Conformément à la Figure 1, on ajoute au montage utilisé pour l'étalonnage une source de diaphonie qui produit un signal laser DFB modulé en permanence par tout ou rien (modulation hachée), d'une puissance d'environ 10 MHz/100% pour un facteur d'utilisation de 50% ±1% avec impulsion rectangulaire. La longueur d'onde du signal laser ne devrait pas être espacée de plus de 1 nm du signal d'étalonnage, et ce dans la même bande.

Cet essai vise théoriquement à réduire l'ouverture du diagramme en œil due à la diaphonie non synchrone par un facteur d'environ:

$$1-\frac{1}{Q}$$

A cette fin, mesurée avec un analyseur OSA à l'entrée de l'équipement QFME, la relation de la puissance optique de diaphonie P_{xt} à la puissance du signal d'étalonnage P_{av} doit être exprimée comme suit:

$$P_{xt} = \frac{1}{Q} \times P_{av} \times \frac{ER-1}{ER+1} \qquad (6\text{-}5)$$

La source de diaphonie étant hors tension, on procède au réglage du signal d'étalonnage dans l'équipement QFME comme indiqué au § 6.1.7 de manière à obtenir pour $Q_{no\ xt}$ une valeur approximative de 7 ($Q_{no\ xt} \approx 7$).

On procède ensuite au réglage de la source de diaphonie conformément à l'équation 6-5 en appliquant la valeur $Q_{no\ xt}$ mesurée et on mesure une nouvelle fois le facteur Q. Etant donné que l'ouverture du diagramme en oeil est réduite sous l'effet de la diaphonie – pendant 50% du temps seulement, toutefois, puisque le facteur d'utilisation est de 50% – le facteur Q s'en trouve modifié comme suit:

$$\Delta Q_{xt} = Q_{no\,xt} \times \frac{P_{xt}}{P_{av}} \times \frac{ER+1}{ER-1} + 0.08 \pm 0.2 \qquad (6\text{-}6)$$

6.3 Présentation des résultats

Il convient d'indiquer le facteur Q du signal ainsi que le taux d'erreur sur les bits (BER) optimal estimatif.

Une représentation numérique ou graphique de la qualité de l'ajustement peut être communiquée à l'utilisateur pour lui donner une indication de la validité de la mesure.

D'autres données paramétriques relatives au facteur Q et à sa mesure peuvent être communiquées.

Dans le cas d'applications avec correction d'erreur directe (FEC, *forward error correction*), le BER estimatif obtenu d'après les mesures du facteur Q est le BER brut, que l'on observerait si la correction FEC n'était pas activée. La raison en est que la mesure du facteur Q repose sur une évaluation effectuée dans la couche Physique (diagramme en œil). L'amélioration du BER par correction FEC dans le réseau est une fonction connue et qui peut être prise en considération par l'utilisateur.

La théorie exposée dans la présente Recommandation impose de ne pas appliquer de correction FEC avant de procéder à l'évaluation du facteur Q. Si pour des raisons non abordées dans la présente Recommandation une correction FEC est appliquée, il convient de le signaler et d'indiquer quels en sont les résultats.

7 Fonctions diverses

Ces fonctions n'ont aucune incidence directe sur la définition des mesures du facteur Q; il convient de les considérer comme étant facultatives pour l'équipement de mesure.

7.1 Accès de télécommande

L'équipement de mesure peut être télécommandé à l'aide d'une interface normalisée (conforme à la spécification IEEE 488/CEI 625, par exemple).

7.2 Interface de réseau de gestion des télécommunications (RGT)

L'équipement de mesure peut avoir une interface Q appropriée offrant des services de RGT.

8 Conditions d'exploitation

8.1 Conditions ambiantes

Pour satisfaire aux performances électriques et fonctionnelles requises, l'équipement QFME doit fonctionner dans les conditions spécifiées dans la Rec. UIT-T O.3 [9].

8.2 Comportement en cas de défaillance de l'alimentation en énergie

Une interruption de l'alimentation en énergie doit pouvoir être identifiée par l'équipement QFME.

9 Bibliographie

[B1] HUMBLET (P.A.) et AZIZOGLU (M.): On the bit error rate of lightwave systems with optical amplifiers, *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-9, 1991, pp. 1576-1582.

10 Lectures complémentaires

- BERGANO (N.S.), KERFOOT (F.W.) et DAVIDSON (C.R.): Margin Measurements in Optical Amplifier Systems, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 5, No. 3, mars 1993, pp. 304-306.
- OFSTP-4A, *Optical Eye Pattern Measurement Procedure,* TIA/EIA-526-4A, novembre 1997.
- OFSTP-8, *Accelerated measurements of low BERs in digital fiber optic systems,* TIA/EIA-526-8.
- HP E4543A, *Q factor and eye contour application software*.
- BEVINGTON (P.R.): Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, McGraw Hill, 1969, page 92.

Annexe A

Procédure mathématique pour l'évaluation du facteur Q par la méthode de séparation des niveaux de décision

A.1 Conditions préalables

La procédure mathématique exposée ici n'est valable que dans le cas où on détermine le taux d'erreur sur les bits (BER) sans recourir à la correction d'erreur directe (FEC).

A.2 Dépendance théorique du BER à l'égard du seuil

La relation théorique est la suivante:

$$BER = \frac{1}{4}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{\mu-\mu_0}{\sqrt{2}\,\sigma_0}\right) + \frac{1}{4}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{\mu_1-\mu}{\sqrt{2}\,\sigma_1}\right) \qquad \text{(A-1)}$$

où μ_1 et μ_0 sont les valeurs moyennes de tension des niveaux 1 et 0, σ_1 et σ_0 étant les écarts types de la répartition du bruit entre les niveaux 1 et 0. μ est la position du seuil de décision.

Il s'agit de déterminer μ_1, μ_0 , σ_1 et σ_0 d'après les valeurs mesurées pour $BER = f(\mu)$ et de calculer le BER optimal ainsi que le facteur Q d'après ces valeurs.

A.3 Séparation du BER(0) et du BER(1)

Comme la probabilité d'erreur totale est la somme de deux termes correspondant à la moitié de la probabilité d'erreur sur les bits conditionnelle, la méthode de séparation suivante est appliquée:

Première étape

les deux répartitions sont assurées séparément:

$BER\ 1\ (\mu) = 1/4 \times \mathrm{erfc}\ (V_1/\sqrt{2})$ pour la moitié supérieure du diagramme en œil (A-2)

$BER\ 0\ (\mu) = 1/4 \times \mathrm{erfc}\ (V_0/\sqrt{2})$ pour la moitié inférieure du diagramme en œil (A-3)

avec $V_1(\mu) = (\mu_1 - \mu)/\sigma_1$ et $V_0(\mu) = (\mu - \mu_0)/\sigma_0$

En convertissant les équations A-2 et A-3 en V_0 et V_1 et en utilisant la fonction d'erreur inverse, on calcule la dépendance de V_1 et de V_0 à l'égard du μ d'après les valeurs BER mesurées au moyen de lignes droites de régression. On obtient ainsi la première série de valeurs estimatives pour μ_1, μ_0, σ_1 et σ_0 (Figure A.1).

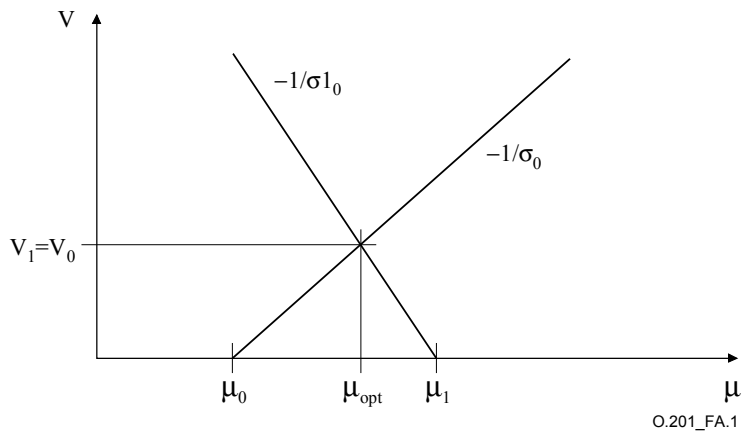


Figure A.1/O.201 – Extrapolation au moyen de lignes droites de régression

On calcule $V_1(\mu)$ à partir des points de mesure du niveau "1".

On calcule $V_0(\mu)$ à partir des points de mesure du niveau "0".

Seconde étape:

On poursuit les calculs en appliquant l'intégralité de l'équation A-1. Pour améliorer les valeurs de μ_1 et de σ_1, on introduit dans cette équation les valeurs estimatives de μ_0 et de σ_0 et on détermine une nouvelle fois le rapport de V1 à μ, ce qui permet d'obtenir une série de valeurs μ_1 et σ_1 plus précises. D'après cette nouvelle série de valeurs, on détermine de façon analogue une série de valeurs μ_0 et σ_0 améliorées.

On répète la seconde étape de façon itérative. Si la valeur V_{opt} de la Figure A.1 subit une variation inférieure à 10^{-3}, on stoppe l'itération.

A.4 Calcul des résultats

On prend la dernière série de valeurs μ_1, μ_0, σ_1 et σ_0 pour calculer les résultats correspondant au BER optimal et au facteur Q.

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \tag{A-4}$$

On détermine le BER estimatif optimal selon l'équation A-1 et en posant $\mu = \mu_{opt}$ conformément à la Figure A.1. On obtient ainsi:

$$optBER = \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \tag{A-5}$$

La qualité d'ajustement des deux lignes droites de régression, représentée par leurs coefficients de corrélation, atteste la validité des résultats. Pour les limites de précision spécifiées dans la présente Recommandation (§ 6), les coefficients de corrélation se situeront entre 0,95 et 1,0.

Appendice I

Théorie du facteur Q

I.1 Théorie du facteur Q

I.1.1 Hypothèses

Uns et zéros non corrélés; P(0) = P(1) = 0,5.

Le bruit additif est statistiquement indépendant du signal.

I.1.2 Facteur Q

On entend par facteur Q, pour un signal de transmission numérique, le rapport signal/bruit (SNR) à l'entrée du circuit de décision des récepteurs; il est exprimé comme suit:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \tag{I-1}$$

Le facteur Q peut être exprimé en décibels plutôt qu'en valeurs linéaires:

$$Q\,(\text{décibels}) = 20 \times Log_{10}\, Q\,(\text{valeur linéaire}) \tag{I-2}$$

où μ_1 et μ_0 sont les valeurs moyennes de tension des niveaux 1 et 0. σ_1 et σ_0 étant les écarts types de la répartition du bruit entre les niveaux 1 et 0.

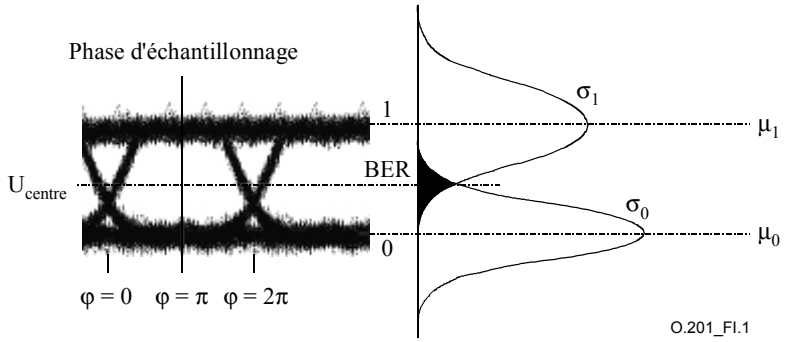


Figure I.1/O.201 – Relation entre la fonction de densité de probabilité et le taux d'erreur sur les bits

La relation entre le BER et les valeurs μ et σ est décrite dans l'équation A-1.

I.2 Détermination approchée de la fonction erfc

Pour simplifier les calculs, il est proposé d'appliquer l'équation I-3 pour déterminer de manière approchée la fonction erfc.

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \times \left[2 \times e^{-\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \frac{a0 + a1 \times \frac{Q}{\sqrt{2}} + a2 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left[b0 + b1 \times \frac{Q}{\sqrt{2}} + b2 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2 + b3 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^3 \right] \times \sqrt{\pi}} \right] \tag{I-3}$$

où:

a0 = 1,69071595	b0 = 1,90764542
a1 = 1,45117156	b1 = 3,79485940
a2 = 0,50003230	b2 = 2,90845448
	b3 = 1,00000000

Comme l'indique la Figure I.2, la précision de cette approximation est supérieure à 2×10^{-6} pour des valeurs du facteur Q supérieures à 1,5 (Q > 1,5), ce qui suffit amplement aux fins de l'application du facteur Q. L'approximation BER3(Q) donne des erreurs plus importantes pour des valeurs du facteur Q inférieures à 5 (Q < 5) et ne devrait donc pas être retenue.

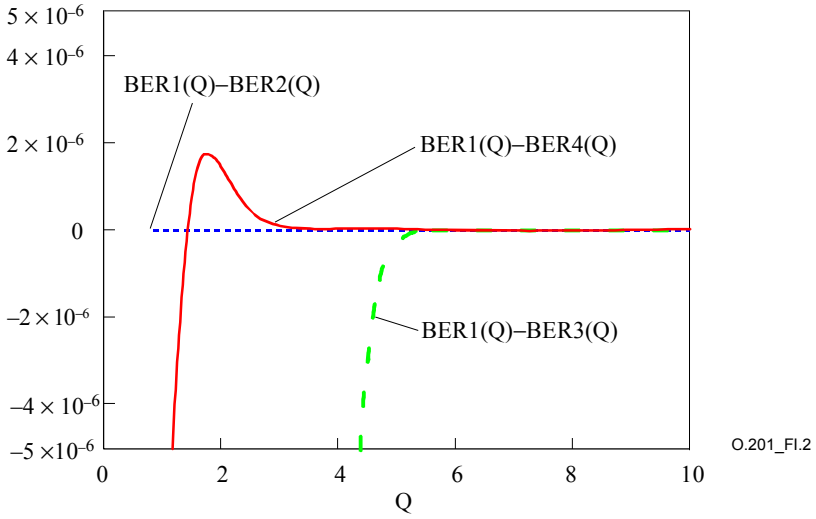


Figure I.2/O.201 – Précision de diverses approximations de la fonction erfc

NOTE – La Figure I.2 indique les écarts par rapport à la valeur théorique de *BER1(Q)*.

BER2(Q), ligne pointillée: approximation par intégration numérique.

BER3(Q), ligne tiretée: approximation selon l'équation $\left(BER3(Q) = \frac{1}{Q \times \sqrt{2}} \times e^{\frac{-Q^2}{2}} \right)$

BER4(Q), ligne en trait plein: approximation selon l'équation I-3.

I.3 Fonctions erfc(x) et erfc^{-1} (x) inverses

Le calcul de μ_0, μ_1, σ_0, σ_1 et Q nécessite également la fonction erfc inverse. Comme la précision de l'équation I-3 est excellente, on détermine la fonction erfc^{-1} (x) au moyen d'itérations de la fonction erfc(x), en commençant par une valeur figurant dans une table de consultation.

Il est mis fin à l'itération dès lors que la concordance est meilleure de 10^{-6}.

Appendice II

Performances de transmission et caractéristiques des canaux optiques

II.1 Performances de transmission des canaux optiques

II.1.1 Application d'une méthode de mesure du facteur Q

La Figure II.1 présente un exemple d'application d'une méthode de mesure du facteur Q. Cette méthode permet d'accélérer les mesures des performances de transmission dans un chemin de couche canal optique (chemin OCh). Un tel chemin de couche canal optique peut faire partie d'un réseau optique plus complexe incorporant des brasseurs optiques (OXC) et/ou des multiplexeurs optiques d'insertion/extraction (OADM).

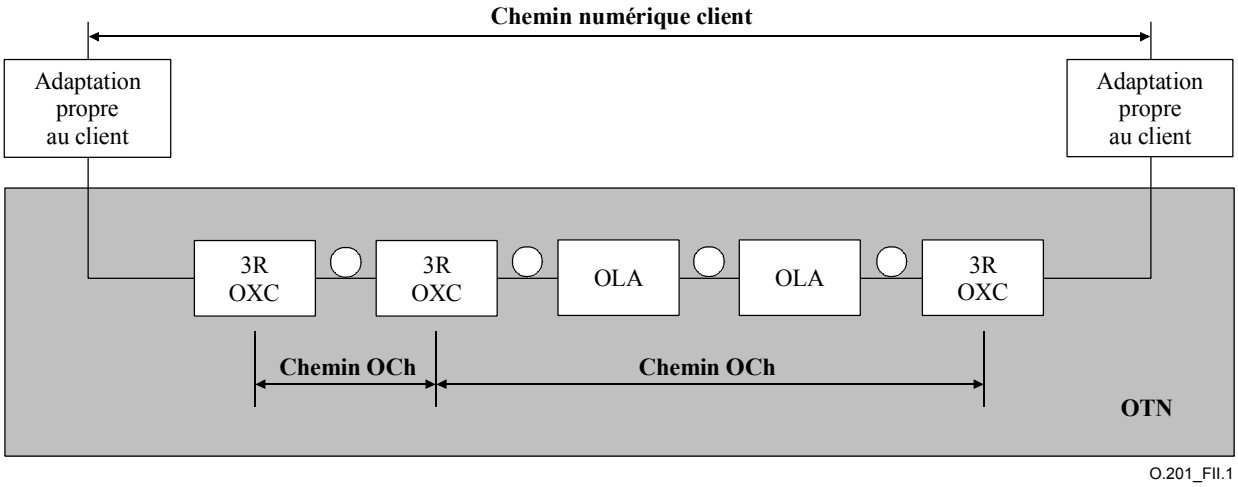


Figure II.1/O.201 – Réseau de transport optique (OTN)

II.2 Caractéristiques des canaux optiques

II.2.1 Caractéristiques optiques

Les canaux optiques se caractérisent par les principaux attributs suivants:

- longueur d'onde;
- puissance;
- rapport signal bruit/optique (OSNR);
- largeur de bande prise en charge.

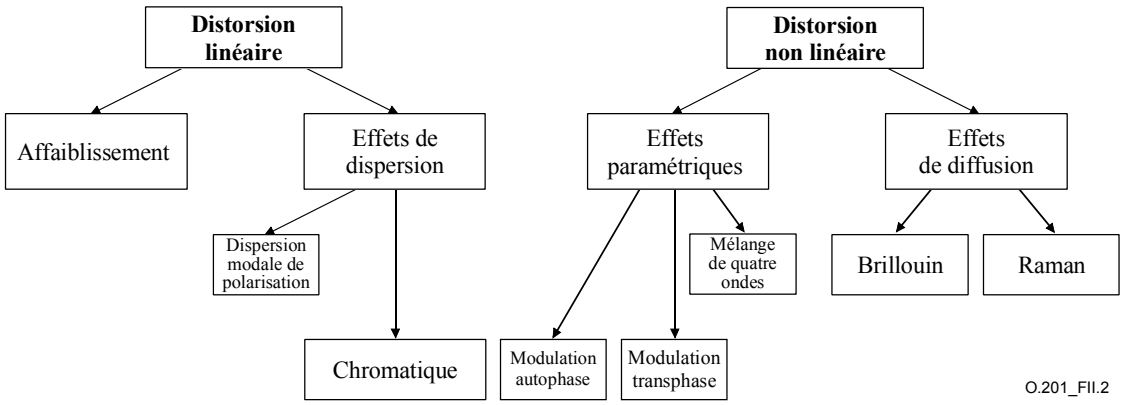


Figure II.2/O.201 – Sources de dégradation de la transmission avec multiplexage DWDM

Il apparaît sur la Figure II.2 que le rapport signal bruit/optique (OSNR) est déterminé par le bruit de l'amplificateur et l'effet cumulé des nombreux phénomènes de distorsion linéaire et non linéaire présents dans les systèmes de transmission sur fibres optiques à haut débit.

La méthode de test du facteur Q peut s'appliquer à toutes ces dégradations et offre par conséquent des informations complémentaires sur les performances, informations impossibles à obtenir par des mesures du spectre optique et du rapport OSNR.

II.2.2 Taux d'erreur sur les bits

Du point de vue du client, le taux d'erreur sur les bits (BER) de bout en bout est un paramètre de mesure fondamental des performances de tout système de transmission numérique. En raison de la corrélation entre les nombreux facteurs de dégradation des performances de transmission des canaux optiques, il n'existe aucune relation directe entre le BER et les caractéristiques optiques.

Les mesures du BER sont des mesures hors service, du fait qu'elles reposent sur une comparaison bit à bit entre le train de bits reçu et une séquence d'essai connue.

II.2.3 Taux d'erreur sur les blocs

Des mesures en service du taux d'erreur sur les blocs peuvent remplacer les tests d'évaluation des caractéristiques du BER; toutefois, les résultats de ces mesures ne sont accessibles qu'aux limites du réseau de transport optique (OTN).

II.2.4 Facteur Q

On entend par facteur Q le rapport signal/bruit électrique (ESNR) à l'entrée du circuit de décision d'un récepteur. Le rapport ESNR rend compte de tous les défauts optiques et électriques engendrant des dégradations au point examiné à l'intérieur du réseau optique. A défaut de pouvoir procéder à une mesure réelle du BER (faute du temps ou des points d'accès nécessaires pour les essais, par exemple), on peut utiliser la méthode du facteur Q pour évaluer les performances de transmission que l'on peut attendre dans un réseau en service.

La définition du facteur Q est donnée dans l'Appendice I et dans l'équation A-4. Il convient de noter que la précision de l'évaluation du BER dépend étroitement des points de mesure utilisés pour le calcul du facteur Q. Pour des résultats optimaux, il convient de déterminer les valeurs μ et σ de l'équation A-4 d'après le front arrière de l'impulsion gaussienne à proximité du centre du diagramme en oeil, comme indiqué au § 5.5.

En tant que telles, les mesures du facteur Q rendront uniquement compte de la qualité de fonctionnement du réseau à l'intérieur du récepteur de l'équipement QFME. Il importe donc de connaître de manière très précise la sensibilité et la largeur de bande de ce récepteur pour pouvoir en tirer des conclusions quant à la qualité de fonctionnement du récepteur du système.

Contrairement à la surveillance du BER et du taux d'erreur sur les blocs, la mesure du facteur Q nécessite simplement la conversion optique/électrique et la reconstitution du rythme, mais ni le décodage de trames ni l'analyse de surdébit. Elle peut donc être appliquée également à des points de connexion de canaux optiques entre régénérateurs 3R (voir la Figure II.1). Des précisions sur la théorie du facteur Q sont données dans l'Appendice I.

Appendice III

Imperfections à prendre en considération dans les conditions rencontrées dans la pratique

L'Appendice I traite de la théorie d'évaluation du facteur Q dans des conditions idéales, dans l'hypothèse où le bruit gaussien constitue la source perturbatrice. Dans la pratique, il convient d'examiner les imperfections suivantes.

III.1 Dégradations analogiques

La densification des longueurs d'onde et le fait qu'elles utilisent des débits binaires de plus en plus élevés poussent les systèmes de transmission optique à leurs limites, avec pour conséquence que le bruit de l'amplificateur ne constitue plus la principale source de dégradation du signal.

Selon le type des fibres, la longueur de celles-ci et la densité des longueurs d'onde, les dégradations linéaires et non linéaires engendreront des écarts par rapport à la répartition gaussienne idéale.

III.2 Interdépendance des séquences d'essai

L'effet exercé par les séquences d'essai reçues sur la forme du diagramme en œil peut modifier les résultats des mesures du facteur Q.

Pour des mesures hors service, il convient de prendre comme séquence d'essai un signal de test tramé conforme à la norme pertinente (Recommandations UIT-T G.707/Y.1322 [2], O.181 [10], G.709/Y.1331 [3], par exemple).

Pour des signaux OTN, il convient d'utiliser une séquence d'essai de même structure que celle qui est décrite au § 17.4 de la Rec. UIT-T G.709/Y.1331 [3].

Pour les autres protocoles, il convient d'utiliser la séquence d'essai la plus appropriée, c'est-à-dire celle qui ressemble le plus au trafic écoulé dans le réseau soumis à l'essai.

III.3 Caractéristiques du récepteur

Des différences entre la qualité de fonctionnement du récepteur de l'équipement QFME et celle de l'élément de réseau connecté à la ligne soumise aux essais peuvent engendrer des fluctuations de la qualité de fonctionnement réelle par rapport à la qualité de fonctionnement prévue.

En ce qui concerne les caractéristiques du récepteur, il y a lieu de prendre en considération les points suivants: réponse en fréquence, gamme des niveaux d'entrée du signal optique, non-linéarité et écrêtage, caractéristiques d'un filtre de canal optique à multiplexage DWDM ou accordable, diaphonie, considérations relatives au préamplificateur.

III.4 Partie retenue pour la phase d'échantillonnage

Le choix de la partie du diagramme en oeil soumise à échantillonnage, dans le sens de la largeur, peut avoir une incidence sur la reproductibilité des mesures du facteur Q.

III.5 Effets sur le facteur Q

En raison des imperfections pratiques exposées ci-dessus, l'évaluation du facteur Q d'après un modèle de bruit gaussien idéal peut déboucher sur des résultats d'extrapolation erronés. Il convient donc d'appliquer ce modèle avec prudence.

Comme certains effets (brouillage intersymboles et diaphonie, par exemple) entrainent un fractionnement des niveaux logiques supérieur et inférieur en plusieurs niveaux, les écarts les plus importants par rapport au modèle gaussien s'observent au voisinage de ces niveaux logiques.

D'autres effets, tels que la modulation transphase, engendrent un bruit qui, bien que n'ayant pas forcément la même répartition d'amplitude que le bruit du récepteur et le bruit de l'amplificateur optique, vient s'ajouter au bruit global pour former une nouvelle répartition gaussienne.

En conséquence, si elle peut être gravement perturbée au voisinage des niveaux logiques, la répartition gaussienne est très proche du modèle idéal au voisinage du niveau de décision (front arrière de l'impulsion gaussienne).

Afin d'obtenir des résultats comparables pour des équipements QFME de différents fabricants, il est proposé d'évaluer le facteur Q uniquement à partir du front arrière de l'impulsion gaussienne, en utilisant des valeurs de mesure du BER de 10^{-4} ou inférieures et en excluant le voisinage direct des niveaux logiques "1" et "0".

Appendice IV

Propositions d'implémentation de l'équipement de mesure du facteur Q

IV.1 Schémas de principe

Les Figures IV.1 et IV.2 représentent deux formes possibles de mise en œuvre de l'équipement QFME. La première, représentée sur la Figure IV.1, permet d'effectuer des mesures en service au moyen de deux circuits de décision. La seconde, représentée sur la Figure IV.2 utilise un seul circuit de décision pour des applications hors service.

D'autres configurations également conformes aux prescriptions de la présente Recommandation sont également intéressantes.

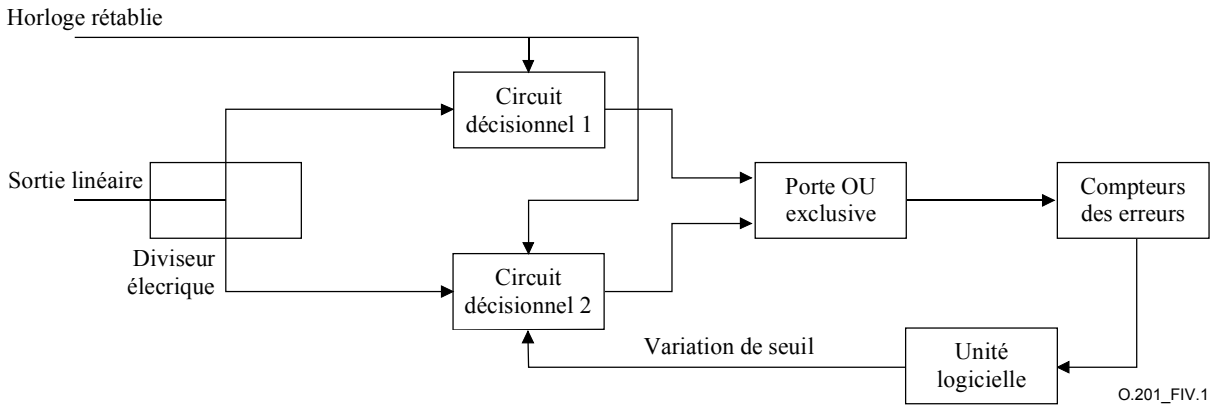


Figure IV.1/O.201 – Schéma de principe d'une implémentation de l'équipement de mesure du facteur Q avec deux circuits de décision

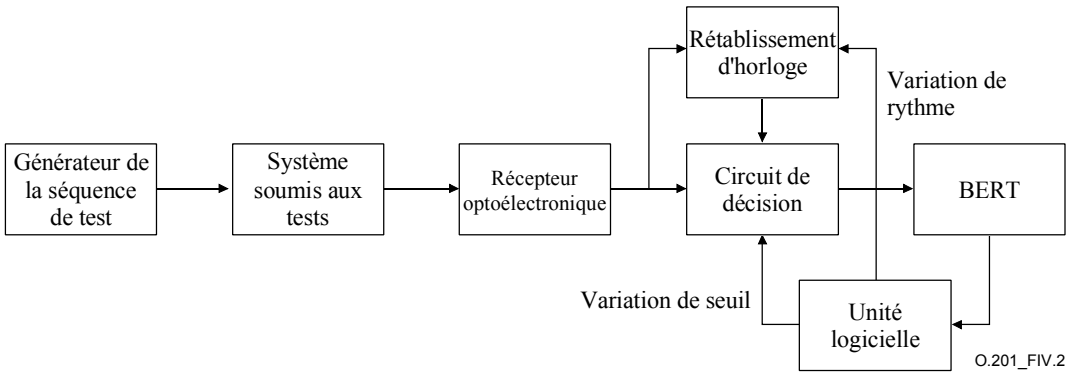


Figure IV.2/O.201 – Forme d'implémentation avec un seul circuit de décision pour les mesures du facteur Q

IV.2 Description fonctionnelle

IV.2.1 Utilisation de deux circuits de décision

Conformément à la Figure IV.1, le signal provenant du convertisseur optique/électrique alimente deux circuits de décision assurant l'échantillonnage du signal électrique au moyen de l'horloge rétablie. Le circuit de décision 1 est réglé sur sa position optimale à l'intérieur du diagramme en œil, qui sert de référence. Le circuit de décision 2 peut être réglé sur des valeurs arbitraires se rapportant à la phase d'échantillonnage et aux niveaux de seuil. Les différences à la sortie de ces deux circuits de décision sont détectées par une porte OU exclusive et comptées comme des erreurs sur les bits. Au moyen d'une unité logicielle, on modifie les paramètres du circuit de décision 2 et on relève les taux d'erreur sur les bits qui en résultent.

Bien qu'il ne nécessite pas une séquence d'essai spéciale, ce type d'équipement peut également utiliser des signaux de trafic réels aux fins des mesures (voir également § III.2).

En assurant l'échantillonnage de l'ensemble du diagramme en œil par rapport à la tension de seuil et à la phase, ce montage de mesure constitue un échantillonneur de diagramme en œil dans le domaine du BER. Dans la pratique, on mesure le BER par rapport à la tension de seuil, en prenant la phase d'échantillonnage comme paramètre (voir la Figure IV.3).

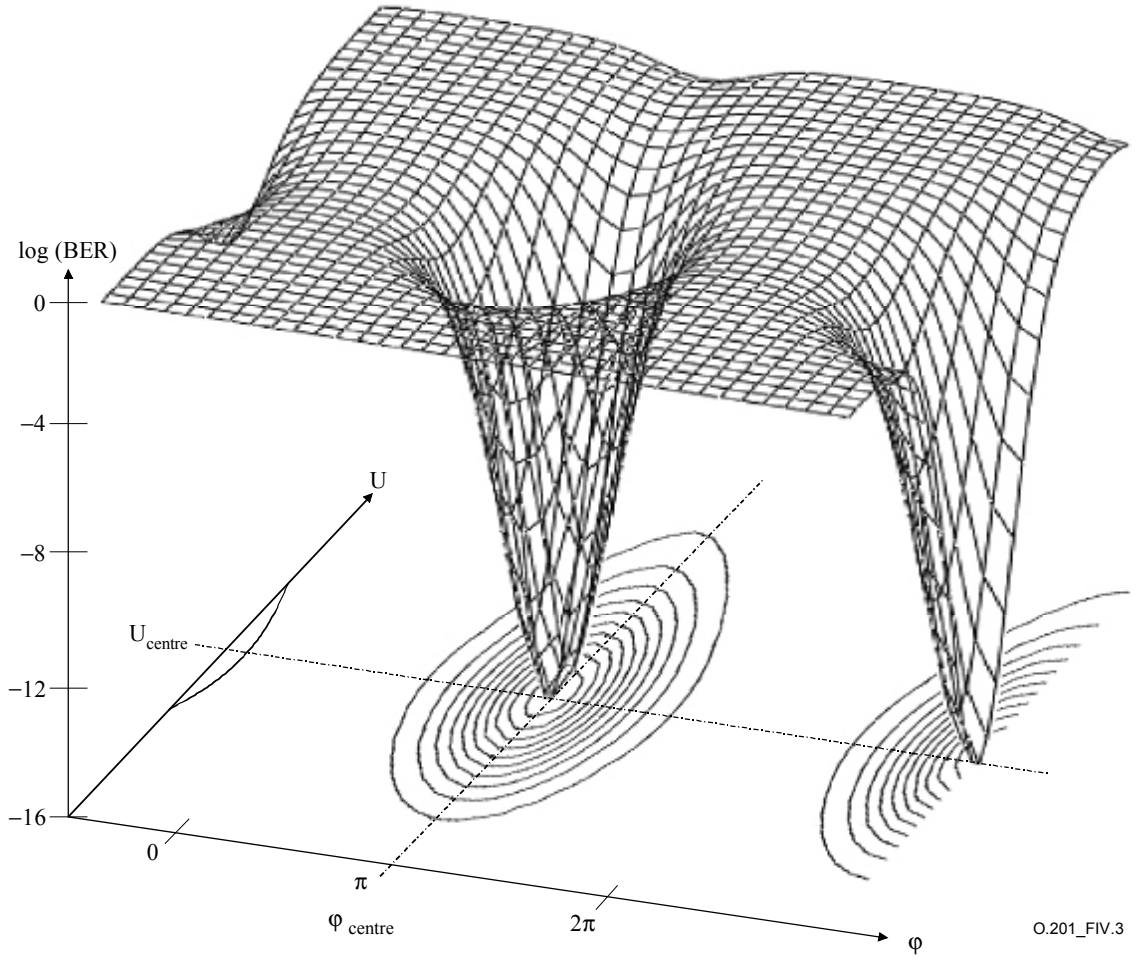


Figure IV.3/O.201 – Taux d'erreur sur les bits en fonction du seuil de décision et de la phase

IV.2.2 Utilisation d'un seul circuit de décision

Contrairement au montage de la Figure IV.1, ce montage nécessite l'utilisation d'un train de données connu (une séquence PRBS provenant du générateur de séquence d'essai). On procède au comptage des erreurs sur les bits découlant d'une variation de la tension de seuil en comparant le signal de sortie du circuit de décision à la séquence de données initiale, dans le module BERT. L'utilisation de séquences d'essai connues peut certes renforcer la reproductibilité du résultat, mais cette méthode peut se révéler assez peu efficace dans le cas où une variation trop importante de la tension de seuil ou de la phase d'échantillonnage entraîne une perte de synchronisation du récepteur des séquences d'essai.

IV.2.3 Opérations mathématiques et extrapolation

Selon *P.A. Humblet et M. Azizoglu* [B1], le résultat recherché est que le BER soit fonction de la tension de seuil.

Comme le montre la Figure IV.4, il existe deux ensembles de points de mesure relevant respectivement des niveaux logiques 1 et 0. A ces deux ensembles de points est appliqué un ajustement gaussien qui peut être réalisé en calculant des lignes droites de régression dans le domaine V = f(μ). Les valeurs μ et σ correspondantes permettent de calculer le facteur *Q* du signal. Les modalités détaillées de l'opération sont indiquées dans l'Annexe A.

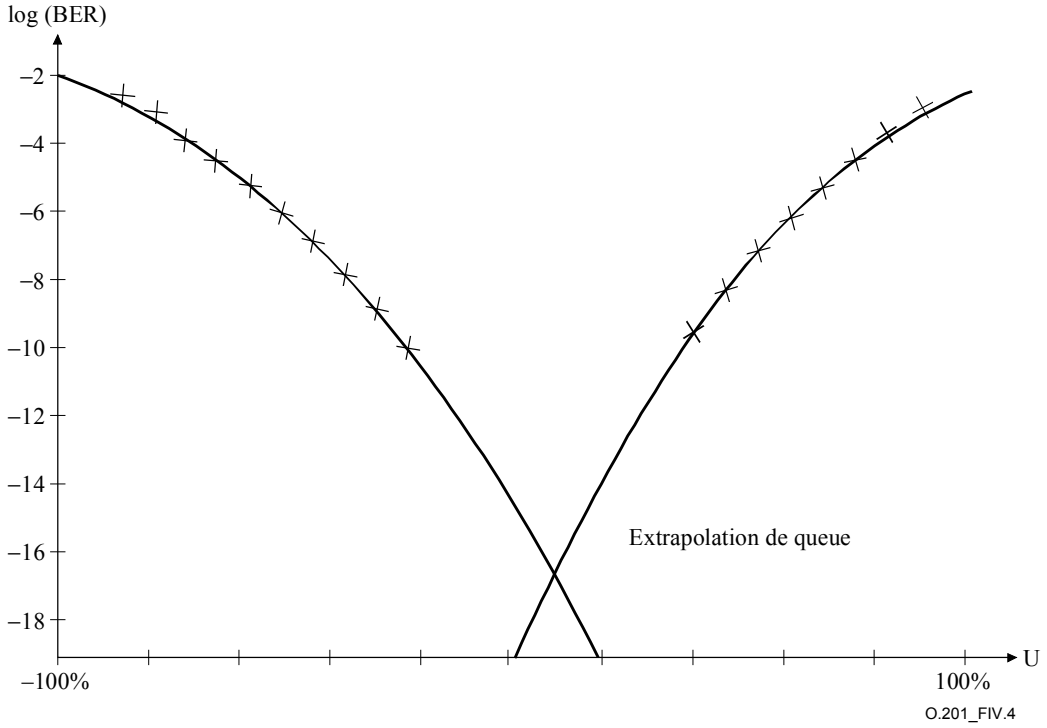


Figure IV.4/O.201 – Extrapolation des points de mesure

Ecart par rapport à la répartition gaussienne:

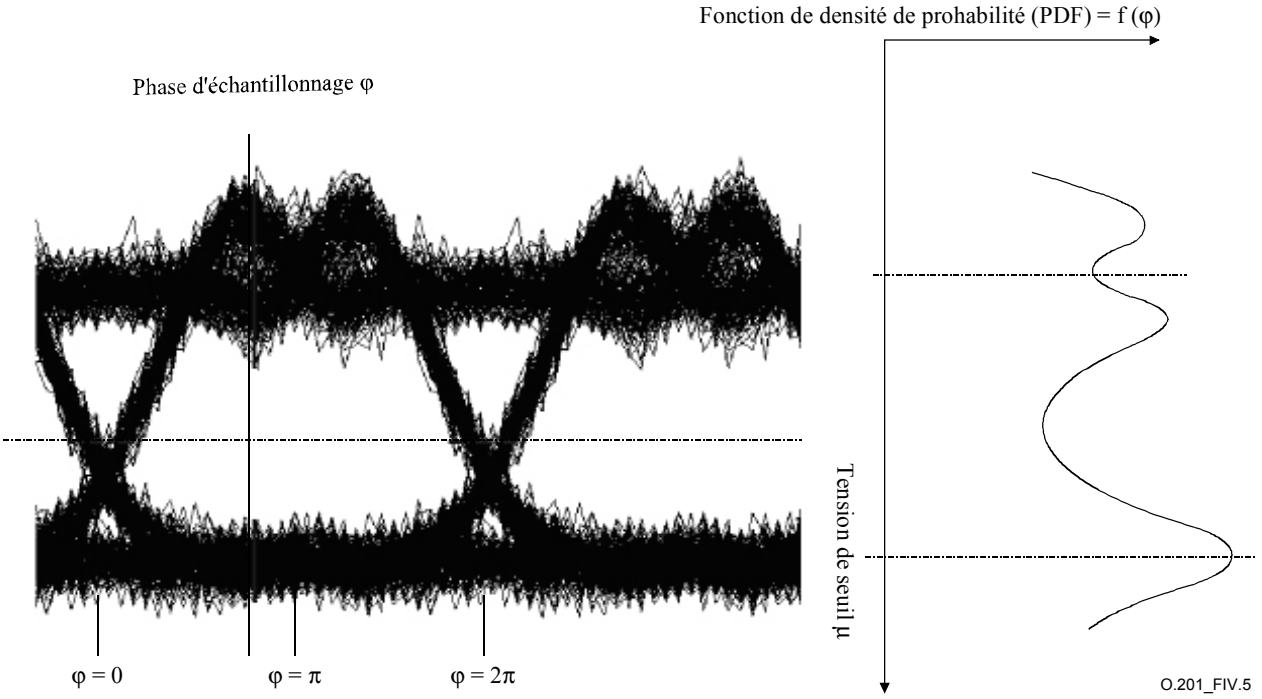


Figure IV.5/O.201 – Répartition non gaussienne

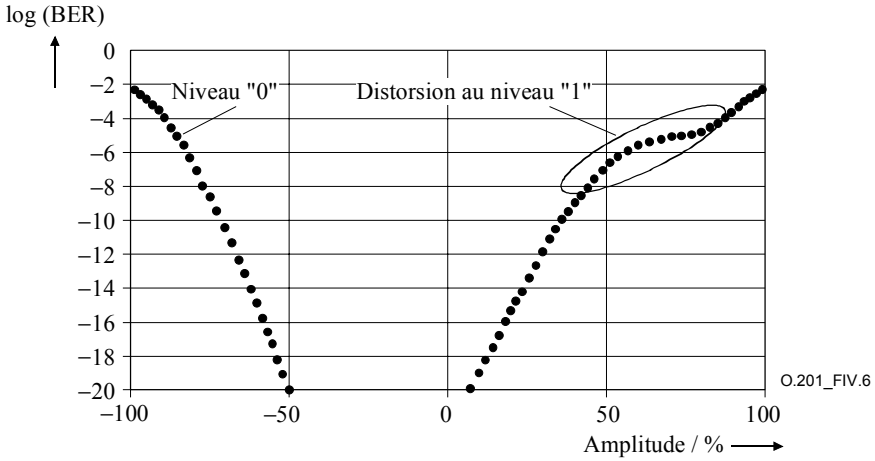


Figure IV.6/O.201 – Raie spectrale brouilleuse à fréquence discrète (diaphonie, par exemple)

Pour l'échantillonnage d'un signal à répartition non gaussienne (Figure IV.5), l'ajustement doit être effectué avec le plus grand soin. Les coefficients de corrélation (voir l'Annexe A) n'étant plus égaux à 1, il convient de modifier la méthode d'ajustement. En ce qui concerne la Figure IV.6, par exemple, on peut améliorer l'ajustement en utilisant uniquement des données correspondant à un BER inférieur à 10^{-7}.

IV.3 Modes de mesure

IV.3.1 Mesures en service

Les mesures en service peuvent être effectuées au moyen d'un montage conforme à celui de la Figure IV.1 qui reprend celui de la Figure 3/G.976 [8].

Dans ce cas, on commence par régler les valeurs de référence de seuil de décision et de base de temps sur une position normalisée au centre de l'ouverture idéale du diagramme en œil. On modifie ensuite le circuit de décision à seuil variable compte tenu de la base de temps et du niveau et on relève le taux d'erreur. Les valeurs de référence de seuil de décision et de base de temps sont automatiquement réglées de façon optimale en fonction de ces données.

A ce stade, on modifie une nouvelle fois les paramètres variables du circuit de décision, on relève le taux d'erreur et on ne retient que les combinaisons de paramètres donnant des taux d'erreur inférieurs à 10^{-4} en vue de les soumettre à une évaluation plus approfondie. A partir de ces données, on calcule ensuite le facteur Q.

IV.3.2 Mesures hors service

Des mesures hors service peuvent également être effectuées au moyen du montage décrit au § 6.3.1. Le signal déclencheur retenu peut provenir d'un canal actif ou d'un générateur approprié de séquences d'essai. Dans ce cas, on peut également utiliser l'équipement de mesure du facteur Q à la place du récepteur du système.

On peut également utiliser, pour effectuer une mesure hors service, un montage conforme à celui de la Figure IV.2.

Dans ce cas, un générateur de séquences d'essai est nécessaire à l'extrémité d'émission et un équipement de mesure du BER spécial permettant de régler les valeurs de seuil de décision et de base de temps est utilisé à l'extrémité de réception.

En partant d'une position normalisée des valeurs de seuil et de base de temps, on relève la dépendance du BER à l'égard de la position de ces valeurs. A partir de ces données, on calcule une base de temps optimisée pour laquelle on mesure une nouvelle fois le BER en fonction de la

variation du seuil. Parmi les résultats ainsi obtenus, seuls ceux qui donnent un BER inférieur à 10^{-4} sont pris en considération aux fins de l'extrapolation du facteur Q.

Appendice V

Autres essais de vérification

V.1 Réponse impulsionnelle du récepteur

L'essai de mesure du brouillage intersymboles (ISI) et – dans le cas où l'équipement QFME assure une fonction de réglage en phase pour le point de décision – l'essai de mesure de la phase peuvent être utilisés pour vérifier la réponse impulsionnelle du récepteur.

V.1.1 Essai de mesure du brouillage intersymboles

On mesure le facteur Q au moyen d'un montage d'essai conforme au § 6.1.7, incorporant un émetteur numérique de référence muni d'un laser à modulation externe et générant une impulsion conforme aux gabarits des impulsions G.957 [6] et G.691 [1].

Comme signal de modulation, on utilise une séquence 11001100 ou une séquence PRBS de $2^{23} – 1$. Si possible, l'essai doit être effectué avec des séquences d'essai non tramées. L'embrouillage du signal de modulation n'est pas autorisé pour la séquence 11001100. Avec les affaiblisseurs optiques de la Figure 1, le rapport OSNR est fixé de manière à obtenir un facteur Q d'environ 7 ($Q \approx 7$), la puissance du signal à l'entrée de l'équipement QFME étant réglée à une valeur intermédiaire dans la gamme des niveaux admissibles.

L'utilisation d'un oscilloscope d'échantillonnage pour représenter le diagramme en œil du signal d'émission confirme que le signal est visuellement exempt de brouillage intersymboles (ISI) pour les deux séquences de modulation.

Les facteurs Q mesurés pour la séquence 11001100 et pour la séquence PRBS devraient différer de moins de (valeur à déterminer) %.

V.1.2 Essai de mesure de la phase

Le signal PRBS du montage utilisé pour l'étalonnage (Figure 1) est réglé comme indiqué au § 6.1.7 de manière que la valeur indiquée pour le facteur Q par l'équipement QFME soit égale à environ 7 ($Q \approx 7$).

Dans l'équipement QFME, on modifie la phase d'échantillonnage de ±10% (0% représentant le centre du diagramme en œil et 100% représentant la largeur binaire).

Le facteur Q mesuré ne devrait pas s'écarter de plus de 12% (1 dB) par rapport au résultat de 0%.

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	Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, circuits téléphoniques, télégraphie, télécopie 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, protocole Internet et réseaux de nouvelle génération
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication

Imprimé en Suisse
Genève, 2004