

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**61280-2-9**

Première édition  
First edition  
2002-10

---

---

**Procédures d'essai des sous-systèmes de  
télécommunications à fibres optiques –**

**Partie 2-9:**

**Systèmes numériques – Mesure du rapport signal  
sur bruit optique pour les systèmes multiplexés  
à répartition en longueur d'onde dense**

**Fibre optic communication subsystem  
test procedures –**

**Part 2-9:**

**Digital systems – Optical signal-to-noise ratio  
measurement for dense wavelength-division  
multiplexed systems**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 61280-2-9:2002

## Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

## Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

## Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI ([http://www.iec.ch/searchpub/cur\\_fut.htm](http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm)) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues ([http://www.iec.ch/online\\_news/justpub/jp\\_entry.htm](http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm)) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tél: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

## Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

## Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

## Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site ([http://www.iec.ch/searchpub/cur\\_fut.htm](http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm)) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications ([http://www.iec.ch/online\\_news/justpub/jp\\_entry.htm](http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm)) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tel: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**61280-2-9**

Première édition  
First edition  
2002-10

---

---

**Procédures d'essai des sous-systèmes de  
télécommunications à fibres optiques –**

**Partie 2-9:**

**Systèmes numériques – Mesure du rapport signal  
sur bruit optique pour les systèmes multiplexés  
à répartition en longueur d'onde dense**

**Fibre optic communication subsystem  
test procedures –**

**Part 2-9:**

**Digital systems – Optical signal-to-noise ratio  
measurement for dense wavelength-division  
multiplexed systems**

© IEC 2002 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any  
form or by any means, electronic or mechanical, including  
photocopying and microfilm, without permission in writing from  
the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland  
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

**Q**

Pour prix, voir catalogue en vigueur  
For price, see current catalogue

## SOMMAIRE

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT PROPOS.....                                                                                           | 4  |
| INTRODUCTION .....                                                                                          | 8  |
| 1 Domaine d'application .....                                                                               | 10 |
| 2 Références normatives .....                                                                               | 12 |
| 3 Définitions.....                                                                                          | 12 |
| 4 Appareillage.....                                                                                         | 14 |
| 4.1 OSA réalisé à partir d'un réseau de diffraction.....                                                    | 14 |
| 4.2 OSA réalisé à partir d'un interféromètre Michelson .....                                                | 16 |
| 4.3 OSA réalisé à partir du Fabry-Perot.....                                                                | 16 |
| 4.4 Prescription de performance OSA .....                                                                   | 18 |
| 4.4.1 Gamme de longueurs d'onde.....                                                                        | 18 |
| 4.4.2 Sensibilité .....                                                                                     | 18 |
| 4.4.3 Largeur de bande de résolution (RBW).....                                                             | 18 |
| 4.4.4 Précision de la largeur de bande de résolution.....                                                   | 18 |
| 4.4.5 Gamme dynamique .....                                                                                 | 18 |
| 4.4.6 Fidélité d'échelle .....                                                                              | 20 |
| 4.4.7 Dépendance de polarisation .....                                                                      | 20 |
| 4.4.8 Points de données de longueurs d'onde.....                                                            | 20 |
| 5 Echantillonnage et éprouvettes.....                                                                       | 22 |
| 6 Procédure .....                                                                                           | 22 |
| 7 Calculs .....                                                                                             | 22 |
| 8 Incertitude de mesure .....                                                                               | 22 |
| 9 Documentation.....                                                                                        | 24 |
| Annexe A (informative) Erreur de mesure du niveau de signal du fait de la largeur spectrale de signal ..... | 26 |
| Bibliographie .....                                                                                         | 32 |

## CONTENTS

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD .....                                                                           | 5  |
| INTRODUCTION .....                                                                       | 9  |
| <br>                                                                                     |    |
| 1 Scope .....                                                                            | 11 |
| 2 Normative references .....                                                             | 13 |
| 3 Definitions .....                                                                      | 13 |
| 4 Apparatus .....                                                                        | 15 |
| 4.1 Diffraction grating-based OSA .....                                                  | 15 |
| 4.2 Michelson interferometer-based OSA .....                                             | 17 |
| 4.3 Fabry-Perot-based OSA .....                                                          | 17 |
| 4.4 OSA performance requirements .....                                                   | 19 |
| 4.4.1 Wavelength range .....                                                             | 19 |
| 4.4.2 Sensitivity .....                                                                  | 19 |
| 4.4.3 Resolution bandwidth (RBW) .....                                                   | 19 |
| 4.4.4 Resolution bandwidth accuracy .....                                                | 19 |
| 4.4.5 Dynamic range .....                                                                | 19 |
| 4.4.6 Scale fidelity .....                                                               | 21 |
| 4.4.7 Polarization dependence .....                                                      | 21 |
| 4.4.8 Wavelength data points .....                                                       | 21 |
| 5 Sampling and specimens .....                                                           | 23 |
| 6 Procedure .....                                                                        | 23 |
| 7 Calculations .....                                                                     | 23 |
| 8 Measurement uncertainty .....                                                          | 23 |
| 9 Documentation .....                                                                    | 25 |
| <br>                                                                                     |    |
| Annex A (informative) Error in measuring signal level due to signal spectral width ..... | 27 |
| <br>                                                                                     |    |
| Bibliography .....                                                                       | 33 |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS À FIBRES OPTIQUES –

#### Partie 2-9: Systèmes numériques – Mesure du rapport signal sur bruit optique pour les systèmes multiplexés à répartition en longueur d'onde dense

#### AVANT PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61280-2-9 a été établie par le sous-comité 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

| FDIS         | Rapport de vote |
|--------------|-----------------|
| 86C/457/FDIS | 86C/479/RVD     |

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

Le comité a décidé que cette publication reste valable jusqu'en 2008. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES –****Part 2-9: Digital systems – Optical signal-to-noise ratio measurement  
for dense wavelength-division multiplexed systems**

## FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61280-2-9 has been prepared by subcommittee 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee 86: Fibre optics

The text of this standard is based on the following documents:

|              |                  |
|--------------|------------------|
| FDIS         | Report on voting |
| 86C/457/FDIS | 86C/479/RVD      |

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

Annex A is for information only.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2008. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

La CEI 61280-2 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunications à fibres optiques*<sup>1)</sup>:

- Partie 2-1: Procédures d'essai des systèmes numériques – Mesure de la sensibilité et de la surcharge d'un récepteur
- Partie 2-2: Procédures d'essai des systèmes numériques – Mesure du diagramme oculaire, de la forme d'onde et du taux d'extinction
- Partie 2-4: Procédures d'essai des systèmes numériques – Mesure de la tolérance sur le débit binaire
- Partie 2-5: Procédures d'essai des systèmes numériques – Mesure de la fonction transfert de gigue
- Partie 2-9: Systèmes numériques – Mesure du rapport signal sur bruit optique pour les systèmes multiplexés à répartition en longueur d'onde dense

---

<sup>1)</sup> Le titre général de la série CEI 61280 a changé. Les parties 2-1, 2-2, 2-4 et 2-5 ont été publiées sous le titre général *Procédures d'essai de base des sous-systèmes de télécommunications à fibres optiques*

IEC 61280-2 consists of the following parts, under the general title *Fibre optic communication subsystem test procedures*<sup>1)</sup>:

- Part 2-1: Test procedures for digital systems – Receiver sensitivity and overload measurement
- Part 2-2: Test procedures for digital systems – Optical eye pattern, waveform, and extinction ratio
- Part 2-4: Test procedures for digital systems – Bit-rate tolerance measurement
- Part 2-5: Test procedures for digital systems – Jitter transfer function measurement
- Part 2-9: Digital systems – Optical signal-to-noise ratio measurement for dense wavelength-division multiplexed systems

---

<sup>1)</sup> The general title of the IEC 61280 series has changed. Parts 2-1, 2-2, 2-4 and 2-5 were published under the general title *Fibre optic communication subsystem basic test procedures*

## INTRODUCTION

Au niveau des interfaces optiques dans les réseaux multiplexés à répartition en longueur d'onde (WDM), il est souhaitable de mesurer les paramètres qui fournissent les informations sur l'intégrité de l'installation physique. De tels paramètres sont nécessaires pour surveiller la performance du réseau en tant que partie intégrante de la gestion de réseau. Ils sont également nécessaires pour assurer le fonctionnement approprié du système pour l'installation et la maintenance du réseau.

Idéalement, de tels paramètres correspondraient directement au taux d'erreur binaire (BER) de chaque voie d'un porteur multivoie au niveau d'une interface optique particulière. Des paramètres en relation, tels que le facteur de qualité ou ceux calculés à partir de diagrammes en œil optiques fourniraient des informations similaires, c'est-à-dire qu'ils corrélent aux taux d'erreur binaire (BER) de la voie. Cependant, il est difficile d'obtenir l'accès à ces paramètres à un point d'interface multivoie. Il est nécessaire de démultiplexer le nombre potentiellement grand de voies et d'effectuer les mesures du BER, du facteur de qualité ou du diagramme en œil sur une base par voie.

Par contraste, les informations utiles sur les propriétés optiques du porteur multivoie sont aisément obtenues en mesurant le spectre optique. Les niveaux de bruit et de signaux résolus par longueur d'onde fournissent les informations sur le niveau de signal, la longueur d'onde de signal, et l'émission spontanée amplifiée (ASE) pour chaque voie. Cependant, les informations spectrales ne présentent pas de dégradation de signaux du fait de déficiences de formes d'onde résultant de la dispersion en mode polarisation (PMD) et de la dispersion chromatique. De même, l'interface entre symboles et la gigue de temps ne sont pas révélées à partir d'une mesure du rapport signal sur bruit optique (OSNR). Malgré ces limites, l'OSNR figure en tant que paramètre d'interface dans la Recommandation G.692 de l'UIT-T; «Interfaces optiques pour systèmes multicanaux avec amplificateurs optiques»[1]<sup>2)</sup>. L'OSNR figure aussi dans la Recommandation G.959.1 de l'UIT-T, «Interfaces de la couche Physique du réseau optique de transport»[2].

---

2) Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

## INTRODUCTION

At the optical interfaces within wavelength-division multiplexed (WDM) networks, it is desirable to measure parameters that provide information about the integrity of the physical plant. Such parameters are necessary to *monitor* network performance as an integral part of network management. They are also necessary to assure proper system operation for *installation and maintenance* of the network.

Ideally, such parameters would directly correspond to the bit error ratio (BER) of each channel of a multichannel carrier at the particular optical interface. Related parameters such as Q-factor or those calculated from optical eye patterns would provide similar information, that is, they would correlate to the channel BER. However, it is difficult to obtain access to these parameters at a multichannel interface point. It is necessary to demultiplex the potentially large number of channels and make BER, Q-factor, or eye-diagram measurements on a per-channel basis.

In contrast, useful information about the optical properties of the multichannel carrier is readily obtained by measuring the optical spectrum. Wavelength-resolved signal and noise levels provide information on signal level, signal wavelength, and amplified spontaneous emission (ASE) for each channel. Spectral information, however, does not show signal degradation due to waveshape impairments resulting from polarization-mode dispersion (PMD), and chromatic dispersion. Also, intersymbol interface and time jitter are not revealed from an optical signal to noise ratio (OSNR) measurement. In spite of these limitations, OSNR is listed as an interface parameter in ITU-T Recommendation G.692, "Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers." [1]<sup>2)</sup> OSNR is also listed in ITU-T Recommendation G.959.1, "Optical transport network physical layer interfaces."

---

2) Figures in brackets refer to the bibliography.

## PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS À FIBRES OPTIQUES –

### Partie 2-9: Systèmes numériques – Mesure du rapport signal sur bruit optique pour les systèmes multiplexés à répartition en longueur d'onde dense

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61280 fournit une définition de paramètre et une méthode d'essai pour obtenir le rapport signal sur bruit optique (OSNR) en utilisant un appareillage destiné à mesurer le spectre optique au niveau d'une interface multivoie. Du fait qu'une mesure de bruit est effectuée sur un analyseur de spectre optique, le bruit mesuré n'inclut pas le bruit à intensité relative (RIN) à source ou le bruit de récepteur.

Trois réalisations pour un analyseur de spectre optique (OSA) sont en cours de discussion. Un OSA réalisé à partir d'un réseau de diffraction, un OSA réalisé à partir d'un interféromètre Michelson, et un OSA réalisé à partir du Fabry-Perot. Les caractéristiques de performance de l'OSA qui affectent la précision de mesures de l'OSNR sont fournies.

Un spectre optique type au niveau d'une interface multivoie est illustré à la figure 1. Les caractéristiques importantes sont les suivantes.

- Les voies sont placées nominalement sur la grille définie par la Recommandation G.694.1 de l'UIT-T.
- Les voies individuelles peuvent être non existantes parce qu'il s'agit d'un réseau conçu avec des démultiplexeurs add/drop ou parce que des voies particulières sont hors-service.
- Tant la puissance de voie que la puissance de bruit sont fonction d'une longueur d'onde.

Pour calculer l'OSNR, la valeur de la puissance de bruit la plus appropriée est celle qui est au niveau de la longueur d'onde de voie. Cependant, avec une mesure spectrale directe, la puissance de bruit au niveau de la longueur d'onde de voie est incluse dans la puissance de signal et est difficile à extraire. Une estimation de la puissance de bruit des voies peut être effectuée en interpolant la valeur de la puissance de bruit entre les voies.

## **FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES –**

### **Part 2-9: Digital systems – Optical signal-to-noise ratio measurement for dense wavelength-division multiplexed systems**

#### **1 Scope**

This part of IEC 61280 provides a parameter definition and a test method for obtaining optical signal-to-noise ratio (OSNR) using apparatus that measures the optical spectrum at a multichannel interface. Because noise measurement is made on an optical spectrum analyzer, the measured noise does not include source relative intensity noise (RIN) or receiver noise.

Three implementations for an optical spectrum analyser (OSA) are discussed: a diffraction-grating-based OSA, a Michelson interferometer-based OSA, and a Fabry-Perot-based OSA. Performance characteristics of the OSA that affect OSNR measurement accuracy are provided.

A typical optical spectrum at a multichannel interface is shown in figure 1. Important characteristics are as follows.

- The channels are placed nominally on the grid defined by ITU Recommendation G.694.1.
- Individual channels may be non-existent because it is a network designed with optical add/drop demultiplexers or because particular channels are out of service.
- Both channel power and noise power are a function of wavelength.

For calculating OSNR, the most appropriate noise power value is that at the channel wavelength. However, with a direct spectral measurement, the noise power at the channel wavelength is included in signal power and is difficult to extract. An estimate of the channel noise power can be made by interpolating the noise power value between channels.

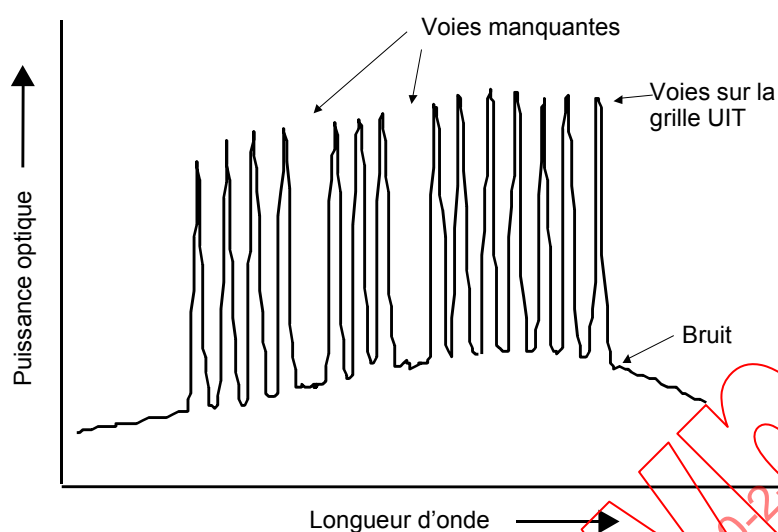


Figure 1 – Spectre optique type au niveau d'une interface optique dans un système de transmission multivoie

## 2 Références normatives

Aucune.

## 3 Définitions

### 3.1

#### rapport signal sur bruit optique (OSNR)

rapport en décibels, à partir du spectre optique, défini par l'équation

$$\text{OSNR} = 10\text{Log} \frac{P_i}{N_i} + 10\text{Log} \frac{B_m}{B_r} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

où

$P_i$  est la puissance de signal optique en watts au niveau de la  $i$ -ème voie;

$B_r$  est la largeur de bande optique de référence;

$N_i$  est la valeur interpolée de puissance de bruit en watts mesurée en largeur de bande équivalente de bruit,  $B_m$ , au niveau de la  $i$ -ème voie,

$$N_i = \frac{N(\lambda_i - \Delta\lambda) + N(\lambda_i + \Delta\lambda)}{2} \quad (2)$$

$\lambda_i$  est le longueur d'onde de la  $i$ -ème voie;

$B_r$  est la largeur de bande optique de référence;

$\Delta\lambda$  est le décalage d'interpolation égal ou inférieur à la moitié de l'écartement de grille de l'UIT.

(Les unités pour  $B_m$  et  $B_r$  peuvent être en fréquence ou longueur d'onde, mais doivent être cohérentes.) Généralement, la largeur de bande optique de référence est 0,1 nm. Voir figure 2.

NOTE La largeur de bande équivalente de bruit d'un filtre est telle qu'elle passerait la même puissance de bruit totale qu'une bande passante rectangulaire qui possède la même surface que le filtre réel, et dont la hauteur est la même que la hauteur du filtre réel au niveau de sa longueur d'onde centrale.

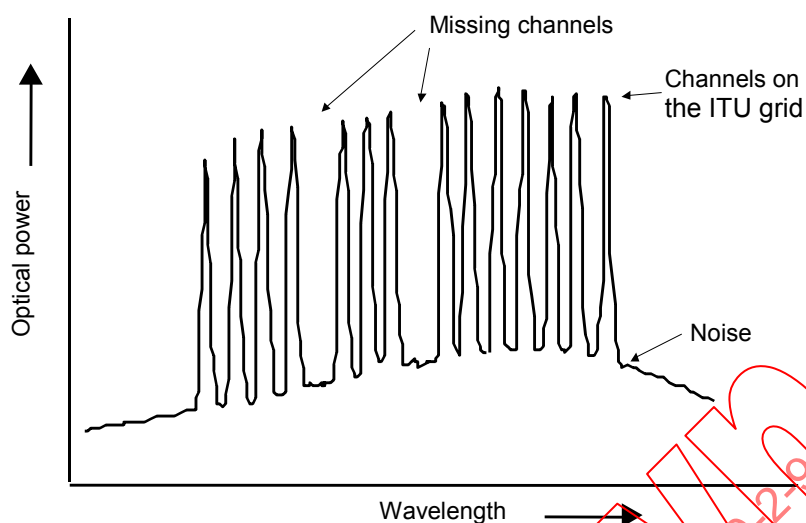


Figure 1 – A typical optical spectrum at an optical interface in a multichannel transmission system

## 2 Normative references

None.

## 3 Definitions

### 3.1

#### optical signal-to-noise ratio (OSNR)

ratio in decibels, from the optical spectrum, defined by the equation

$$\text{OSNR} = 10\text{Log} \frac{P_i}{N_i} + 10\text{Log} \frac{B_m}{B_r} \quad \text{dB} \quad (1)$$

where:

$P_i$  is the optical signal power in watts at the  $i$ -th channel.

$B_r$  is the reference optical bandwidth.

$N_i$  is the interpolated value of noise power in watts measured in noise equivalent bandwidth,  $B_m$ ,

$$N_i = \frac{N(\lambda_i - \Delta\lambda) + N(\lambda_i + \Delta\lambda)}{2} \quad (2)$$

at the  $i$ -th channel;

$\lambda_i$  is the wavelength of the  $i$ -th channel;

$\Delta\lambda$  is the interpolation offset equal to or less than one-half the ITU grid spacing.

(The units for  $B_m$  and  $B_r$  may be in frequency or wavelength but must be consistent.) Typically, the reference optical bandwidth is 0,1 nm. See figure 2.

NOTE The noise equivalent bandwidth of a filter is such that it would pass the same total noise power as a rectangular passband that has the same area as the actual filter, and the height of which is the same as the height of the actual filter at its center wavelength.

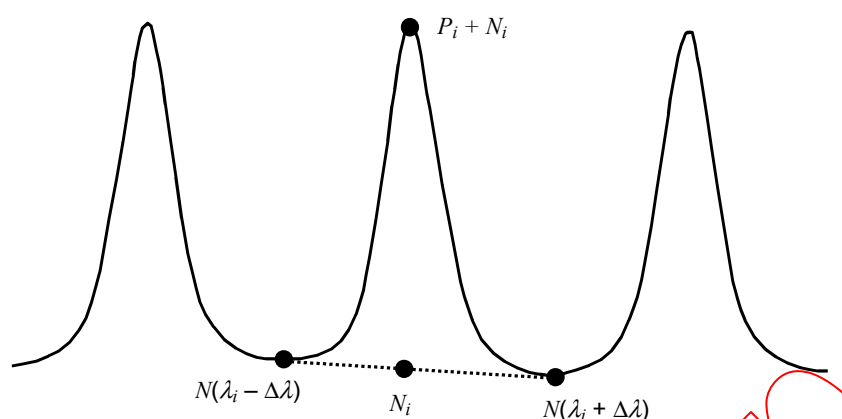


**Figure 2 – L'OSNR pour chaque voie est dérivé des mesures directes du spectre optique**

## 4 Appareillage

L'appareil prescrit est un analyseur de spectre optique (OSA) doté de la performance nécessaire pour mesurer les puissances de signaux et de bruit requises pour l'équation (1). Les trois façons communes de mettre en application un OSA sont celles qui consistent à utiliser un réseau de diffraction, un interféromètre Michelson et un étalon Fabry-Perot.

### 4.1 OSA réalisé à partir d'un réseau de diffraction

Un schéma simplifié d'un OSA réalisé à partir d'un réseau de diffraction est illustré à la figure 3. La lumière en entrée expansée est incidente sur un réseau de diffraction rotatif. La lumière diffractée se produit à un angle proportionnel à la longueur d'onde et passe à travers une ouverture vers un photodétecteur. La taille des ouvertures d'entrée et de sortie et la taille du faisceau sur le réseau de diffraction déterminent la largeur spectrale du filtre résultant et, de ce fait, la résolution de l'OSA. La conversion A/N et le traitement numérique fournissent l'affichage familier de l'OSA.

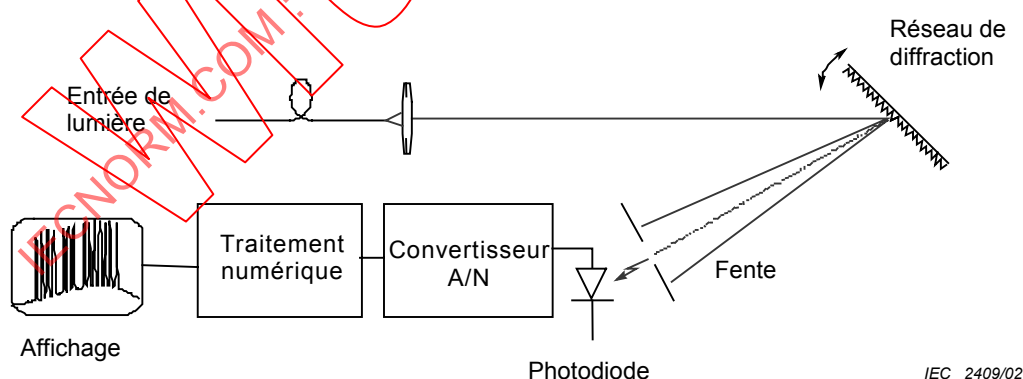


**Figure 3 – OSA réalisé à partir d'un réseau de diffraction**

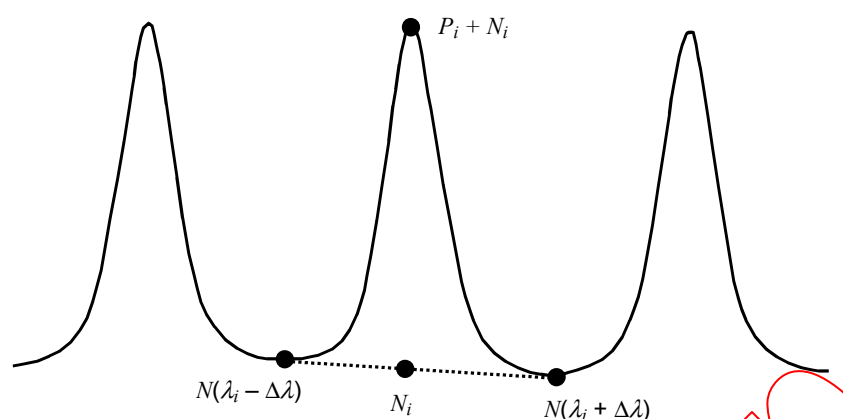


**Figure 2 – The OSNR for each channel is derived from direct measurements of the optical spectrum**

## 4 Apparatus

The required apparatus is an optical spectrum analyzer (OSA) with the performance necessary to measure the signal and noise powers required for equation (1). Three common ways to implement an OSA are with a diffraction grating, a Michelson interferometer, and a Fabry-Perot etalon.

### 4.1 Diffraction grating-based OSA

A simplified diagram of a diffraction grating-based OSA is shown in figure 3. The expanded input light is incident on a rotatable diffraction grating. The diffracted light comes off at an angle proportional to wavelength and passes through an aperture to a photodetector. The size of the input and output apertures and the size of the beam on the diffraction grating determine the spectral width of the resulting filter and therefore the resolution of the OSA. A/D conversion and digital processing provide the familiar OSA display.

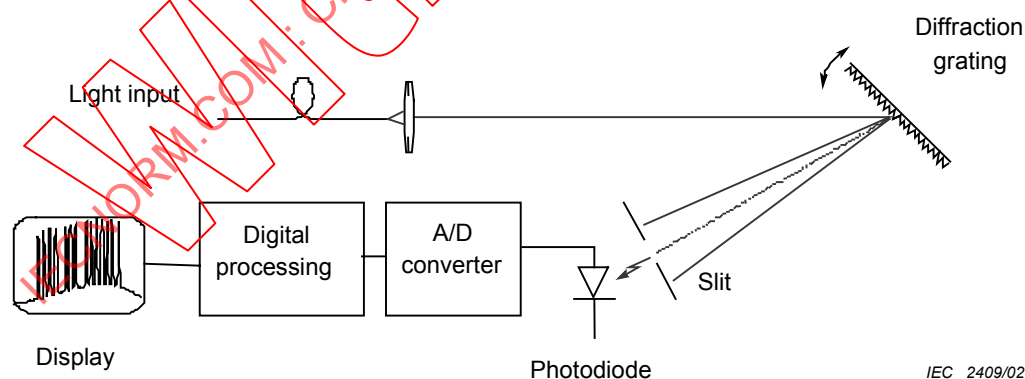


**Figure 3 – A diffraction grating-based OSA**

## 4.2 OSA réalisé à partir d'un interféromètre Michelson

Un autre type d'OSA est réalisé à partir de l'interféromètre Michelson, comme l'illustre la figure 4. Le signal d'entrée est divisé en deux chemins. Un chemin est fixé en longueur et l'autre est variable. L'interféromètre Michelson crée un tracé d'interférence entre le signal et une version différée de celui-ci au niveau du photodétecteur. La forme d'onde résultante, désignée sous le nom d'interférogramme, est l'autocorrélation du signal d'entrée. Une transformée de Fourier réalisée sur l'autocorrélation fournit le spectre optique. La résolution de ce type d'OSA est réglée par le retard différentiel de chemin de l'interféromètre.

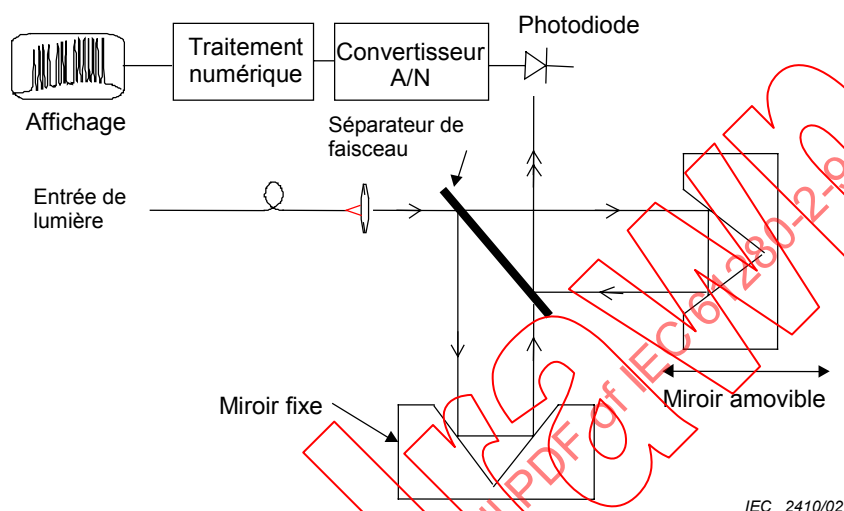


Figure 4 – OSA réalisé à partir d'un interféromètre Michelson

## 4.3 OSA réalisé à partir du Fabry-Perot

Un troisième type d'OSA est réalisé à partir d'un étalon Fabry-Perot comme l'illustre la figure 5. Le faisceau collimaté passe à travers un étalon Fabry-Perot, dont le domaine spectral libre (FSR) est plus grand que le plan de disposition des voies, et la finesse est choisie pour donner la largeur de bande de résolution (RBW) requise. Les actionneurs piézoélectriques commandent l'espacement de miroirs de Fabry-Perot et fournissent un réglage spectral. Le traitement de signal numérique fournit toute combinaison d'affichage spectral ou de données sous forme de tableaux.

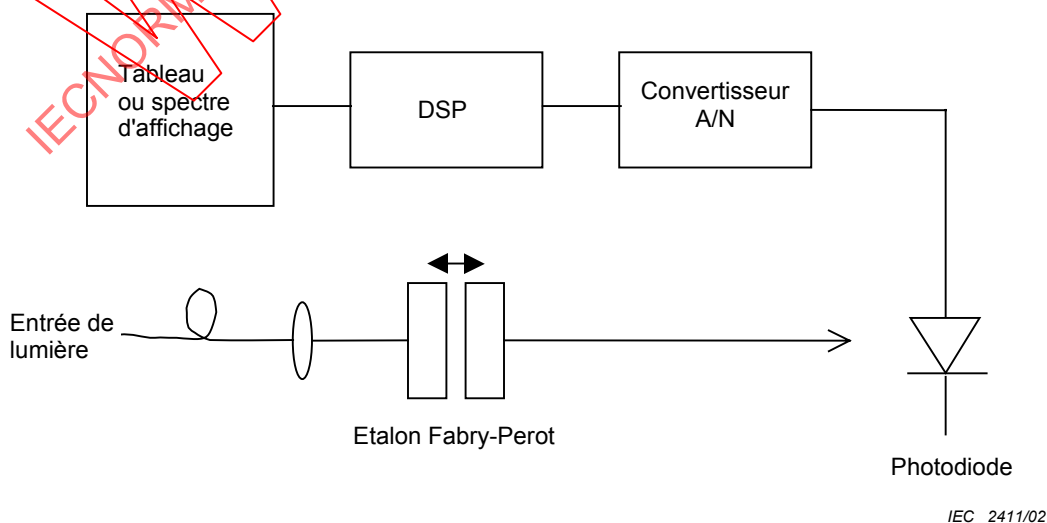


Figure 5 – OSA réalisé à partir d'un Fabry-Perot

## 4.2 Michelson interferometer-based OSA

Another type of OSA is based on the Michelson interferometer as shown in figure 4. The input signal is split into two paths. One path is fixed in length and one is variable. The Michelson interferometer creates an interference pattern between the signal and a delayed version of itself at the photodetector. The resulting waveform, called an interferogram, is the autocorrelation of the input signal. A Fourier transform performed on the autocorrelation provides the optical spectrum. The resolution of this type of OSA is set by the differential path delay of the interferometer.

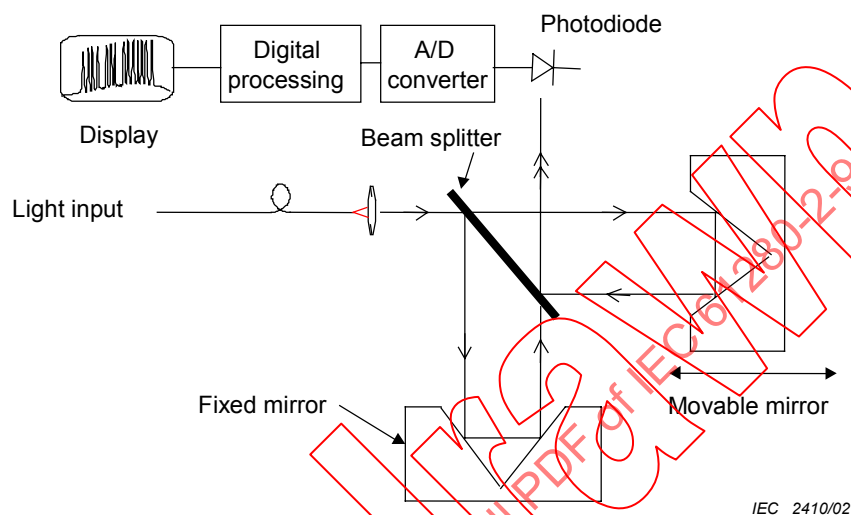


Figure 4 – A Michelson interferometer-based OSA

## 4.3 Fabry-Perot-based OSA

A third type of OSA is based on a Fabry-Perot etalon as shown in figure 5. The collimated beam passes through a Fabry-Perot etalon, the free spectral range (FSR) of which is greater than the channel plan and the finesse is chosen to give the required resolution bandwidth (RBW). Piezo-electric actuators control the Fabry-Perot mirror spacing and provide spectral tuning. Digital signal processing provides any combination of spectral display or tabular data.

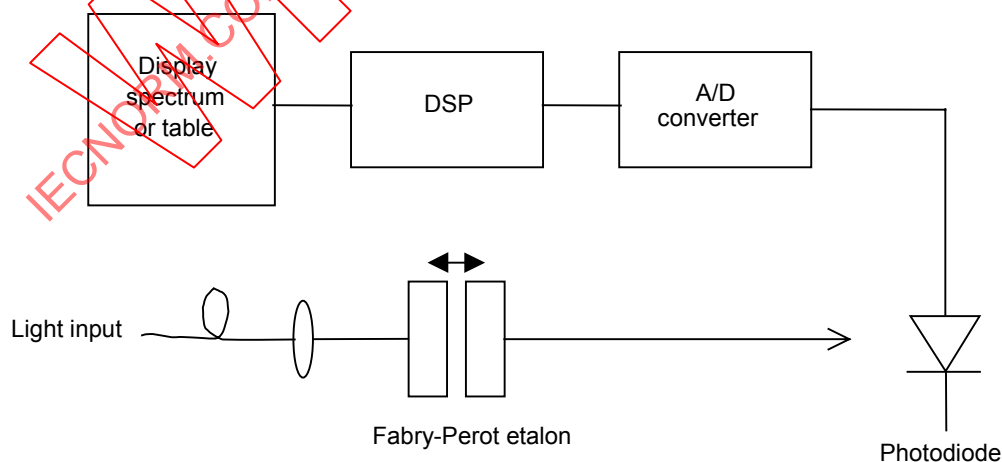


Figure 5 – A Fabry-Perot-based OSA

#### 4.4 Prescription de performance OSA

Se reporter à la CEI 62129 [3].

##### 4.4.1 Gamme de longueurs d'onde

La gamme de longueurs d'onde doit être suffisante pour couvrir le plan de disposition des voies plus la moitié d'un écartement de grilles à chaque extrémité de la bande pour mesurer le bruit de la voie la plus basse et de la voie la plus élevée.

##### 4.4.2 Sensibilité

La sensibilité d'un OSA est définie comme le niveau le plus bas auquel la puissance spectrale peut être mesurée avec une précision spécifiée. La sensibilité d'un OSA doit être suffisante pour mesurer le niveau de bruit prévu le plus bas. En termes d'OSNR:

$$\text{Sensibilité prescrite (dBm)} = \text{Niveau de voie minimal (dBm)} - \text{OSNR (dB)} \quad (3)$$

Par exemple, la sensibilité prescrite pour un niveau de voie minimal de  $-10$  dBm afin de mesurer un OSNR de 35 dB est:

$$-10 - 35 = -45 \text{ dBm.}$$

##### 4.4.3 Largeur de bande de résolution (RBW)

La largeur de bande de résolution doit être suffisamment large pour mesurer précisément le niveau de puissance de chaque voie modulée. Le réglage approprié de la largeur de bande de résolution (RBW) dépend du débit binaire. Par exemple, la puissance du signal d'un laser modulé à un débit OC-192 (STM-64) à fluctuation de longueur d'onde zéro mesurera un 0,8 dB plus bas avec une largeur de bande de résolution de 0,1 nm qu'avec un RBW large. Cela résulte de l'enveloppe de modulation possédant une portion de sa puissance spectrale à l'extérieur de la RBW de 0,1 nm. Si la RBW est diminuée pour se situer à 0,05 nm, la puissance de signal mesurera 2,5 dB plus bas. Cet effet est aggravé par la présence de fluctuation de longueur d'onde de laser et diminué par la limitation de la largeur de bande additionnelle dans les circuits de modulation du laser d'émetteur. Ce sujet est traité de manière plus approfondie dans l'annexe A.

##### 4.4.4 Précision de la largeur de bande de résolution

La précision de la mesure du bruit est directement affectée par la précision de la largeur de bande de résolution (RWB) de l'analyseur de spectre optique (OSA). Pour une meilleure précision, la largeur de bande équivalente de bruit,  $B_m$ , de l'OSA doit être étalonnée. La RWB, en général, diffère de  $B_m$  du fait de la forme non rectangulaire de la caractéristique de filtre de l'analyseur de spectre optique.

##### 4.4.5 Gamme dynamique

La gamme dynamique d'un OSA est une mesure de la capacité de l'OSA à effectuer des mesures de bruit et de signaux de niveau bas qui sont proches en longueur d'onde des grands signaux. Il importe de noter que le rétrécissement de la RBW ne corrèle pas nécessairement avec une gamme dynamique meilleure. La RWB est une mesure de la largeur de bande de 3 dB ou de la largeur de bande équivalente de bruit de sa caractéristique de filtre. D'autre part, la gamme dynamique est une mesure de la raideur de la caractéristique de filtre et du bruit de fond plancher de l'OSA. La gamme dynamique est définie comme le rapport, en dB, de la caractéristique de transmission de filtre au niveau de la longueur d'onde au centre,  $\lambda_i$ , et à une distance d'un demi-espacement de grille  $\lambda_i \pm \Delta\lambda$ .

#### 4.4 OSA performance requirements

Refer to IEC 62129 [3].

##### 4.4.1 Wavelength range

The wavelength range shall be sufficient to cover the channel plan plus one-half a grid spacing on each end of the band to measure the noise of the lowest and highest channel.

##### 4.4.2 Sensitivity

Sensitivity of an OSA is defined as the lowest level at which spectral power can be measured with a specified accuracy. The OSA sensitivity must be sufficient to measure the lowest expected noise level. In terms of OSNR:

$$\text{Required sensitivity (dBm)} = \text{Minimum channel level (dBm)} - \text{OSNR (dB)} \quad (3)$$

For example, the sensitivity required for a minimum channel level of  $-10$  dBm in order to measure a 35-dB OSNR is:

$$-10 - 35 = -45 \text{ dBm}$$

##### 4.4.3 Resolution bandwidth (RBW)

The resolution bandwidth must be sufficiently wide to accurately measure the power level of each modulated channel. The proper RBW setting depends on the bit rate. For example, the signal power of a laser modulated at an OC-192 (STM-64) rate with zero chirp will measure 0,8-dB lower with a 0,1-nm RBW than with a wide RBW. This results from the modulation envelope having a portion of its spectral power outside of the 0,1-nm RBW. If the RBW is decreased to 0,05 nm, the signal power will measure 2,5 dB lower. This effect is made worse by the presence of laser chirp and lessened by additional bandwidth limiting in the transmitter laser's modulation circuitry. This subject is treated in more detail in annex A.

##### 4.4.4 Resolution bandwidth accuracy

The accuracy of the noise measurement is directly impacted by the accuracy of the OSA's RBW. For best accuracy, the OSA's *noise equivalent bandwidth*,  $B_m$ , must be calibrated. RBW, in general, differs from  $B_m$  due to the non-rectangular shape of the optical spectrum analyzer's filter characteristic.

##### 4.4.5 Dynamic range

The dynamic range of an OSA is a measure of the OSA's ability to make measurements of low-level signals and noise that are close in wavelength to large signals. It is important to note that narrowing the RBW does not necessarily correlate to better dynamic range. RBW is a measure of the 3-dB bandwidth or noise equivalent bandwidth of its filter characteristic. Dynamic range, on the other hand, is a measure of the steepness of the filter characteristic and the OSA noise floor. Dynamic range is defined as the ratio, in dB, of the filter transmission characteristic at the center wavelength,  $\lambda_i$ , and at one-half a grid spacing away,  $\lambda_i \pm \Delta\lambda$ .

La figure 6 montre deux voies d'un spectre multivoie, la caractéristique de filtre d'OSA, la limite de sensibilité OSA et le bruit du système de transmission qui doit être mesuré. Au niveau de la longueur d'onde de mesure du bruit, la gamme dynamique doit être largement plus élevée que l'OSNR pour des mesures précises. La contribution d'incertitude peut être prédite à partir de l'équation suivante:

$$\text{Incertaince en OSNR} = 10 \log(1+10^{-D/10}) \text{ dB} \quad (4)$$

où  $D$  est la valeur en dB selon laquelle la gamme dynamique de l'OSA dépasse le rapport signal sur bruit optique (OSNR) réel. Par exemple, pour un OSNR de 30 dB, une gamme dynamique de 40 dB (à la  $\frac{1}{2}$  de l'écartement de grille de l'UIT) provoquera une erreur de 0,42 dB.

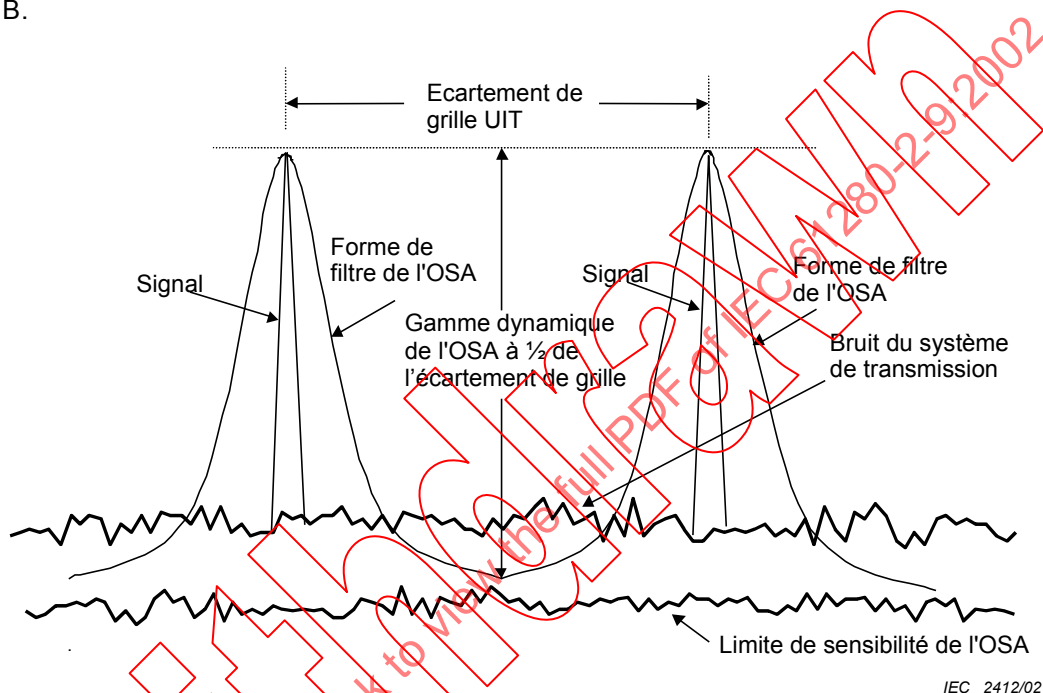


**Figure 6 – L'insuffisance de la gamme dynamique est une autre source d'incertitude de mesure**

En général, tant la limite de sensibilité de l'OSA que la gamme dynamique limite la valeur de l'OSNR qui peut être mesurée. Généralement, un OSA réalisé à partir d'un interféromètre Michelson sera limité par la limite de sensibilité et un OSA réalisé à partir d'un réseau de diffraction le sera par la gamme dynamique.

#### 4.4.6 Fidélité d'échelle

La fidélité d'échelle, également désignée linéarité d'affichage, est l'erreur relative d'amplitude qui se produit sur une gamme de niveaux de puissance d'entrée. La fidélité d'échelle contribue directement à l'incertitude de mesure de l'OSNR.

#### 4.4.7 Dépendance de polarisation

Généralement, le signal  $P_i$ , est hautement polarisé tandis que le bruit,  $N_i$ , n'est pas polarisé. La dépendance de polarisation de l'OSA contribue directement à l'incertitude de mesure du signal.

#### 4.4.8 Points de données de longueurs d'onde

Le nombre minimal de points de données rassemblés par l'OSA doit être d'au moins deux fois la portée de longueur d'onde divisée par la largeur de bande équivalente de bruit.

Figure 6 shows two channels of a multichannel spectrum, the OSA filter characteristic, the OSA sensitivity limit, and the transmission system noise that is to be measured. At the noise measurement wavelength, the dynamic range must be significantly higher than the OSNR for accurate measurements. The uncertainty contribution can be predicted from the following equation:

$$\text{Uncertainty in OSNR} = 10 \log(1 + 10^{-D/10}) \text{ dB} \quad (4)$$

where  $D$  is the value in dB that the OSA dynamic range exceeds the actual OSNR. For example, for an OSNR of 30 dB, a dynamic range of 40 dB (at  $\frac{1}{2}$  the ITU grid spacing) will cause an error of 0,42 dB.

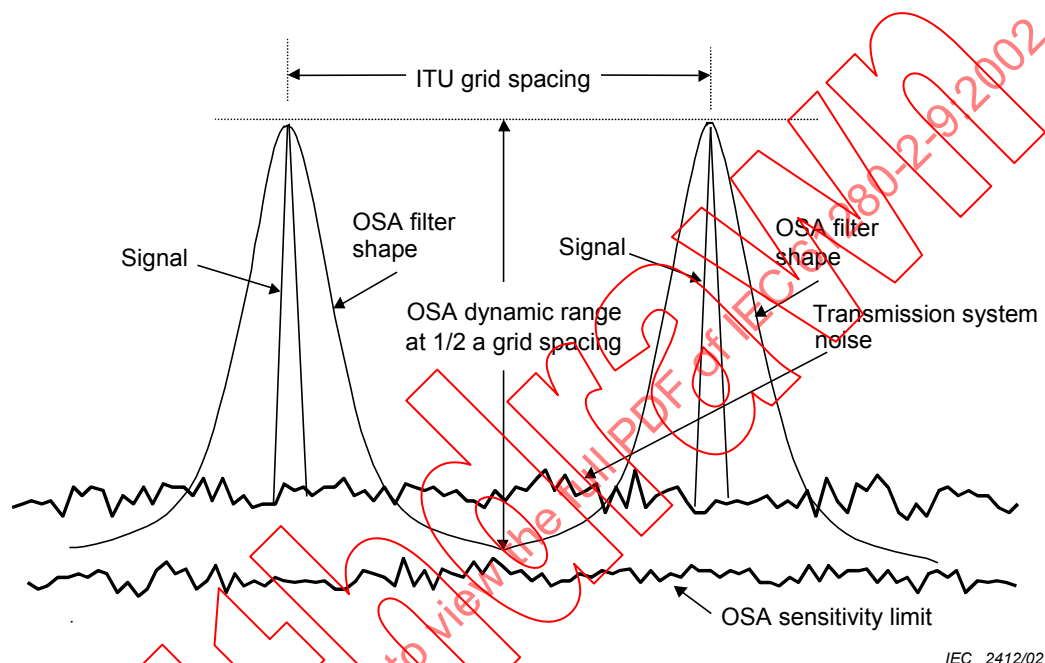


**Figure 6 – Insufficient dynamic range is another source of measurement uncertainty**

In general, either the OSA sensitivity limit or dynamic range will limit the value of OSNR that can be measured. Typically, a Michelson interferometer-based OSA will be limited by the sensitivity limit and a diffraction grating-based OSA by the dynamic range.

#### 4.4.6 Scale fidelity

Scale fidelity, also called display linearity, is the relative error in amplitude that occurs over a range of input power levels. Scale fidelity directly contributes to OSNR measurement uncertainty.

#### 4.4.7 Polarization dependence

Typically, the signal,  $P_i$ , will be highly polarized while the noise,  $N_i$ , is unpolarized. OSA polarization dependence will directly contribute to uncertainty in signal measurement.

#### 4.4.8 Wavelength data points

The minimum number of data points collected by the OSA shall be at least twice the wavelength span divided by the noise equivalent bandwidth.

## 5 Echantillonnage et éprouvettes

Le dispositif en essai (DEE) est un système ou réseau de transmission à fibres optiques multivoie. L'appareillage de mesure est raccordé au réseau à n'importe quel point par raccordement direct à la fibre optique ou par l'intermédiaire d'un accès de surveillance à large bande.

## 6 Procédure

- Raccorder l'OSA à la fibre de transmission ou un accès à moniteur.
- Choisir les valeurs RBW suffisamment larges pour mesurer précisément la puissance de signal et avec une gamme dynamique suffisante pour mesurer le bruit à  $\pm\Delta\lambda$  à partir de la longueur d'onde de voie crête où  $\Delta\lambda$  est la  $\frac{1}{2}$  de l'écartement de grille de l'UIT. (Voir l'annexe A, le tableau A.2 et 4.4.5.)
- Régler la gamme de longueurs d'onde pour accommoder toutes les voies plus au moins la  $\frac{1}{2}$  de l'écartement de grille au-dessous de la voie la plus basse et au-dessus de la voie la plus élevée.
- Mesurer le niveau de puissance au niveau de la crête de signal pour la  $i$ -ème des voies  $n$ . Cette valeur est  $P_i + N_i$  (se reporter à la figure 2).
- Mesurer le bruit à  $\pm\Delta\lambda$  à partir de la longueur d'onde crête de signal. Utiliser une RBW étalonnée avec une largeur de bande équivalente de bruit,  $B_m$ . Les valeurs mesurées sont les valeurs  $N(\lambda_i - \Delta\lambda)$  et  $N(\lambda_i + \Delta\lambda)$ .
- Calculer la valeur interpolée de bruit au niveau de chaque longueur d'onde de voie (équation (2)):  

$$N_i = [N(\lambda_i - \Delta\lambda) + N(\lambda_i + \Delta\lambda)]/2$$
- Calculer  $P_i$  en soustrayant  $N_i$  de la valeur obtenue à l'étape d).
- Répéter les étapes d) à g) pour toutes les voies  $n$ .

NOTE Cette procédure peut être effectuée avec deux réglages de RBW: l'une qui est suffisamment large pour mesurer la puissance de signal totale, la seconde dotée d'une gamme dynamique suffisante pour mesurer le bruit à  $\pm\Delta\lambda$  à partir des longueurs d'onde de voie crête.

## 7 Calculs

- Pour chacune des voies  $n$ , calculer la valeur interpolée de puissance de bruit,  $N_i$ , en utilisant l'équation (2).
- Pour chacune des voies  $n$ , calculer l'OSNR à partir de l'équation (1).

$$\text{OSNR} = 10 \log \frac{P_i}{N_i} + 10 \log \frac{B_m}{B_r}$$

## 8 Incertitude de mesure

Il convient de calculer l'incertitude de mesure en se fondant sur le "Guide pour l'expression d'incertitude de mesure" [4].

Les contributions d'incertitude qui doivent être prises en considération sont les suivantes:

- La puissance de signal modulée (4.4.3 et annexe A)
- La largeur de bande de bruit de l'OSA (4.4.4)
- La gamme dynamique de l'OSA (4.4.5)
- La fidélité d'échelle de l'OSA (4.4.6)
- La dépendance de polarisation de l'OSA (4.4.7)

## 5 Sampling and specimens

The device under test (DUT) is a multichannel fibre-optic transmission system or network. The measurement apparatus is connected to the network at any point by directly connecting to the optical fibre or via a broadband monitoring port.

## 6 Procedure

- a) Connect the OSA to the transmission fibre or a monitor port.
- b) Choose RBW values sufficiently wide to accurately measure the signal power and with sufficient dynamic range to measure the noise at  $\pm\Delta\lambda$  from the peak channel wavelength where  $\Delta\lambda$  is  $\frac{1}{2}$  the ITU grid spacing. (See annex A, table A.2 and 4.4.5.)
- c) Set the wavelength range to accommodate all channels plus at least  $\frac{1}{2}$  a grid spacing below the lowest channel and above the highest channel.
- d) Measure the power level at the signal peak for the  $i$ -th of  $n$  channels. This value is  $P_i + N_i$  (refer to figure 2).
- e) Measure the noise at  $\pm\Delta\lambda$  from the signal peak wavelength. Use a calibrated RBW with noise equivalent bandwidth,  $B_m$ . The measured values are  $N(\lambda_i - \Delta\lambda)$  and  $N(\lambda_i + \Delta\lambda)$ .
- f) Calculate the interpolated value of noise at each channel wavelength (equation (2)):
 
$$N_i = [N(\lambda_i - \Delta\lambda) + N(\lambda_i + \Delta\lambda)]/2$$
- g) Calculate  $P_i$  by subtracting  $N_i$  from the value obtained in step d).
- h) Repeat steps d) through g) for all  $n$  channels.

NOTE This procedure may be done with two RBW settings: one that is sufficiently wide to measure total signal power, the second with sufficient dynamic range to measure noise at  $\pm\Delta\lambda$  from the peak channel wavelengths.

## 7 Calculations

- For each of  $n$  channels, calculate the interpolated value of noise power,  $N_i$ , using equation (2).
- For each of  $n$  channels, calculate OSNR from equation (1).

$$\text{OSNR} = 10 \log \frac{P_i}{N_i} + 10 \log \frac{B_m}{B_r}$$

## 8 Measurement uncertainty

Measurement uncertainty should be calculated based upon the "ISO/IEC Guide to the expression of uncertainty in measurement"[4].

Uncertainty contributions that must be considered are as follows:

- Modulated signal power (4.4.3 and annex A)
- OSA noise bandwidth (4.4.4)
- OSA dynamic range (4.4.5)
- OSA scale fidelity (4.4.6)
- OSA polarization dependence (4.4.7)

## 9 Documentation

Consigner les informations suivantes pour chaque essai:

- La date d'essai
- Le numéro du présent document
- L'identification du système de transmission soumis à l'essai et l'emplacement de l'essai
- La description de l'équipement utilisé
- Les données de l'OSNR
- La largeur de bande équivalente de bruit de l'OSA,  $B_m$ .
- La largeur de bande de référence,  $B_r$ .
- La longueur d'onde à décalage pour la mesure du bruit,  $\Delta\lambda$ , ou l'écartement de grille de l'UIT
- L'incertitude de mesure

## 9 Documentation

Report the following information for each test:

- Test date
- This document number
- Identification of the transmission system being tested and the test location
- Description of the equipment used
- OSNR data
- OSA noise equivalent bandwidth,  $B_m$ .
- Reference bandwidth,  $B_r$
- Offset wavelength for noise measurement,  $\Delta\lambda$ , or ITU grid spacing
- Measurement uncertainty

## Annexe A (informative)

### Erreur de mesure du niveau de signal du fait de la largeur spectrale de signal

La largeur spectrale de chaque voie est élargie à partir de celle du laser CW en raison des causes suivantes:

- la fluctuation de la longueur d'onde de laser
- la modulation d'intensité pour la transmission de signal
- la modulation pour supprimer la diffusion de Brouillon stimulée (SBS)
- la modulation à phase autonome (SPM)
- la modulation à phase croisée

Pour les systèmes WDM denses dans lesquels la modulation externe est généralement utilisée, la fluctuation de la longueur d'onde de laser n'est pas un facteur. L'élargissement du fait de la suppression de SBS et la SPM sont généralement petits comparés à l'élargissement du fait de la modulation de signal à 2,5 Gb/s et aux taux supérieurs.

Les figures A.1 et A.2 montrent les spectres calculés d'un laser à modulation d'intensité pour les vitesses de ligne de 10 Gb/s et 2,5 Gb/s, respectivement. La modulation est un NRZ PRBS à longueur de mots de  $2^7-1$ . Les valeurs de filtration optiques et électriques sont indiquées au tableau A.1. Pour référence, une caractéristique de filtre d'OSA type pour une RWB de 0,1 nm est également présentée.

Du fait qu'une portion de la puissance de signal n'est pas capturée par l'OSA, il se produit une erreur de puissance de signal mesurée. Les figures A.3 et A.4 montrent l'amplitude de l'erreur pour les vitesses de données de 10 Gb/s et 2,5 Gb/s, respectivement.

**Tableau A.1 – Filtration utilisée dans la simulation pour déterminer  
l'erreur du niveau de puissance du signal**

|                                       |         |          |
|---------------------------------------|---------|----------|
| Vitesse de modulation                 | 10 Gb/s | 2,5 Gb/s |
| Largeur de bande du filtre électrique | 30 GHz  | 7,5 GHz  |
| Largeur de bande du filtre optique    | 0,64 nm | 0,36 nm  |