

**RAPPORT  
TECHNIQUE  
TECHNICAL  
REPORT**

**CEI  
IEC**

**TR 62284**

Première édition  
First edition  
2003-01

---

---

**Mesures de l'aire efficace des fibres optiques  
unimodales –  
Guide d'application**

**Effective area measurements of single-mode  
optical fibres –  
Guidance**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC/TR 62284:2003

## 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

# RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI  
IEC**

**TR 62284**

Première édition  
First edition  
2003-01

---

---

## Mesures de l'aire efficace des fibres optiques unimodales – Guide d'application

## Effective area measurements of single-mode optical fibres – Guidance

© IEC 2003 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

**W**

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

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                                             | 6  |
| 1 Domaine d'application et objet .....                                                                                         | 8  |
| 2 Documents de référence .....                                                                                                 | 10 |
| 3 Appareillage .....                                                                                                           | 10 |
| 3.1 Source de lumière .....                                                                                                    | 10 |
| 3.2 Dispositifs optiques d'entrée .....                                                                                        | 10 |
| 3.3 Extracteur de modes de gaine .....                                                                                         | 10 |
| 3.4 Filtre de mode d'ordre élevé .....                                                                                         | 10 |
| 3.5 Ordinateur .....                                                                                                           | 10 |
| 4 Echantillonnage et éprouvettes .....                                                                                         | 10 |
| 4.1 Longueur d'éprouvette .....                                                                                                | 10 |
| 4.2 Faces d'extrémités de l'éprouvette .....                                                                                   | 12 |
| 5 Procédure .....                                                                                                              | 12 |
| 6 Calculs ou interprétation des résultats .....                                                                                | 12 |
| 6.1 Champ proche .....                                                                                                         | 12 |
| 6.2 Champ lointain direct .....                                                                                                | 12 |
| 6.3 Ouverture variable dans le champ lointain .....                                                                            | 12 |
| 7 Documentation .....                                                                                                          | 14 |
| 7.1 Informations à fournir pour chaque mesure .....                                                                            | 14 |
| 7.2 Informations à fournir sur demande .....                                                                                   | 14 |
| Annexe A Spécificité de mesure de la méthode du champ lointain direct .....                                                    | 16 |
| Annexe B Ouverture variable dans la spécificité de mesure de la méthode<br>du champ lointain .....                             | 24 |
| Annexe C Spécificité de mesure de la méthode du champ proche .....                                                             | 32 |
| Annexe D Données d'échantillons et calculs .....                                                                               | 38 |
| Annexe E Comparaison entre le présent rapport technique et<br>les recommandations UIT .....                                    | 44 |
| Annexe F Traitement des lobes latéraux dans les données de champ lointain .....                                                | 46 |
| Annexe G Méthode pour calculer l'aire efficace<br>à partir des données d'ouvertures variables .....                            | 48 |
| Annexe H Liste Fortran des sous-programmes qui réalisent la solution désirée<br>du problème de programmation quadratique ..... | 72 |
| Figure A.1 – Montage d'essai pour la mesure du champ lointain direct .....                                                     | 16 |
| Figure B.1 – Montage d'essai pour l'ouverture variable de la mesure du champ lointain .....                                    | 24 |
| Figure B.2 – Montage de mesure .....                                                                                           | 26 |
| Figure C.1 – Montage d'essai de la méthode du champ proche .....                                                               | 32 |
| Figure D.1 – Intensité en champ lointain .....                                                                                 | 38 |
| Figure D.2 – Intensité en champ proche .....                                                                                   | 38 |
| Figure F.1 – Tracé de champ lointain type affichant des lobes latéraux .....                                                   | 46 |
| Figure G.1 – Géométrie de mesure de la méthode d'ouverture variable .....                                                      | 50 |
| Figure G.2 – Système de coordonnées utilisé pour évaluer le champ de diffraction .....                                         | 50 |

## CONTENTS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD .....                                                                                                          | 7  |
| 1 Scope and object .....                                                                                                | 9  |
| 2 Reference documents .....                                                                                             | 11 |
| 3 Apparatus .....                                                                                                       | 11 |
| 3.1 Light source .....                                                                                                  | 11 |
| 3.2 Input optics .....                                                                                                  | 11 |
| 3.3 Cladding mode stripper .....                                                                                        | 11 |
| 3.4 High-order mode filter .....                                                                                        | 11 |
| 3.5 Computer .....                                                                                                      | 11 |
| 4 Sampling and specimens .....                                                                                          | 11 |
| 4.1 Specimen length .....                                                                                               | 11 |
| 4.2 Specimen end faces .....                                                                                            | 13 |
| 5 Procedure .....                                                                                                       | 13 |
| 6 Calculation or interpretation of results .....                                                                        | 13 |
| 6.1 Near-field .....                                                                                                    | 13 |
| 6.2 Direct far-field .....                                                                                              | 13 |
| 6.3 Variable aperture in the far-field .....                                                                            | 13 |
| 7 Documentation .....                                                                                                   | 15 |
| 7.1 Information to be reported with each measurement .....                                                              | 15 |
| 7.2 Information that should be available upon request .....                                                             | 15 |
| Annex A Direct far-field method measurement specifics .....                                                             | 17 |
| Annex B Variable aperture in the far-field method measurement specifics .....                                           | 25 |
| Annex C Near-field method measurement specifics .....                                                                   | 33 |
| Annex D Sample data and calculations .....                                                                              | 39 |
| Annex E Comparison between this technical report and ITU recommendations .....                                          | 45 |
| Annex F Treatment of side lobes in far-field data .....                                                                 | 47 |
| Annex G Method for computing effective area from variable aperture data .....                                           | 49 |
| Annex H Fortran listing of the subroutines that perform the desired solution of the quadratic programming problem ..... | 73 |
| Figure A.1 – Test set-up for the direct far-field measurement .....                                                     | 17 |
| Figure B.1 – Test set-up for the variable aperture in the far-field measurement .....                                   | 25 |
| Figure B.2 – Apparatus set-up measurements .....                                                                        | 27 |
| Figure C.1 – Near-field method test set-up .....                                                                        | 33 |
| Figure D.1 – Far-field intensity .....                                                                                  | 39 |
| Figure D.2 – Near-field intensity .....                                                                                 | 39 |
| Figure F.1 – Typical far-field plot displaying side lobes .....                                                         | 47 |
| Figure G.1 – Measurement geometry of the variable aperture method .....                                                 | 51 |
| Figure G.2 – Co-ordinate system used to evaluate the diffraction field .....                                            | 51 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure G.3 – Coordonnées polaires de $\vec{r}$ .....                                                             | 52 |
| Figure G.4 – Géométrie pour l'évaluation de l'équation (G.11) .....                                              | 54 |
| Figure G.5 – Exemple de l'ajustement aux données de flux d'énergie d'ouverture .....                             | 62 |
| Figure G.6 – Ajustement en présence de données décroissantes .....                                               | 64 |
| Figure G.7 – Champ de mode des données de la Figure G.5.....                                                     | 66 |
| Figure G.8 – Changement dans $A_{\text{eff}}$ avec $r_{\text{max}}$ , à partir des données de la Figure G.6..... | 68 |
| Tableau D.1 – Echantillons mesurés et données calculées.....                                                     | 40 |
| Tableau G.1 – Comparaison des aires efficaces exactes et calculées .....                                         | 68 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 62284:2003

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure G.3 – Polar co-ordinates of $\vec{r}$ .....                                                | 53 |
| Figure G.4 – Geometry for the evaluation of equation (G.11) .....                                 | 55 |
| Figure G.5 – Example of the fit to aperture power flow data .....                                 | 63 |
| Figure G.6 – Fit in the presence of decreasing data .....                                         | 65 |
| Figure G.7 – Mode field from the data in Figure G.5 .....                                         | 67 |
| Figure G.8 – Change in $A_{\text{eff}}$ with $r_{\text{max}}$ , from the data in Figure G.6 ..... | 69 |
| Table D.1 – Sample measured and calculated data .....                                             | 41 |
| Table G.1 – Comparison of exact and computed effective areas .....                                | 69 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 62284:2003

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### MESURES DE L'AIRE EFFICACE DES FIBRES OPTIQUES UNIMODALES – GUIDE D'APPLICATION

#### AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique 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 du présent rapport technique 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 tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

La CEI 62284, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 86A: Fibres et câbles, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

| Projet d'enquête | Rapport de vote |
|------------------|-----------------|
| 86A/757/DTR      | 86A/799/RVC     |

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2004. A cette date, la publication sera

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

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**EFFECTIVE AREA MEASUREMENTS OF SINGLE-MODE OPTICAL FIBRES –  
GUIDANCE**

## 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 technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 62284, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 86A: Fibres and cables, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

The text of this technical report is based on the following documents:

|               |                  |
|---------------|------------------|
| Enquiry draft | Report on voting |
| 86A/757/DTR   | 86A/799/RVC      |

Full information on the voting for the approval of this technical report 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 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2004. At this date, the publication will be

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

## MESURES DE L'AIRE EFFICACE DES FIBRES OPTIQUES UNIMODALES – GUIDE D'APPLICATION

### 1 Domaine d'application et objet

Le présent rapport technique s'applique aux fibres optiques unimodales. Il a pour objet de donner en détail les méthodes de mesure de l'aire efficace ( $A_{\text{eff}}$ ) de ces fibres.

Il définit trois méthodes de mesure de  $A_{\text{eff}}$ . Des informations communes à toutes les méthodes figurent dans le corps de ce document. Des informations spécifiques à chaque méthode figurent dans les annexes. Les trois méthodes sont les suivantes :

- a) Champ lointain direct (DFF)
- b) Ouverture variable dans le champ lointain (VAMFF)
- c) Champ proche (NF)

La méthode de référence, utilisée pour résoudre les litiges, est la méthode A, champ lointain direct.

L'aire efficace est un attribut optique qui est spécifié pour des fibres unimodales et utilisé dans des conceptions de système qui peuvent être affectées par le coefficient d'indice de réfraction non linéaire,  $n_2$ . Il existe un accord parmi les organismes de normalisation tant nationaux qu'internationaux sur la définition utilisée dans ce rapport technique. Il a été reconnu que les méthodes A, B et C fournissent des résultats équivalents, à condition que l'on utilise une bonne ingénierie lors de la mise en application.

Le champ lointain direct est la méthode de référence parce qu'il s'agit de la méthode la plus directe et qu'elle est désignée comme étant la méthode de référence pour le diamètre du champ de mode de l'UIT.

Une fonction de cartographie est une formule par laquelle les résultats mesurés d'un attribut sont utilisés pour prédire la valeur d'un autre attribut sur une fibre donnée. Pour un type et une conception de fibre donnés, le diamètre du champ de mode (MFD) (CEI 60793-1-45) peut être utilisé pour prédire l'aire efficace avec une fonction de cartographie. Une fonction de cartographie est spécifique à un type et une conception particuliers de fibre. Les fonctions de cartographie sont générées en effectuant une expérimentation dans laquelle un échantillon de fibre est choisi pour représenter le spectre des valeurs des MFD et dans laquelle les fibres de l'échantillon sont mesurées à la fois pour le MFD et pour  $A_{\text{eff}}$ . La régression linéaire peut être utilisée pour déterminer le coefficient d'adaptation,  $k$ , comme défini ci-dessous:

$$A_{\text{eff}} = k\pi \left( \frac{\text{MFD}}{2} \right)^2 \quad (1)$$

NOTE D'autres modèles mathématiques peuvent être utilisés s'ils sont dans l'ensemble plus précis.

## EFFECTIVE AREA MEASUREMENTS OF SINGLE-MODE OPTICAL FIBRES – GUIDANCE

### 1 Scope and object

This technical report applies to single-mode optical fibres. Its object is to document the methods for measuring the effective area ( $A_{\text{eff}}$ ) of these fibres.

It defines three methods of measuring  $A_{\text{eff}}$ . Information common to all the methods is found in the body of this document. Information specific to each method is found in the annexes. The three methods are:

- a) direct far-field (DFF)
- b) variable aperture in the far-field (VAMFF)
- c) near-field (NF)

The reference method, used to resolve disputes, is method A, direct far field.

Effective area is an optical attribute that is specified for single-mode fibres and used in system designs that may be affected by the non-linear refractive index coefficient,  $n_2$ . There is agreement in both national and international standards bodies concerning the definition used in this technical report. Methods A, B, and C have been recognised as providing equivalent results, provided that good engineering is used in implementation.

The direct far-field is the reference method because it is the most direct method and is named as the reference method for mode field diameter in the ITU.

A mapping function is a formula by which the measured results of one attribute are used to predict the value of another attribute on a given fibre. For a given fibre type and design, the mode field diameter (MFD) (IEC 60793-1-45) can be used to predict the effective area with a mapping function. A mapping function is specific to a particular fibre type and design. Mapping functions are generated by doing an experiment in which a sample of fibre is chosen to represent the spectrum of values of MFD and in which the fibres in the sample are measured for both MFD and  $A_{\text{eff}}$ . Linear regression can be used to determine the fitting coefficient,  $k$ , as defined by the following:

$$A_{\text{eff}} = k\pi\left(\frac{\text{MFD}}{2}\right)^2 \quad (1)$$

NOTE Other mathematical models may be used if they are generally more accurate.

## 2 Documents de référence

CEI 60793-1-45, *Fibres optiques – Partie 1-45: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Diamètre du champ de mode*

Recommandation UIT-T G.650:2000, *Définition des paramètres des fibres monomodes et méthodes de test associées*

## 3 Appareillage

Les Annexes A, B et C comprennent des schémas pour chaque méthode.

### 3.1 Source de lumière

Utiliser une source de lumière adaptée cohérente ou non cohérente, telle qu'un laser à semiconducteur ou une lumière blanche filtrée de puissance suffisante ou encore une DEL. Il convient que la source soit stable en intensité et longueur d'onde sur une période de temps suffisante pour réaliser les mesures. Il convient de spécifier la longueur d'onde de la source dans la spécification particulière. Sauf spécification contraire de la spécification particulière, il convient que la largeur de ligne spectrale soit inférieure ou égale à une largeur totale à mi-hauteur (FWHM) de 10 nm.

### 3.2 Dispositifs optiques d'entrée

Utiliser un système de lentille optique ou une fibre amorce pour exciter la fibre en essai. Coupler la puissance dans la fibre en essai de sorte qu'elle soit insensible à la position de la face d'extrémité d'entrée. À cet effet, on peut utiliser un faisceau d'injection qui sature spatialement et angulairement la fibre en essai. Si une épissure aboutée est utilisée, utiliser un liquide adaptateur d'indice pour éviter les effets de perturbation. Il convient que le couplage soit stable pendant la durée de l'essai.

### 3.3 Extracteur de modes de gaine

Utiliser un dispositif qui extrait les modes de gaine. Le revêtement de la fibre réalise généralement cette fonction.

### 3.4 Filtre de mode d'ordre élevé

Utiliser une méthode en vue de supprimer les modes d'ordres supérieurs lorsqu'ils sont capables de se propager. Par exemple, une boucle unique de diamètre  $\sim 30$  mm de la fibre en essai est généralement suffisante.

### 3.5 Ordinateur

Facultativement, utiliser un ordinateur pour commander l'appareillage, relever les mesures d'intensité et calculer le résultat final.

## 4 Echantillonnage et éprouvettes

### 4.1 Longueur d'éprouvette

Préparer l'éprouvette en essai de la fibre unimodale pour une longueur type de  $2,0 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$ .

## 2 Reference documents

IEC 60793-1-45, *Optical fibres – Part 1-45: Measurement methods and test procedures – Mode field diameter*

ITU-T Recommendation G.650:2000, *Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres*

## 3 Apparatus

Annexes A, B, and C include schematics for each method.

### 3.1 Light source

Use a suitable coherent or non-coherent light source, such as a semiconductor laser or a sufficiently powerful filtered white light or LED source. The source should be stable in intensity and wavelength over a time period sufficient to perform the measurement. The wavelength of the source should be specified in the detail specification. Unless otherwise specified in the detail specification, the spectral line width should be less than or equal to 10 nm full width at half-maximum (FWHM).

### 3.2 Input optics

Use an optical lens system or fibre pigtail to excite the test fibre. Couple the power into the test fibre so it is insensitive to the position of the input end face. This can be done with a launch beam that spatially and angularly overfills the test fibre. If a butt splice is used, use index-matching fluid to avoid interference effects. The coupling should be stable for the duration of the test.

### 3.3 Cladding mode stripper

Use a device that extracts cladding modes. The fibre coating will typically perform this function.

### 3.4 High-order mode filter

Use a method to remove higher order modes whenever they are capable of propagating. For example, a one-turn bend of diameter  $\sim 30$  mm in the test fibre is generally sufficient.

### 3.5 Computer

Optionally, use a computer to control the apparatus, take intensity measurements and compute the final result.

## 4 Sampling and specimens

### 4.1 Specimen length

Prepare the single-mode fibre test specimen to a length of, typically,  $2,0 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$ .

## 4.2 Faces d'extrémités de l'éprouvette

Préparer les faces d'extrémités planes au niveau de l'entrée et de la sortie de l'éprouvette.

Une qualité médiocre d'extrémité de sortie peut produire des mesures erronées.

## 5 Procédure

Voir respectivement les Annexes A, B ou C pour les méthodes A, B et C.

## 6 Calculs ou interprétation des résultats

Les équations suivantes définissent l' $A_{\text{eff}}$  pour les méthodes en termes de champ électromagnétique émis depuis l'extrémité de l'éprouvette. Les procédures de calcul sont données dans les annexes.

### 6.1 Champ proche

L'aire efficace,  $A_{\text{eff}}$ , est définie à partir de la distribution de l'intensité en champ proche,  $I(r)$ ,  $r$  étant la distance radiale à partir du centre du profil du champ de mode, par l'équation suivante:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[ \int_0^{\infty} I(r) r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 r dr} \quad (2)$$

### 6.2 Champ lointain direct

La fonction de Bessel d'ordre zéro,  $J_0$ , est utilisée pour déterminer le diagramme de distribution de l'intensité en champ proche,  $I(r)$ , à partir de la distribution de puissance en champ lointain,  $P_{\text{ff}}(\theta)$ .

$$I(r) = \left[ \int (\pm) P_{\text{ff}}^{1/2}(\theta) J_0 \left( \frac{2\pi r \sin(\theta)}{\lambda} \right) \sin(\theta) d\theta \right]^2 \quad (3)$$

NOTE 1 Il convient que les unités de la longueur d'onde mesurée,  $\lambda$ , soient les mêmes que celles de la coordonnée radiale,  $r$ . Généralement, celles-ci sont mesurées en  $\mu\text{m}$ .

NOTE 2 Si des lobes latéraux sont observés, les signes des lobes impairs doivent être changés (référence au signe  $\pm$  de l'équation) avant intégration. (Voir l'Annexe F pour des informations complémentaires.)

La distribution de l'intensité en champ proche résultante provenant de l'équation (3) est ensuite utilisée avec l'équation (2) pour déterminer l' $A_{\text{eff}}$ .

### 6.3 Ouverture variable dans le champ lointain

La puissance détectée à travers une ouverture de rayon  $v$  est  $P_v(v)$ .  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière à partir de la source.  $\theta$  est le demi angle sous-tendu d'ouverture. La distance de l'extrémité de sortie de la fibre en essai à l'ouverture est  $D$ . La puissance du champ lointain direct  $P_{\text{ff}}$  est liée à la puissance d'ouverture comme suit:

## 4.2 Specimen end faces

Prepare flat end faces at the input and output ends of the specimen.

Poor output end quality can produce erroneous measurements.

## 5 Procedure

See Annexes A, B, or C for methods A, B, and C, respectively.

## 6 Calculation or interpretation of results

The following equations define the  $A_{\text{eff}}$  for the methods in terms of the electromagnetic field emitted from the end of the specimen. Calculation procedures are given in the annexes.

### 6.1 Near-field

Effective area,  $A_{\text{eff}}$ , is defined from the near-field intensity distribution,  $I(r)$ ,  $r$  being the radial distance from the centre of the mode field profile, through the following equation:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[ \int_0^{\infty} I(r) r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 r dr} \quad (2)$$

### 6.2 Direct far-field

The zero-order Bessel function,  $J_0$ , is used to determine the near-field intensity distribution pattern,  $I(r)$ , from the far-field power distribution,  $P_{\text{ff}}(\theta)$ :

$$I(r) = \left[ \int (\pm) P_{\text{ff}}^{1/2}(\theta) J_0 \left( \frac{2\pi r \sin(\theta)}{\lambda} \right) \sin(\theta) d\theta \right]^2 \quad (3)$$

NOTE 1 The units of the measured wavelength,  $\lambda$ , should be the same as those of the radial co-ordinate,  $r$ . Typically these are measured in  $\mu\text{m}$ .

NOTE 2 If side lobes are observed, odd lobes are to be changed in sign (reference to  $\pm$  sign in equation) before integration. (See Annex F for more information.)

The resultant near-field intensity distribution derived from equation (3) is then used with equation (2) to determine  $A_{\text{eff}}$ .

### 6.3 Variable aperture in the far-field

The power detected through an aperture of radius  $v$  is  $P_v(v)$ . The wavelength of light from the source is  $\lambda$ . The subtended half angle of the aperture is  $\theta$ . The distance from the output end of the test fibre to the aperture is  $D$ . The direct far field power  $P_{\text{ff}}$  is related to the aperture power as:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{D}\right) \quad (4a)$$

$$\text{Définir } \rho = \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta) \quad (4b)$$

$$P_{ff}(\rho) = \frac{dP_v(\rho)}{2\pi\rho d\rho} \quad (5)$$

Utiliser l'équation (5) pour convertir  $P_v(v)$  en  $P_{ff}(\rho)$ . Utiliser l'équation (3) pour effectuer la conversion en modèle d'intensité de champ proche et ensuite l'équation (2) pour calculer l'aire efficace.

## 7 Documentation

### 7.1 Informations à fournir pour chaque mesure

- a) Identification pour chaque éprouvette en essai
- b) Aire efficace ( $A_{eff}$ ), en micromètres carrés ( $\mu m^2$ )
- c) Longueur d'onde

### 7.2 Informations à fournir sur demande

- a) La méthode de mesure utilisée
- b) La description de l'équipement en essai, y compris les sources de lumière, la méthode de balayage ou de traduction, l'optique d'injection, l'extracteur de modes de gaine, l'optique de détection et les techniques d'enregistrement
- c) La date et les résultats pour l'étalonnage d'instrument le plus récent
- d) Les données sur la reproductibilité de la mesure

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{D}\right) \quad (4a)$$

$$\text{Define } \rho = \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta) \quad (4b)$$

$$P_{ff}(\rho) = \frac{dP_v(\rho)}{2\pi\rho d\rho} \quad (5)$$

Use equation (5) to convert  $P_v(v)$  to  $P_{ff}(\rho)$ . Use equation (3) to convert to the near-field intensity pattern and then equation (2) to calculate the effective area.

## 7 Documentation

### 7.1 Information to be reported with each measurement

- a) Identification for each test specimen
- b) Effective area ( $A_{eff}$ ), in squared micrometers ( $\mu m^2$ )
- c) Wavelength

### 7.2 Information that should be available upon request

- a) The measurement method used
- b) Description of the test equipment, including light sources, scanning or translation method, launch optics, cladding mode stripper, detection optics, and recording techniques
- c) Date and results for the most recent instrument calibration
- d) Data on measurement reproducibility

## Annexe A

### Spécificité de mesure de la méthode du champ lointain direct

#### A.0 Introduction

La présente annexe donne en détail l'appareillage, la procédure et le calcul pour la méthode du champ lointain direct.

#### A.1 Appareillage

Un schéma de l'appareillage est fourni à la Figure A.1.

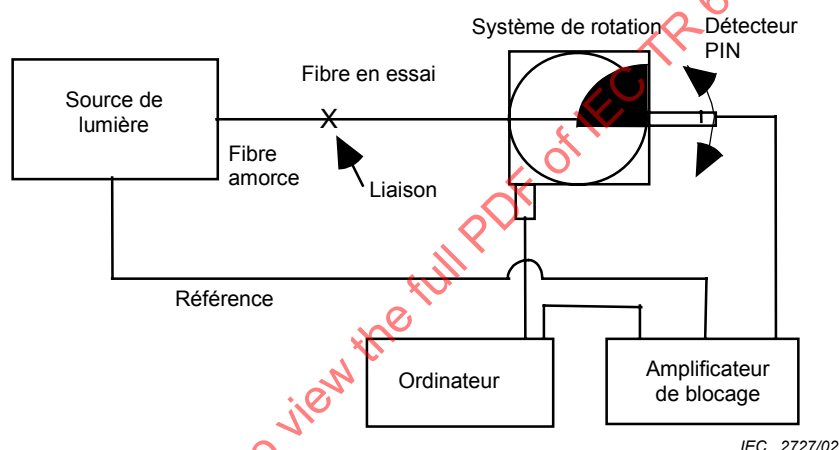


Figure A.1 – Montage d'essai pour la mesure du champ lointain direct

##### A.1.1 Détecteur et ouverture

Utiliser un détecteur, tel qu'une diode PIN, qui a une dynamique suffisante, c'est-à-dire de 50 dB au-dessous de la puissance maximale à zéro degré, et qui est linéaire sur la plage des intensités rencontrées. Il convient que le «plancher de détection» ou le «bruit de ligne de base» du détecteur soit minimisé de façon à maximiser la plage dynamique utilisable du système. Il est recommandé un minimum de 50 dB de dynamique utilisable. Il convient que

le détecteur soit placé à une distance d'au moins  $100 \frac{w^2}{\lambda}$  de la face d'extrémité de la fibre en essai, où  $2w$  est le diamètre du champ de mode nominal de la fibre en essai et  $\lambda$  est la longueur d'onde nominale de mesure. Il convient que l'angle sous-tendu par l'ouverture en face du détecteur soit inférieur ou égal à  $0,5^\circ$ , quelle que soit la dimension.

##### A.1.2 Appareillage de balayage

Balayer le diagramme de rayonnement en champ lointain soit en tournant le détecteur autour d'un arc qui est centré sur la face d'extrémité de fibre soit en tournant la face d'extrémité de fibre devant un détecteur fixe. Il convient que l'appareillage de balayage soit capable de pas de  $0,5^\circ$  ou plus fin. Il convient que le balayage couvre un diamètre entier du diagramme de champ lointain. Il convient généralement que l'appareillage de balayage soit en mesure de balayer un rayon d'arc d'au moins  $\pm 23,5^\circ$ .

NOTE Des mesures multiples, en faisant tourner la fibre par rapport au plan de balayage aboutiront à une amélioration de la précision.

## Annex A

### Direct far-field method measurement specifics

#### A.0 Introduction

This annex documents the apparatus, procedure, and calculation for the direct far-field method.

#### A.1 Apparatus

A schematic of the apparatus is given in Figure A.1.

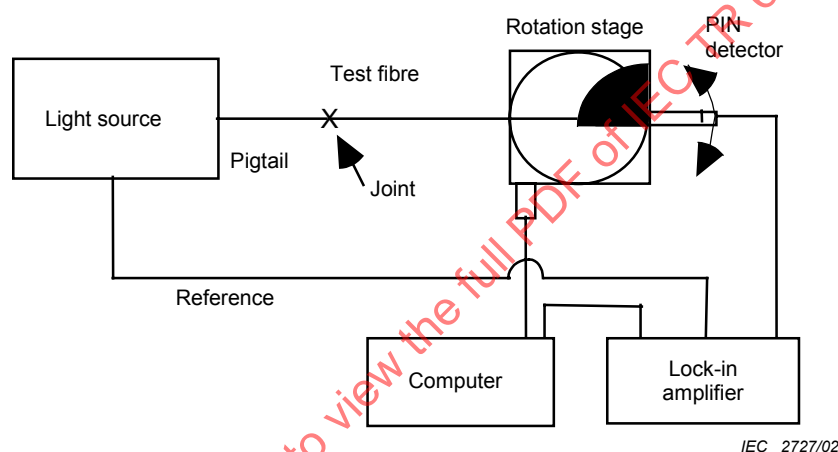


Figure A.1 – Test set-up for the direct far-field measurement

##### A.1.1 Detector and aperture

Use a detector, such as a PIN diode, that has enough dynamic range, that is, 50 dB down from the maximum power at zero degrees, and that is linear over the range of intensities that are encountered. The “detection floor” or “baseline noise” of the detector should be minimised so as to maximise the usable dynamic range of the system. A minimum of 50 dB of usable dynamic range is recommended. The detector should be placed a distance of at least

$100 \frac{w^2}{\lambda}$  from the test fibre end face, where  $2w$  is the nominal mode field diameter of the test fibre and  $\lambda$  is the nominal measurement wavelength. The angle subtended by the aperture in front of the detector should be less than or equal to  $0,5^\circ$  in either dimension.

##### A.1.2 Scanning apparatus

Either scan the far-field radiation pattern by rotating the detector about an arc that is centred on the fibre end face or by rotating the fibre end face in front of a fixed detector. The scanning apparatus should be capable of steps of  $0,5^\circ$  or finer. The scan should cover an entire diameter of the far-field pattern. Typically, the scanning apparatus should be capable of scanning an arc radius of at least  $\pm 23,5^\circ$ .

NOTE Multiple measurements, with the fibre rotated relative to the scanning plane will result in improved accuracy.

## A.2 Procédure

- Préparer la fibre en essai
- Préparer la fibre en essai et l'aligner dans le système de sorte que la puissance sur le détecteur centré (angle  $\theta = 0$ ) soit maximale
- Balayer le détecteur
- Balayer le détecteur sur le rayon d'arc spécifié en A.1.2, en incréments égaux d'angle. Pour chaque position,  $\theta_i$ , consigner la puissance détectée,  $P(\theta_i)$ . L'angle maximal de détecteur utilisé est  $\theta_{\max}$  à indice  $i = n$ , nombre de positions angulaires positives. Pour  $\theta < 0$ , l'indice,  $i$ , est défini avec des valeurs négatives. Note:  $\theta_0 = 0$
- Effectuer les calculs
- Effectuer les calculs définis à l'Article A.3 pour déterminer l'aire efficace

## A.3 Calculs

Les calculs suivants sont un moyen d'effectuer les intégrations données à l'Article 6. D'autres méthodes peuvent être utilisées si elles sont au moins aussi précises que la méthode suivante. Au lieu de replier les données, par exemple, un calcul du diamètre du champ de mode séparé pour les ensembles de données angulaires positifs et négatifs peut être effectué et moyenné en vue du résultat final.

- Replier les données de puissance de rayonnement en champ lointain

Soit  $P(\theta_i)$  la puissance mesurée comme une fonction de position angulaire,  $\theta_i$  indexé par  $i$ . La courbe de puissance repliée,  $P_f(\theta_i)$ , pour  $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$  est:

$$P_f(\theta_i) = \frac{P(\theta_i) + P(-\theta_i)}{2} \quad (\text{A.1})$$

Si les données en champ lointain ne sont pas centrées autour de  $\theta = 0$ , alors les données autour de ce point provoqueront des erreurs. Le tableau ci-dessous présente des estimations de l'erreur résultant du pliage autour de  $\theta = 0$  de données non centrées.

| Centre de l'erreur de symétrie<br>degrés | Erreur de $A_{\text{eff}}$<br>$\mu\text{m}^2$ |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0                                        | 0,0 %                                         |
| 0,2                                      | -0,4 %                                        |
| 0,4                                      | -1,7 %                                        |

Pour éviter cette erreur de pliage, les données de champ lointain peuvent être pliées autour du centroïde du diagramme de champ lointain.

Calculer le centroïde de la région de crête des données de champ lointain par l'équation suivante:

$$\theta_{\text{centroïde}} = \frac{\int_{\theta_{\text{gauche}}}^{\theta_{\text{droite}}} \theta \cdot P(\theta_i) d\theta}{\int_{\theta_{\text{gauche}}}^{\theta_{\text{droite}}} P(\theta_i) d\theta} \quad (\text{A.2})$$

où

$\theta_{\text{gauche}}$  est l'angle qui correspond au point de données de gauche ( $\theta$  négatif) égal à 10 % de la puissance de crête;

## A.2 Procedure

- a) Prepare the test fibre
- b) Prepare the test fibre and align it in the system so the power on the centred detector (angle  $\theta = 0$ ) is maximum
- c) Scan the detector
- d) Scan the detector over the arc radius specified in A.1.2, in increments of equal angle. For each position,  $\theta_i$ , record the detected power,  $P(\theta_i)$ . The maximum detector angle used is  $\theta_{\max}$  at index  $i=n$ , the number of positive angular positions. For  $\theta < 0$ , the index,  $i$ , is defined with negative values. Note:  $\theta_0 = 0$ .
- e) Complete the calculations
- f) Complete the calculations defined in Clause A.3 to determine the effective area

## A.3 Calculations

The following calculations are one means of completing the integrations given in Clause 6. Other methods may be used if they are at least as accurate as the following. Instead of folding the data, for example, a separate mode field diameter calculation for positive and negative angular data sets can be completed and then averaged for the final result.

- a) Fold the far-field radiation power data

Let  $P(\theta_i)$  be the measured power as a function of angular position,  $\theta_i$  indexed by  $i$ . The folded power curve,  $P_f(\theta_i)$ , for  $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$  is:

$$P_f(\theta_i) = \frac{P(\theta_i) + P(-\theta_i)}{2} \quad (\text{A.1})$$

If the far-field data is not centred about  $\theta = 0$ , then the data around this point will cause errors to occur. The table below presents estimates of the error resulting from folding around  $\theta=0$  of non-centred data.

| Centre of symmetry error<br>degrees | $A_{\text{eff}}$ error<br>$\mu\text{m}^2$ |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| 0                                   | 0,0 %                                     |
| 0,2                                 | –0,4 %                                    |
| 0,4                                 | –1,7 %                                    |

To avoid this folding error, the far-field data can be folded around the centroid of the far-field pattern.

Calculate the centroid of the peak region of the far-field data by the following equation:

$$\theta_{\text{centroid}} = \frac{\int_{\theta_{\text{left}}}^{\theta_{\text{right}}} \theta \cdot P(\theta_i) d\theta}{\int_{\theta_{\text{left}}}^{\theta_{\text{right}}} P(\theta_i) d\theta} \quad (\text{A.2})$$

where

$\theta_{\text{left}}$  is the angle that corresponds to the left-hand data point (negative  $\theta$ ) equal to 10 % of the peak power;

$\theta_{\text{droite}}$  est l'angle qui correspond au point de données de droite ( $\theta$  positif) égal à 10 % (–10 dB) de la puissance de crête.

Les plans d'intégration numériques décrits en A.3b) peuvent être utilisés.

La courbe de puissance repliée,  $P_{\text{fold}}(\theta_i)$ , pour  $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\text{max}}$

$$P_{\text{fold}}(\theta_i) = \frac{P_{\text{interp}}(\theta_{\text{centroid}} + i\Delta\theta) + P_{\text{interp}}(\theta_{\text{centroid}} - i\Delta\theta)}{2} \quad (\text{A.3})$$

où

$P_{\text{interp}}$  est l'interpolation de la fonction cubique spline à l'angle indiqué;

$\Delta\theta$  est la taille du pas de l'angle des données mesurées à l'origine.

En variante, le profil du champ lointain peut être séparé en un côté gauche  $A_{\text{eff gauche}}$  et un côté droit  $A_{\text{eff droit}}$ , chacun traité indépendamment pour donner deux résultats, en consignant la moyenne. Les profils de champ lointain droite et gauche peuvent être définis par:

$$P_{\text{gauche}}(\theta_i) = P_{\text{interp}}(\theta_{\text{center}} - i\Delta\theta) \quad (\text{A.4a})$$

$$P_{\text{droit}}(\theta_i) = P_{\text{interp}}(\theta_{\text{center}} + i\Delta\theta) \quad (\text{A.4b})$$

où  $\theta_{\text{center}}$  est soit  $\theta = 0$  (si pliage autour de  $\theta = 0$ ) soit  $\theta_{\text{centroid}}$  (si pliage autour du centroïde).

De même, les points de données «tels que mesurés» peuvent être utilisés directement si le pas non uniforme entre  $\theta_{\text{centroid}}$  et le premier point de donnée mesuré est pris en compte dans les pas d'intégration subséquents.

b) Calculer le diagramme d'intensité en champ proche.

Utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (3). Ce qui suit est donné à titre d'exemple. Il convient que toute autre méthode d'intégration soit au moins aussi précise.

Calculer les valeurs du champ proche pour une gamme de rayons,  $r_j$ , les valeurs s'étendant de zéro à une valeur assez large pour que l'intensité calculée pour le rayon maximal soit inférieure à 0,01 % de l'intensité maximale.

$$I(r_j) = \left[ \sum_0^n (\pm) P_f^{1/2}(\theta_i) J_0 \left( \frac{2\pi r_j \sin(\theta_i)}{\lambda} \right) \sin(\theta_i) \Delta\theta \right]^2 \quad (\text{A.5})$$

où

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0;$$

$n$  est le nombre d'angles mesurés, déterminé par le nombre des itérations de  $\Delta\theta$  pour générer l'angle le plus grand lorsque la puissance mesurée dépasse le plancher de détection du système.

NOTE Si des lobes latéraux sont observés, les signes des lobes impairs sont changés (référence au signe  $\pm$  de l'équation) avant intégration. (Voir l'Annexe F pour des informations complémentaires.)

L'erreur induite par l'utilisation d'une intégration rectangulaire peut être considérablement réduite en utilisant un plan d'intégration d'ordre supérieur tel qu'une règle étendue  $1/N^3$  ou une règle de Simpson. Les formes généralisées sont montrées ci-dessous pour la taille du pas uniforme  $h$ .

Règle  $1/N^3$  étendue:

$$\int_{x1}^{xn} f(x)dx = h \left[ \frac{5}{12} f_1 + \frac{13}{12} f_2 + f_3 + f_4 + \dots + f_{n-2} + \frac{13}{12} f_{n-1} + \frac{5}{12} f_n \right] \quad (\text{A.6})$$

$\theta_{\text{right}}$  is the angle that corresponds to the right-hand data point (positive  $\theta$ ) equal to 10 % (–10 dB) of the peak power.

Numerical integration schemes described in A.3b) can be used.

The folded power curve,  $P_{\text{fold}}(\theta_i)$ , for  $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\text{max}}$

$$P_{\text{fold}}(\theta_i) = \frac{P_{\text{interp}}(\theta_{\text{centroid}} + i\Delta\theta) + P_{\text{interp}}(\theta_{\text{centroid}} - i\Delta\theta)}{2} \quad (\text{A.3})$$

where

$P_{\text{interp}}$  is the cubic spline interpolation at the indicated angle;

$\Delta\theta$  is the angle step size of the originally measured data.

Alternatively, the far field profile can be separated into left and right sides, each processed independently to give two results,  $A_{\text{eff left}}$  and  $A_{\text{eff right}}$ , with the average being reported. The left and right far field profiles can be defined by:

$$P_{\text{left}}(\theta_i) = P_{\text{interp}}(\theta_{\text{center}} - i\Delta\theta) \quad (\text{A.4a})$$

$$P_{\text{right}}(\theta_i) = P_{\text{interp}}(\theta_{\text{center}} + i\Delta\theta) \quad (\text{A.4b})$$

where  $\theta_{\text{center}}$  is either  $\theta=0$  (if folding about  $\theta=0$ ) or  $\theta_{\text{centroid}}$  (if folding about the centroid).

Also, the “as measured” data points can be used directly if the non-uniform step between  $\theta_{\text{centroid}}$  and the first measured data point is taken into account in the subsequent integration steps.

b) Compute the near-field intensity pattern.

Use an appropriate numerical integration method to compute the integrals of equation (3). The following is an example. Any other integration method should be at least as accurate.

Calculate the near-field values for a range of radii,  $r_j$ , values ranging from zero to a value large enough that the computed intensity at the maximum radius is less than 0,01 % of the maximum intensity.

$$I(r_j) = \left[ \sum_{i=0}^n (\pm) P_f^{1/2}(\theta_i) J_0 \left( \frac{2\pi r_j \sin(\theta_i)}{\lambda} \right) \sin(\theta_i) \Delta\theta \right]^2 \quad (\text{A.5})$$

where

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$$

$n$  is the number of angles measured, determined by the number of iterations of  $\Delta\theta$  to generate the largest angle where the measured power exceeds the detection floor of the system.

NOTE If side lobes are observed, odd lobes are changed in sign (reference to  $\pm$  sign in equation) before integration. (See Annex F for more information.)

The error induced by using rectangular integration can be greatly reduced by using a higher order integration scheme such as an extended  $1/N^3$  rule or Simpson's rule. The generalised forms are shown below for uniform step size  $h$ .

Extended  $1/N^3$  rule:

$$\int_{x1}^{xn} f(x)dx = h \left[ \frac{5}{12} f_1 + \frac{13}{12} f_2 + f_3 + f_4 + \dots + f_{n-2} + \frac{13}{12} f_{n-1} + \frac{5}{12} f_n \right] \quad (\text{A.6})$$

Règle de Simpson:

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x)dx = h \left[ \frac{1}{3} f_1 + \frac{4}{3} f_2 + \frac{2}{3} f_3 + \frac{4}{3} f_4 + \dots + \frac{2}{3} f_{n-2} + \frac{4}{3} f_{n-1} + \frac{1}{3} f_n \right] \quad (\text{A.7})$$

c) Calculer les intégrales de l'équation (2).

Utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (2). Ce qui suit est donné à titre d'exemple, en supposant que les positions de mesure sont espacées de façon égale.

Il convient que toute autre méthode d'intégration soit au moins aussi précise.

$$T = \left[ \sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{A.8})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{A.9})$$

où

$$\Delta r = r_1 - r_0;$$

$m$  est le nombre de positions mesurées, déterminé par le rayon auquel l'intensité en champ proche calculée est au-dessous de 0,01 % (–20 dB) de la puissance d'intensité en champ proche maximale.

NOTE Il convient de faire attention lors de la détermination du rayon maximal,  $r_m$ , étant donné que des erreurs dans l'intensité en champ proche calculée au niveau des grands rayons tendent à être assez significatives. L'utilisation d'un rayon maximal,  $r_m$ , correspondant à une intensité en champ proche de 0,01 % s'avère produire des valeurs  $A_{\text{eff}}$  avec une erreur au-dessous de 0,1 %. Si  $r_m$  est choisi trop grand, alors des erreurs significatives du résultat d' $A_{\text{eff}}$  peuvent survenir.

L'erreur induite par l'utilisation d'une intégration rectangulaire peut être considérablement réduite en utilisant un plan d'intégration d'ordre supérieur tel qu'une règle étendue  $1/N^3$  ou une règle de Simpson. Voir A.3b) pour plus de précisions.

d) Effectuer le calcul:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{A.10})$$

Les données des échantillons et les valeurs calculées sont fournies à l'Annexe D.

Simpson's rule:

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x)dx = h \left[ \frac{1}{3} f_1 + \frac{4}{3} f_2 + \frac{2}{3} f_3 + \frac{4}{3} f_4 + \dots + \frac{2}{3} f_{n-2} + \frac{4}{3} f_{n-1} + \frac{1}{3} f_n \right] \quad (\text{A.7})$$

c) Compute the integrals of equation (2).

Use an appropriate numerical integration method to compute the integrals of equation (2). The following is an example, assuming equally spaced measurement positions.

Any other integration method should be at least as accurate.

$$T = \left[ \sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{A.8})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{A.9})$$

where

$$\Delta r = r_1 - r_0;$$

$m$  is the number of positions measured, determined by the radius at which the calculated near-field intensity is below 0,01 % (–20 dB) of the maximum near-field intensity power.

NOTE Caution should be taken when determining the maximum radius,  $r_m$ , since errors in the calculated near-field intensity at large radii tend to be quite significant. Using a maximum radius,  $r_m$ , corresponding to a near-field intensity of 0,01 % has been shown to produce  $A_{\text{eff}}$  values with error below 0,1 %. If  $r_m$  is chosen too large, then significant errors in the  $A_{\text{eff}}$  result can occur.

The error induced by using rectangular integration can be greatly reduced by using a higher order integration scheme such as an extended  $1/N^3$  rule or Simpson's rule. See A.3b) for more details.

d) Complete the calculation:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{A.10})$$

Sample data and calculated values are provided in Annex D.

## Annexe B

### Ouverture variable dans la spécificité de mesure de la méthode du champ lointain

#### B.0 Introduction

La présente annexe donne en détail l'appareillage, la procédure et le calcul pour la méthode du champ lointain à ouverture variable.

#### B.1 Appareillage

Un schéma du montage en essai est fourni à la Figure B.1.

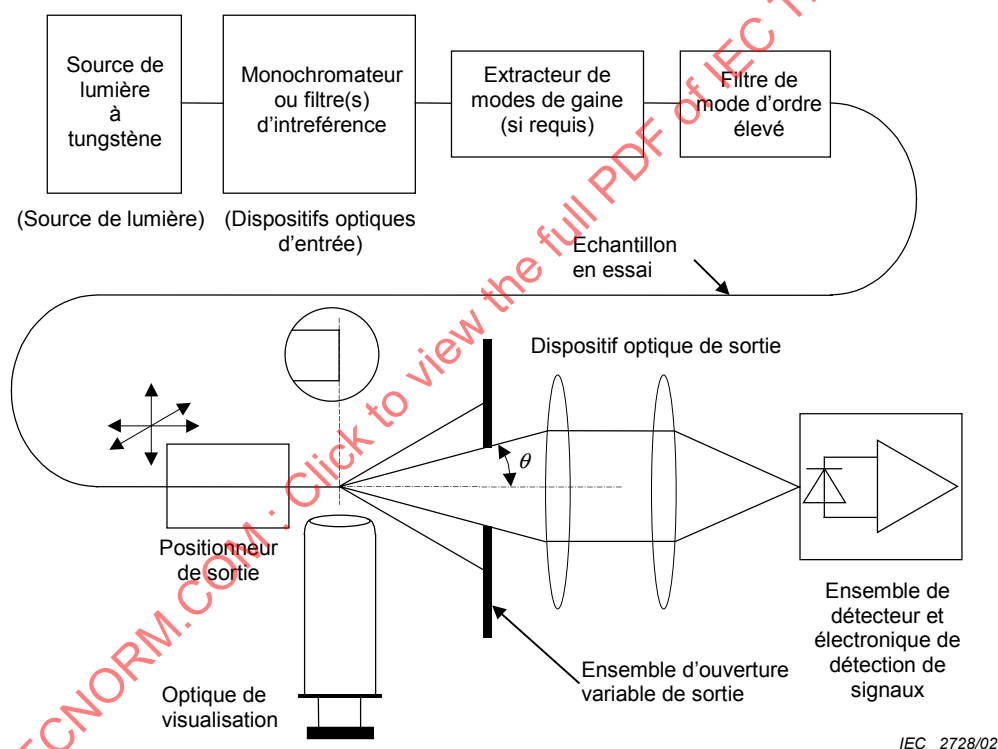


Figure B.1 – Montage d'essai pour l'ouverture variable de la mesure du champ lointain

##### B.1.1 Ensemble d'ouverture variable de sortie

Il convient qu'un dispositif constitué d'ouvertures de transmission rondes de tailles variées (telles qu'une roue d'ouverture) soit placé à une distance,  $D$ , d'au moins  $100 w_0^2 / \lambda$  de l'extrémité de fibre, et qu'il soit utilisé pour modifier la puissance collectée à partir du diagramme de sortie de fibre. Généralement, 12 à 20 ouvertures sont utilisées et sont éloignées de 20 mm à 50 mm environ de l'extrémité de la fibre. Il convient que l'ouverture numérique maximale du montage en essai soit  $\geq 0,40$ . Il convient d'utiliser un moyen de centrer les ouvertures par rapport au diagramme pour diminuer la sensibilité à l'angle d'extrémité de fibre.

## Annex B

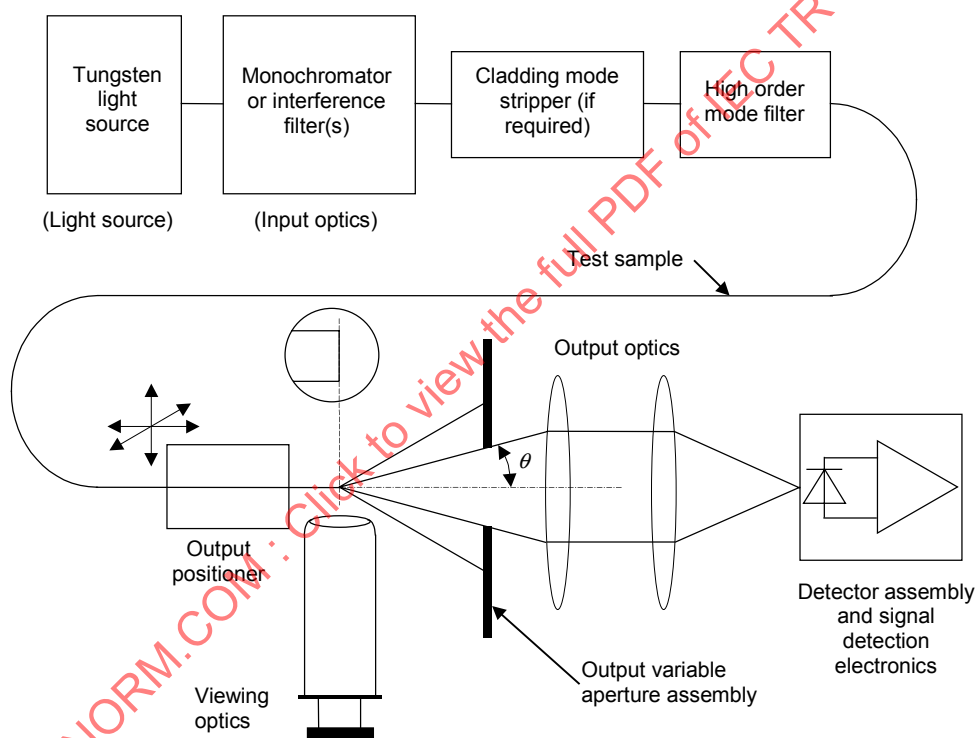
### Variable aperture in the far-field method measurement specifics

#### B.0 Introduction

This annex documents the apparatus, procedure and calculation for the variable aperture far-field method.

#### B.1 Apparatus

A schematic of the test set-up is given in Figure B.1.



IEC 2728/02

**Figure B.1 – Test set-up for the variable aperture in the far-field measurement**

##### B.1.1 Output variable aperture assembly

A device consisting of round transmitting apertures of various sizes (such as an aperture wheel), should be placed a distance,  $D$ , of at least  $100 w_0^2 / \lambda$  from the fibre end, and is used to vary the power collected from the fibre output pattern. Typically, 12 to 20 apertures are used and are located about 20 mm to 50 mm away from the fibre end. The maximum numerical aperture of the test set should be  $\geq 0,40$ . Means of centring the apertures with respect to the pattern should be employed to decrease sensitivity to fibre end-angle.

Dans le cadre du montage de l'équipement, mesurer et consigner la distance longitudinale,  $D$ , entre la position d'extrémité de sortie de fibre et le plan d'ouverture et les diamètres,  $x_i$ , de chaque ouverture. Déterminer le demi-angle sous-tendu par chaque ouverture dans la roue et consigner ces valeurs  $\theta_i$  ( $i=1$  à  $n$  dans l'ordre d'augmentation de la taille d'ouverture) pour des calculs futurs. Ces valeurs sont indépendantes de la longueur d'onde en essai.

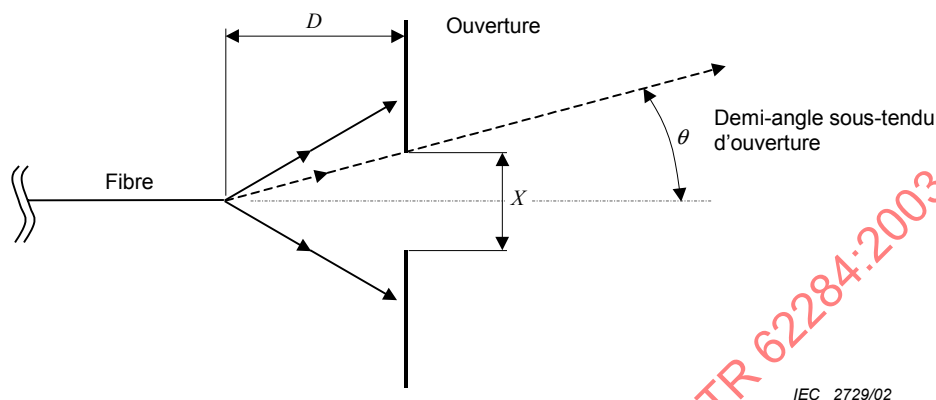


Figure B.2 – Montage de mesure

### B.1.2 Positionneur de sortie

Fournir un dispositif pour situer la fibre à une distance fixe des ouvertures avec un dispositif tel qu'un microscope à vue latérale ou une caméra à réticule croisé. Il peut être suffisant de fournir uniquement un ajustement longitudinal si la fibre est contrainte dans le plan latéral par un dispositif tel qu'un plateau de maintien à vide.

### B.1.3 Dispositif optique de sortie

Utiliser un système optique, tel qu'une paire de lentilles, des miroirs ou un autre dispositif adapté, pour collecter toute la lumière transmise à travers les ouvertures, et la coupler au détecteur. Si un miroir est utilisé pour renvoyer la lumière au détecteur à travers l'ouverture, il convient de veiller à corriger tout effet de dégradé.

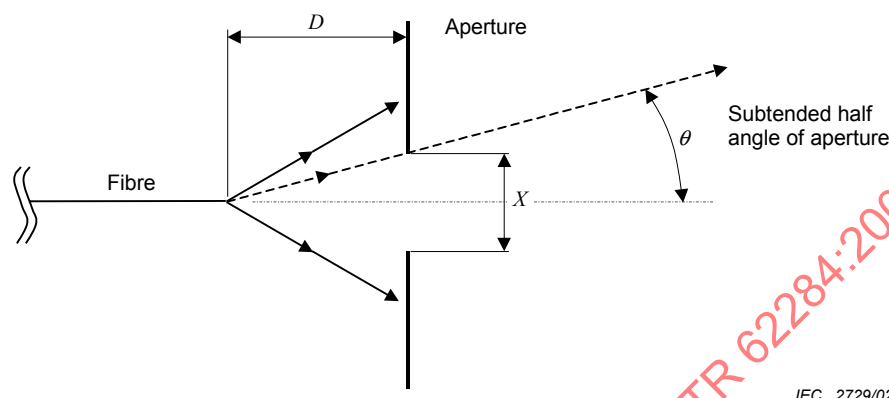
### B.1.4 Ensemble de détecteurs et électronique de détection de signaux

Utiliser un détecteur qui est sensible au diagramme de rayonnement de sortie sur la gamme de longueurs d'onde à mesurer et qui est linéaire sur la gamme des intensités rencontrées. Un système type pourrait inclure une photodiode au germanium ou GaInAsP fonctionnant dans le mode photovoltaïque, et un préamplificateur sensible au courant à détection synchrone par un amplificateur de blocage.

## B.2 Procédure

- Placer la fibre en essai dans l'appareillage d'alignement d'entrée et de sortie et effectuer l'ajustement en vue d'une distance correcte à l'ensemble d'ouverture (selon l'enregistrement réalisé au cours du montage en essai, voir B.1.1).
- Sélectionner une petite ouverture dans l'ensemble d'ouvertures et ajuster l'alignement transversal de champ lointain à ouverture pour une détection de puissance maximale. Mesurer et enregistrer cette puissance détectée en tant que  $P(\theta_i)$ .
- Sélectionner chacune des plus grandes ouvertures dans l'ensemble d'ouvertures et, pour chacune, mesurer et consigner la puissance détectée,  $P(\theta_i)$ .
- Répéter B.2c) pour chaque longueur d'onde de mesure spécifiée.
- Calculer l'aire efficace pour chaque longueur d'onde de mesure selon l'Article B.3.

As part of equipment set-up, carefully measure and record the longitudinal distance,  $D$ , between the fibre output end position and the aperture plane and the diameters,  $x_i$ , of each aperture. Determine the half-angle subtended by each aperture in the wheel and record these  $\theta_i$  ( $i=1$  to  $n$  in order of increasing aperture size) values for future calculations. These values are independent of test wavelength.



IEC 2729/02

**Figure B.2 – Apparatus set-up measurements**

### B.1.2 Output positioner

Provide a means to locate the fibre at a fixed distance from the apertures with a device such as a side-viewing microscope or camera with a crosshair. It may be sufficient to provide only longitudinal adjustment if the fibre is constrained in the lateral plane by a device such as a vacuum chuck.

### B.1.3 Output optics

Use an optical system, such as a pair of lenses, mirrors or other suitable arrangement, to collect all the light transmitted through the apertures, and to couple it to the detector. If a mirror is used to pass the light back through the aperture to the detector, care should be taken to correct for any vignetting effects.

### B.1.4 Detector assembly and signal detection electronic

Use a detector that is sensitive to the output radiation pattern over the range of wavelengths to be measured and that is linear over the range of intensities encountered. A typical system might include a germanium or GaInAsP photodiode operating in the photovoltaic mode, and a current-sensitive preamplifier with synchronous detection by a lock-in amplifier.

## B.2 Procedure

- Place the test fibre in the input and output alignment apparatus and adjust for correct distance to the aperture assembly (as recorded during the equipment set-up, see B.1.1).
- Select a small aperture in the aperture assembly and adjust the far-field-to-aperture transverse alignment for maximum detected power. Measure and record this detected power as  $P(\theta_i)$ .
- Select each of the larger apertures in the aperture assembly and, for each, measure and record the detected power,  $P(\theta_i)$ .
- Repeat B.2c) for each specified measurement wavelength.
- Calculate the effective area for each measurement wavelength according to Clause B.3.

### B.3 Calculs

Les calculs suivants sont un moyen d'effectuer les intégrations données à l'Article 6. D'autres méthodes peuvent être utilisées si elles sont au moins aussi précises que la méthode suivante.

Calculer les valeurs intermédiaires pour chaque ouverture.

Définir la valeur pour l'ouverture zéro:

$$v_0 = 0, P_{ff}(v_0) = 0, \rho(v_0) = 0 \quad (\text{B.1})$$

Calculer ce qui suit pour les ouvertures  $i=1$  à  $n$ :

$$v_i = D \tan(\theta_i) = \frac{x_i}{2}; \theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{2D}\right) \quad (\text{B.2})$$

$$\rho_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta_i) \quad (\text{B.3})$$

$$P_{ff,i} = \frac{P(v_i) - P(v_{i-1})}{\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2} \quad (\text{B.4})$$

NOTE Cette dérivée discrète peut être remplacée en adaptant les données à une courbe différenciable. L'Annexe G contient un exemple d'une telle routine d'adaptation.

Calculer le diagramme d'intensité en champ proche.

Utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (B.3) à titre d'exemple. Ce qui suit est donné à titre d'exemple. Il convient que toute autre méthode d'intégration soit au moins aussi précise.

Calculer l'intensité en champ proche,  $I(r_j)$ , pour une gamme de rayons,  $r_j$ , les valeurs s'étendant de zéro à une valeur assez large pour que l'intensité calculée au rayon maximal soit inférieure à 0,01 % de l'intensité maximale.

Si  $FF(\rho)$  est déterminée en calculant la dérivée discrète (équation (B.4)), utiliser cette formule:

$$I(r) = \left[ \left( \frac{1}{k} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{FF(\rho_i)} \cdot J_0\left(r_j \cdot \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2}\right) \cdot \frac{(\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2}\right)^2 / k^2}} \right]^2 \quad (\text{B.5a})$$

Si  $FF(\rho)$  est déterminée en adaptant les données brutes,  $P(v)$ , à une courbe différenciable, utiliser alors cette formule:

$$I(r) = \left[ \left( \frac{1}{k} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{\sqrt{FF(\rho_i)} + \sqrt{FF(\rho_{i-1})}}{2} \right) \cdot J_0\left(r_j \cdot \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2}\right) \cdot \frac{(\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2}\right)^2 / k^2}} \right]^2 \quad (\text{B.5b})$$

où  $\rho = k \sin \theta$  et  $k = 2\pi/\lambda$ .

NOTE Si des lobes latéraux sont observés, les signes des lobes impairs sont changés (référence au signe  $\pm$  de l'équation) avant intégration. (Voir l'Annexe F pour plus d'informations.)

### B.3 Calculations

The following calculations are one means of completing the integrations given in Clause 6. Other methods may be used if they are at least as accurate as the following.

Calculate intermediate values for each aperture.

Define value for aperture zero:

$$v_0 = 0, P_{ff}(v_0) = 0, \rho(v_0) = 0 \quad (\text{B.1})$$

Compute the following for apertures  $i=1$  to  $n$ :

$$v_i = D \tan(\theta_i) = \frac{x_i}{2}; \theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{2D}\right) \quad (\text{B.2})$$

$$\rho_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta_i) \quad (\text{B.3})$$

$$P_{ff_i} = \frac{P(v_i) - P(v_{i-1})}{\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2} \quad (\text{B.4})$$

NOTE This discrete derivative can be replaced by fitting the data to a differentiable curve. Annex G contains an example of one such fitting routine.

Calculate the near-field intensity pattern.

Use an appropriate numerical integration method to compute the integrals of equation (B.3). The following is an example. Any other integration method should be at least as accurate.

Calculate the near-field intensity,  $I(r_j)$ , for a range of radii,  $r_j$ , values ranging from zero to a value large enough that the computed intensity at the maximum radius is less than 0,01 % of the maximum intensity.

If  $FF(\rho)$  is determined by calculating the discrete derivative (equation (B.4)), use this form:

$$I(r) = \left[ \left( \frac{1}{k} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{FF(\rho_i)} \cdot J_0 \left( r_j \cdot \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2} \right) \cdot \frac{(\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2)}{\sqrt{1 - \left( \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2} \right)^2 / k^2}} \right]^2 \quad (\text{B.5a})$$

If  $FF(\rho)$  is determined by fitting the raw data,  $P(v)$ , to a differentiable curve, then use this form:

$$I(r) = \left[ \left( \frac{1}{k} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{\sqrt{FF(\rho_i)} + \sqrt{FF(\rho_{i-1})}}{2} \right) \cdot J_0 \left( r_j \cdot \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2} \right) \cdot \frac{(\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2)}{\sqrt{1 - \left( \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2} \right)^2 / k^2}} \right]^2 \quad (\text{B.5b})$$

where  $\rho = k \sin \theta$ , and  $k = 2\pi/\lambda$ .

NOTE If side lobes are observed, odd lobes are changed in sign (reference to  $\pm$  sign in equation) before integration. (See Annex F for more information)

Calculer les intégrales de l'équation (2).

Utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (2). Ce qui suit est donné à titre d'exemple. Il convient que toute autre méthode d'intégration soit au moins aussi précise.

$$T = \left[ \sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{B.6})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{B.7})$$

où  $\Delta r = r_1 - r_0$ .

NOTE Il convient de faire attention lors de la détermination du rayon maximal,  $r_m$ , étant donné que des erreurs dans l'intensité en champ proche calculée au niveau des grands rayons tendent à être assez significatives. L'utilisation d'un rayon maximal,  $r_m$ , correspondant à une intensité en champ proche de 0,01 % s'avère produire des valeurs  $A_{\text{eff}}$  avec une erreur au-dessous de 0,1 %. Si  $r_m$  trop grand est sélectionné, alors des erreurs significatives du résultat d' $A_{\text{eff}}$  peuvent survenir.

Effectuer le calcul:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{B.8})$$

Les données échantillons et les valeurs calculées sont fournies à l'Annexe D.

Compute the integrals of equation (2).

Use an appropriate numerical integration method to compute the integrals of equation (2). The following is an example. Any other integration method should be at least as accurate.

$$T = \left[ \sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{B.6})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{B.7})$$

where  $\Delta r = r_1 - r_0$ .

NOTE Caution should be taken when determining the maximum radius,  $r_m$ , since errors in the calculated near-field intensity at large radii tend to be quite significant. Using a maximum radius,  $r_m$ , corresponding to a near-field intensity of 0,01 % has been shown to produce  $A_{\text{eff}}$  values with error below 0,1 %. If  $r_m$  is chosen too large, then significant errors in the  $A_{\text{eff}}$  result can occur.

Complete the calculation:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{B.8})$$

Sample data and calculated values are provided in Annex D.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 62284:2003

## Annexe C

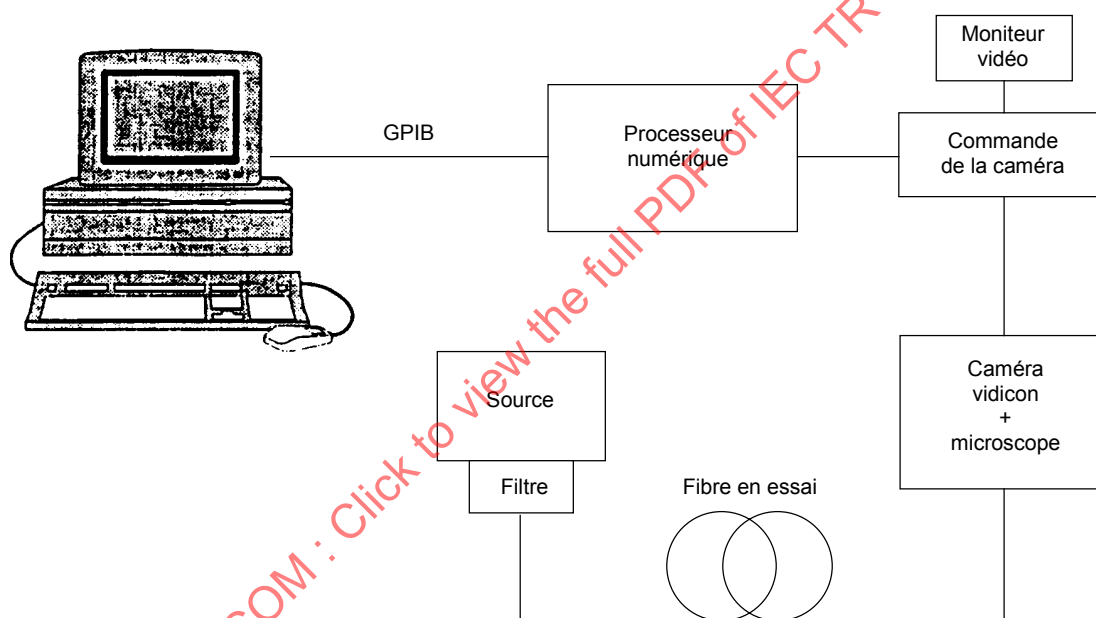
### Spécificité de mesure de la méthode du champ proche

#### C.0 Introduction

La présente annexe donne en détail l'appareillage, la procédure et le calcul pour la méthode du champ proche.

#### C.1 Appareillage

La Figure C.1 montre un montage d'essai type.



IEC 2730/02

Figure C.1 – Montage d'essai de la méthode du champ proche

##### C.1.1 Dispositif optique de sortie

Utiliser une lentille de champ plate qui a un facteur de grossissement uniforme, par exemple 40×, à travers son champ de vision.

##### C.1.2 Appareillage de positionnement

Monter solidement l'extrémité de fibre de sortie sur une plate-forme de micropositionneur à 3 axes. Il convient que la plate-forme ait un parcours suffisant pour permettre à l'extrémité de sortie de la fibre en essai d'être alignée dans le dispositif optique de sortie.

## Annex C

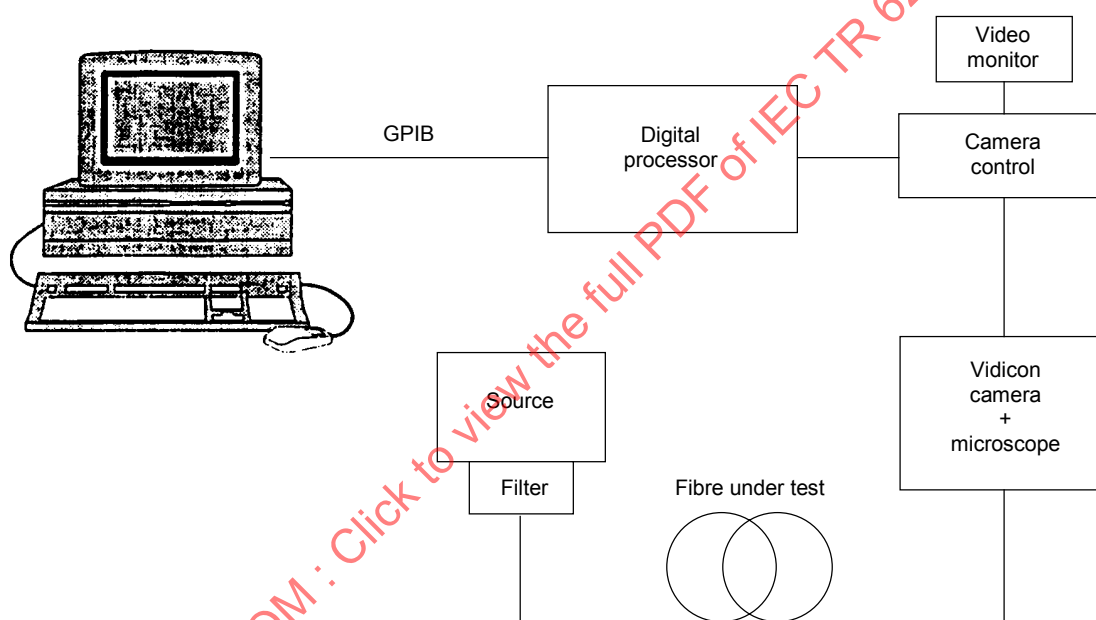
### Near-field method measurement specifics

#### C.0 Introduction

This annex documents the apparatus, procedure and calculation for the near-field method.

#### C.1 Apparatus

Figure C.1 shows a typical test set-up.



IEC 2730/02

Figure C.1 – Near-field method test set-up

##### C.1.1 Output optics

Use a flat field lens, which has a single uniform magnification factor, for example 40 $\times$ , across its field of view.

##### C.1.2 Positioning apparatus

Securely mount the output fibre end on a 3-axis micropositioner stage. The stage should have sufficient travel to allow the output end of the test fibre to be aligned in the output optics.

### C.1.3 Ensemble de détecteurs – électronique de détection de signaux

Utiliser un détecteur à tube vidicon infrarouge, groupage linéaire ou élément unique de transposition qui est sensible au rayonnement à infrarouge de la fibre en essai. Il convient que le dispositif de détection soit suffisamment linéaire pour obtenir des résultats précis indépendants des niveaux de puissance mesurés. De même, utiliser un moniteur TV conventionnel ou un oscilloscope pour aider à l'alignement et à la mise au point du diagramme en champ proche. Un système type peut également inclure un dispositif pour numériser des données vidéo ainsi qu'un ordinateur en vue des les traiter.

## C.2 Procédure

### C.2.1 Alignement d'éprouvette

Aligner la fibre en essai dans le système avec son extrémité de sortie focalisée sur l'ensemble de détecteur.

### C.2.2 Ajustement du niveau de puissance

Ajuster le niveau de puissance de la source optique pour assurer une réponse linéaire du détecteur.

### C.2.3 Acquisition de signaux

Le champ proche de la fibre est élargi et focalisé sur le plan du détecteur. Il convient que la sortie du signal détecté ou la sortie du détecteur à balayage soit ensuite numérisée en positions séparées de façon égale et traitée, en suivant la procédure décrite à l'Article C.3.

## C.3 Calcul

Les calculs suivants sont un moyen d'effectuer les intégrations données à l'Article 6. D'autres méthodes peuvent être utilisées si elles sont au moins aussi précises que la méthode suivante. Au lieu de replier les données, par exemple, un calcul du diamètre du MFD séparé pour les ensembles de données angulaires positifs et négatifs peut être effectué et moyenné en vue du résultat final.

### C.3.1 Calculer le centroïde

Pour une section donnée du diagramme en champ proche qui est d'une étendue maximale, avec des valeurs de position données par  $r_i$  et des valeurs d'intensité données en tant que  $I(r_i)$ , la position de centroïde,  $r_c$ , est donnée comme suit:

$$r_c = \frac{\sum r_i I(r_i)}{\sum I(r_i)} \quad (\text{C.1})$$

### C.3.2 Plier le profil d'intensité

Re-indexer les données d'intensité et de position autour de la position  $r_c$  de sorte que les positions du dessus aient des valeurs d'indice supérieures à zéro et les positions du dessous aient des valeurs d'indice inférieures à zéro. L'indice maximal est donné comme  $n$ . Le profil d'intensité plié est le suivant:

$$I_f(r_i) = (I(r_i) + I(r_{-i}))/2 \quad (\text{C.2})$$

### C.1.3 Detector assembly – signal detection electronics

Use an infrared vidicon tube, linear array or translating single element detector that is sensitive to infrared radiation from the test fibre. The detection device should be sufficiently linear to obtain accurate results independent of the power levels measured. Also, use a conventional TV monitor or oscilloscope to aid in the alignment and focusing of the near-field pattern. A typical system may also include a device to digitise video data together with a computer to process it.

## C.2 Procedure

### C.2.1 Specimen alignment

Align the test fibre in the system with its output end focused onto the detector assembly.

### C.2.2 Power level adjustment

Adjust the power level from the optical source to ensure a linear response of the detector.

### C.2.3 Signal acquisition

The near field of the fibre is enlarged and focused onto the plane of the detector. The detected signal or the scanning detector output should then be digitised in equally separated positions and processed, following the procedure described in Clause C.3.

## C.3 Calculation

The following calculations are one means of completing the integrations given in Clause 6. Other methods may be used if they are at least as accurate as the following. Instead of folding the data, for example, a separate MFD calculation for positive and negative angular data sets can be completed and then averaged for the final result.

### C.3.1 Calculate the centroid

For a given cross-section of the near-field pattern that is of maximum extent, with position values given by  $r_i$  and intensity values given as  $I(r_i)$ , the centroid position,  $r_c$ , is given as:

$$r_c = \frac{\sum r_i I(r_i)}{\sum I(r_i)} \quad (\text{C.1})$$

### C.3.2 Fold the intensity profile

Re-index the position and intensity data around the position  $r_c$  so that positions above have index values greater than zero and positions below have index values less than zero. The maximum index is given as  $n$ . The folded intensity profile is:

$$I_f(r_i) = (I(r_i) + I(r_{-i}))/2 \quad (\text{C.2})$$

### C.3.3 Calculer les intégrales à partir de l'équation (2)

Utiliser une méthode d'intégration numérique appropriée pour calculer les intégrales de l'équation (C.2). Ce qui suit est donné à titre d'exemple. Il convient que toute autre méthode d'intégration soit au moins aussi précise.

$$T = \left[ \sum_{j=0}^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{C.3})$$

$$B = \sum_{j=0}^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{C.4})$$

où

$$\Delta r = r_1 - r_0 ;$$

$m$  est le nombre de positions mesurées, déterminé par le rayon auquel l'intensité en champ proche calculée est au-dessous de 0,01 % (–20 dB) de la puissance d'intensité en champ proche maximale.

NOTE Il convient de faire attention lors de la détermination du rayon maximal,  $r_m$ , étant donné que des erreurs dans l'intensité en champ proche calculée au niveau des grands rayons tendent à être assez significatives. L'utilisation d'un rayon maximal,  $r_m$ , correspondant à une intensité en champ proche de 0,01 % s'avère produire des valeurs  $A_{\text{eff}}$  avec une erreur au-dessous de 0,1 %.

### C.3.4 Effectuer le calcul

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{C.5})$$

### C.3.3 Compute the integrals from equation (2)

Use an appropriate numerical integration method to compute the integrals of equation (C.2). The following is an example. Any other integration method should be at least as accurate.

$$T = \left[ \sum_0^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2 \quad (\text{C.3})$$

$$B = \sum_0^m I^2(r_j) r_j \Delta r \quad (\text{C.4})$$

where

$$\Delta r = r_1 - r_0;$$

$m$  is the number of positions measured, determined by the radius at which the calculated near-field intensity is below 0,01 % (–20 dB) of the maximum near-field intensity power.

NOTE Caution should be taken when determining the maximum radius,  $r_m$ , since errors in the calculated near-field intensity at large radii tend to be quite significant. Using a maximum radius  $r_m$ , corresponding to a near-field intensity is of 0,01 % has been shown to produce  $A_{\text{eff}}$  values with error below 0,1 %.

### C.3.4 Complete the calculation

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi T}{B} \quad (\text{C.5})$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 62284:2003

## Annexe D

### Données d'échantillons et calculs

#### D.1 Données provenant de la méthode A

Les Figures D.1 et D.2 montrent des valeurs mesurées et calculées contenues dans le Tableau D.1.

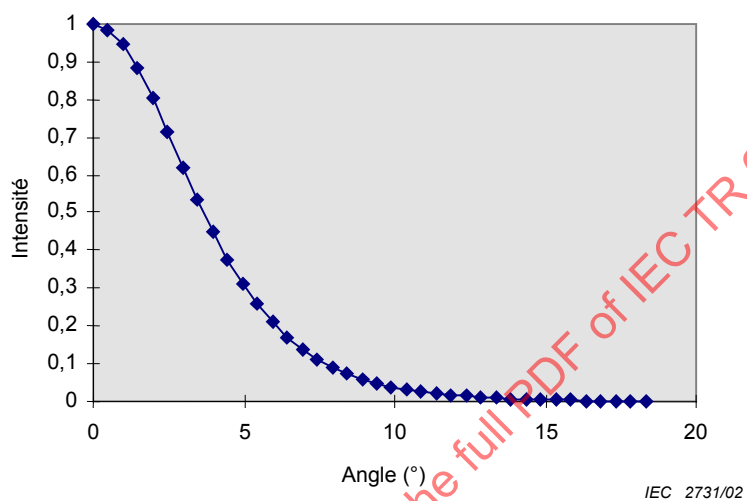


Figure D.1 – Intensité en champ lointain

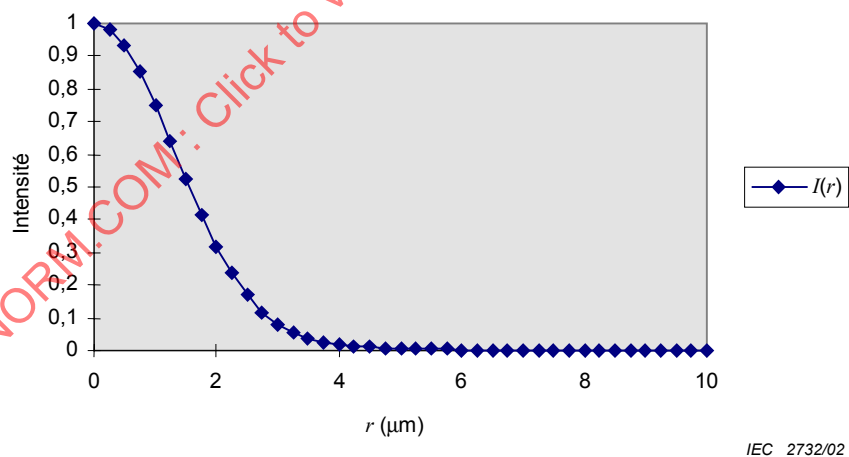


Figure D.2 – Intensité en champ proche

## Annex D

### Sample data and calculations

#### D.1 Data from method A

Figures D.1 and D.2 show measured and computed values contained in Table D.1.

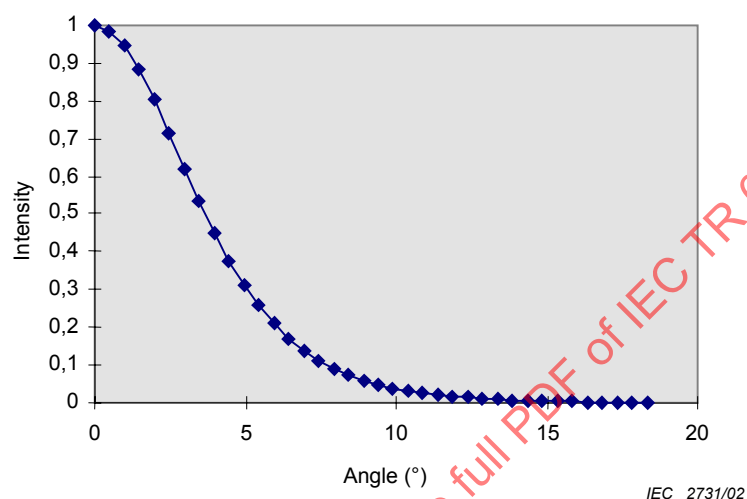


Figure D.1 – Far-field intensity

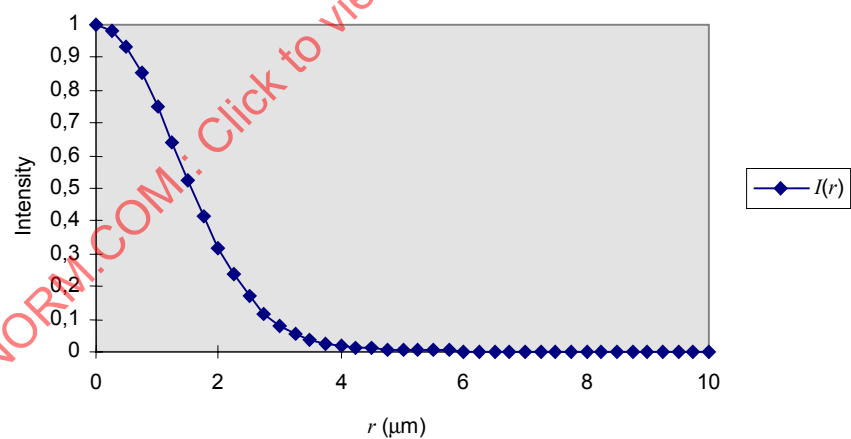


Figure D.2 – Near-field intensity

Tableau D.1 – Echantillons mesurés et données calculées

| Angle<br>degrés                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Puissance<br>du diagramme<br>du bas | Puissance<br>du diagramme<br>du haut | Puissance<br>moyenne | $r$<br>$\mu\text{m}$ | $I(r)/I(0)$<br>(avec intégration<br>rectangulaire) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------------------------|
| 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1                                   | 1                                    | 1                    | 0                    | 1                                                  |
| 0,495                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,98364                             | 0,98887                              | 0,986255             | 0,25                 | 0,982327521                                        |
| 0,99                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,93995                             | 0,94943                              | 0,94469              | 0,5                  | 0,931139317                                        |
| 1,485                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,87368                             | 0,88887                              | 0,881275             | 0,75                 | 0,851621737                                        |
| 1,98                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,79312                             | 0,8127                               | 0,80291              | 1                    | 0,751479862                                        |
| 2,475                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,70304                             | 0,72383                              | 0,713435             | 1,25                 | 0,639741699                                        |
| 2,97                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,61089                             | 0,63143                              | 0,62116              | 1,5                  | 0,52545214                                         |
| 3,465                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,52288                             | 0,54318                              | 0,53303              | 1,75                 | 0,416509292                                        |
| 3,96                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,44409                             | 0,45994                              | 0,452015             | 2                    | 0,3188416                                          |
| 4,455                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,37068                             | 0,38543                              | 0,378055             | 2,25                 | 0,236028993                                        |
| 4,95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,3052                              | 0,32225                              | 0,313725             | 2,5                  | 0,169363475                                        |
| 5,445                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,25107                             | 0,26589                              | 0,25848              | 2,75                 | 0,118253156                                        |
| 5,94                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,20588                             | 0,21644                              | 0,21116              | 3                    | 0,08081977                                         |
| 6,435                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,16774                             | 0,17565                              | 0,171695             | 3,25                 | 0,054531101                                        |
| 6,93                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,13626                             | 0,14273                              | 0,139495             | 3,5                  | 0,0367405                                          |
| 7,425                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,11069                             | 0,1159                               | 0,113295             | 3,75                 | 0,025059998                                        |
| 7,92                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,08967                             | 0,0943                               | 0,091985             | 4                    | 0,017551807                                        |
| 8,415                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,07245                             | 0,07648                              | 0,074465             | 4,25                 | 0,01276866                                         |
| 8,91                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,0586                              | 0,06157                              | 0,060085             | 4,5                  | 0,009697305                                        |
| 9,405                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,04741                             | 0,04952                              | 0,048465             | 4,75                 | 0,007661061                                        |
| 9,9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,03835                             | 0,03986                              | 0,039105             | 5                    | 0,006223053                                        |
| 10,395                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,03093                             | 0,03217                              | 0,03155              | 5,25                 | 0,005111174                                        |
| 10,89                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,02501                             | 0,02615                              | 0,02558              | 5,5                  | 0,004167789                                        |
| 11,385                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,02017                             | 0,02101                              | 0,02059              | 5,75                 | 0,003316726                                        |
| 11,88                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,01632                             | 0,01686                              | 0,01659              | 6                    | 0,002538078                                        |
| 12,375                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,01319                             | 0,01351                              | 0,01335              | 6,25                 | 0,001844957                                        |
| 12,87                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,01066                             | 0,01088                              | 0,01077              | 6,5                  | 0,001261637                                        |
| 13,365                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,00855                             | 0,00874                              | 0,008645             | 6,75                 | 0,000806043                                        |
| 13,86                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,00689                             | 0,00704                              | 0,006965             | 7                    | 0,000479981                                        |
| 14,355                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,00555                             | 0,00562                              | 0,005585             | 7,25                 | 0,000268184                                        |
| 14,85                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,00449                             | 0,00444                              | 0,004465             | 7,5                  | 0,000144232                                        |
| 15,345                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,00359                             | 0,00353                              | 0,00356              | 7,75                 | 7,92646E-05                                        |
| 15,84                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,00286                             | 0,00279                              | 0,002825             | 8                    | 4,92799E-05                                        |
| 16,335                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,00228                             | 0,0022                               | 0,00224              | 8,25                 | 3,84748E-05                                        |
| 16,83                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,00183                             | 0,00174                              | 0,001785             | 8,5                  | 3,84363E-05                                        |
| 17,325                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,00148                             | 0,00141                              | 0,001445             | 8,75                 | 4,49242E-05                                        |
| 17,82                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,00119                             | 0,00107                              | 0,00113              | 9                    | 5,46152E-05                                        |
| 18,315                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,00091                             | 0,00082                              | 0,000865             | 9,25                 | 6,35257E-05                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |                                      |                      | 9,5                  | 6,74716E-05                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |                                      |                      | 9,75                 | 6,3684E-05                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |                                      |                      | 10                   | 5,21955E-05                                        |
| <p>Longueur d'onde: 1 310 nm</p> <p>Intégration rectangulaire: <math>A_{\text{eff}} = 24,202 \mu\text{m}^2</math></p> <p>Intégration trapézoïdale: <math>A_{\text{eff}} = 24,564 \mu\text{m}^2</math></p> <p>Intégration de Simpson: <math>A_{\text{eff}} = 24,564 \mu\text{m}^2</math></p> <p>Utilisation de la fonction d'adaptation: <math>A_{\text{eff}} = 24,564 \mu\text{m}^2</math></p> |                                     |                                      |                      |                      |                                                    |

Table D.1 – Sample measured and calculated data

| Angle<br>degrees                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Bottom pattern<br>power | Top pattern<br>power | Average power | $r$<br>$\mu\text{m}$ | $I(r)/I(0)$<br>(with rectangular<br>integration) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1                       | 1                    | 1             | 0                    | 1                                                |
| 0,495                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,98364                 | 0,98887              | 0,986255      | 0,25                 | 0,982327521                                      |
| 0,99                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,93995                 | 0,94943              | 0,94469       | 0,5                  | 0,931139317                                      |
| 1,485                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,87368                 | 0,88887              | 0,881275      | 0,75                 | 0,851621737                                      |
| 1,98                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,79312                 | 0,8127               | 0,80291       | 1                    | 0,751479862                                      |
| 2,475                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,70304                 | 0,72383              | 0,713435      | 1,25                 | 0,639741699                                      |
| 2,97                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,61089                 | 0,63143              | 0,62116       | 1,5                  | 0,52545214                                       |
| 3,465                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,52288                 | 0,54318              | 0,53303       | 1,75                 | 0,416509292                                      |
| 3,96                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,44409                 | 0,45994              | 0,452015      | 2                    | 0,3188416                                        |
| 4,455                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,37068                 | 0,38543              | 0,378055      | 2,25                 | 0,236028993                                      |
| 4,95                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,3052                  | 0,32225              | 0,313725      | 2,5                  | 0,169363475                                      |
| 5,445                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,25107                 | 0,26589              | 0,25848       | 2,75                 | 0,118253156                                      |
| 5,94                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,20588                 | 0,21644              | 0,21116       | 3                    | 0,08081977                                       |
| 6,435                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,16774                 | 0,17565              | 0,171695      | 3,25                 | 0,054531101                                      |
| 6,93                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,13626                 | 0,14273              | 0,139495      | 3,5                  | 0,0367405                                        |
| 7,425                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,11069                 | 0,1159               | 0,113295      | 3,75                 | 0,025059998                                      |
| 7,92                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,08967                 | 0,0943               | 0,091985      | 4                    | 0,017551807                                      |
| 8,415                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,07245                 | 0,07648              | 0,074465      | 4,25                 | 0,01276866                                       |
| 8,91                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,0586                  | 0,06157              | 0,060085      | 4,5                  | 0,009697305                                      |
| 9,405                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,04741                 | 0,04952              | 0,048465      | 4,75                 | 0,007661061                                      |
| 9,9                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,03835                 | 0,03986              | 0,039105      | 5                    | 0,006223053                                      |
| 10,395                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,03093                 | 0,03217              | 0,03155       | 5,25                 | 0,005111174                                      |
| 10,89                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,02501                 | 0,02615              | 0,02558       | 5,5                  | 0,004167789                                      |
| 11,385                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,02017                 | 0,02101              | 0,02059       | 5,75                 | 0,003316726                                      |
| 11,88                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,01632                 | 0,01686              | 0,01659       | 6                    | 0,002538078                                      |
| 12,375                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,01319                 | 0,01351              | 0,01335       | 6,25                 | 0,001844957                                      |
| 12,87                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,01066                 | 0,01088              | 0,01077       | 6,5                  | 0,001261637                                      |
| 13,365                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,00855                 | 0,00874              | 0,008645      | 6,75                 | 0,000806043                                      |
| 13,86                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,00689                 | 0,00704              | 0,006965      | 7                    | 0,000479981                                      |
| 14,355                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,00555                 | 0,00562              | 0,005585      | 7,25                 | 0,000268184                                      |
| 14,85                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,00449                 | 0,00444              | 0,004465      | 7,5                  | 0,000144232                                      |
| 15,345                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,00359                 | 0,00353              | 0,00356       | 7,75                 | 7,92646E-05                                      |
| 15,84                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,00286                 | 0,00279              | 0,002825      | 8                    | 4,92799E-05                                      |
| 16,335                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,00228                 | 0,0022               | 0,00224       | 8,25                 | 3,84748E-05                                      |
| 16,83                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,00183                 | 0,00174              | 0,001785      | 8,5                  | 3,84363E-05                                      |
| 17,325                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,00148                 | 0,00141              | 0,001445      | 8,75                 | 4,49242E-05                                      |
| 17,82                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,00119                 | 0,00107              | 0,00113       | 9                    | 5,46152E-05                                      |
| 18,315                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,00091                 | 0,00082              | 0,000865      | 9,25                 | 6,35257E-05                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                         |                      |               | 9,5                  | 6,74716E-05                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                         |                      |               | 9,75                 | 6,3684E-05                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                         |                      |               | 10                   | 5,21955E-05                                      |
| Wavelength: 1 310 nm<br>Rectangular integration: $A_{\text{eff}} = 24,202 \mu\text{m}^2$<br>Trapezoidal integration: $A_{\text{eff}} = 24,564 \mu\text{m}^2$<br>Simpson's integration: $A_{\text{eff}} = 24,382 \mu\text{m}^2$<br>Use of fitting function: $A_{\text{eff}} = 24,388 \mu\text{m}^2$ |                         |                      |               |                      |                                                  |

## D.2 Données provenant de la méthode B

Longueur d'onde 1,30  $\mu\text{m}$

Distance 47 mm

$\Delta r$  0,05  $\mu\text{m}$

| Ouverture<br>Diamètre<br>mm | Puissance<br>détectée |
|-----------------------------|-----------------------|
| 1,2522                      | 0,5886                |
| 1,8440                      | 1,6074                |
| 2,3368                      | 2,2502                |
| 2,8372                      | 2,9563                |
| 3,4595                      | 4,4739                |
| 3,9243                      | 5,2504                |
| 5,0368                      | 7,4889                |
| 6,1265                      | 9,4223                |
| 7,2339                      | 10,9669               |
| 8,2918                      | 12,1419               |
| 9,3904                      | 13,0151               |
| 10,5740                     | 13,6526               |
| 11,7983                     | 14,2452               |
| 12,5603                     | 14,4612               |
| 13,7516                     | 14,7143               |
| 14,9555                     | 14,9045               |
| 17,7343                     | 15,1881               |
| 20,0939                     | 15,3234               |
| 23,2867                     | 15,4185               |
| 26,8122                     | 15,4614               |

$A_{\text{eff}}$  ( $\mu\text{m}^2$ ) 43,99

**D.2 Data from method B**

Wavelength      1,30  $\mu\text{m}$   
 Distance          47 mm  
 $\Delta r$                 0,05  $\mu\text{m}$

| Aperture<br>diameter<br>mm | Detected<br>power |
|----------------------------|-------------------|
| 1,2522                     | 0,5886            |
| 1,8440                     | 1,6074            |
| 2,3368                     | 2,2502            |
| 2,8372                     | 2,9563            |
| 3,4595                     | 4,4739            |
| 3,9243                     | 5,2504            |
| 5,0368                     | 7,4889            |
| 6,1265                     | 9,4223            |
| 7,2339                     | 10,9669           |
| 8,2918                     | 12,1419           |
| 9,3904                     | 13,0151           |
| 10,5740                    | 13,6526           |
| 11,7983                    | 14,2452           |
| 12,5603                    | 14,4612           |
| 13,7516                    | 14,7143           |
| 14,9555                    | 14,9045           |
| 17,7343                    | 15,1881           |
| 20,0939                    | 15,3234           |
| 23,2867                    | 15,4185           |
| 26,8122                    | 15,4614           |

$A_{\text{eff}}$  ( $\mu\text{m}^2$ )      43,99

## **Annexe E**

### **Comparaison entre le présent rapport technique et les recommandations UIT**

La recommandation UIT-T G.650 donne en détail la définition de l'aire efficace. L'annexe III de la recommandation UIT-T G.650 donne une relation entre l'aire efficace et le diamètre du champ de mode pour la fibre unimodale de classe IV. La formule de l'équation (1) est conforme à la relation donnée dans la recommandation UIT-T G.650.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 62284:2003

## **Annex E**

### **Comparison between this technical report and ITU recommendations**

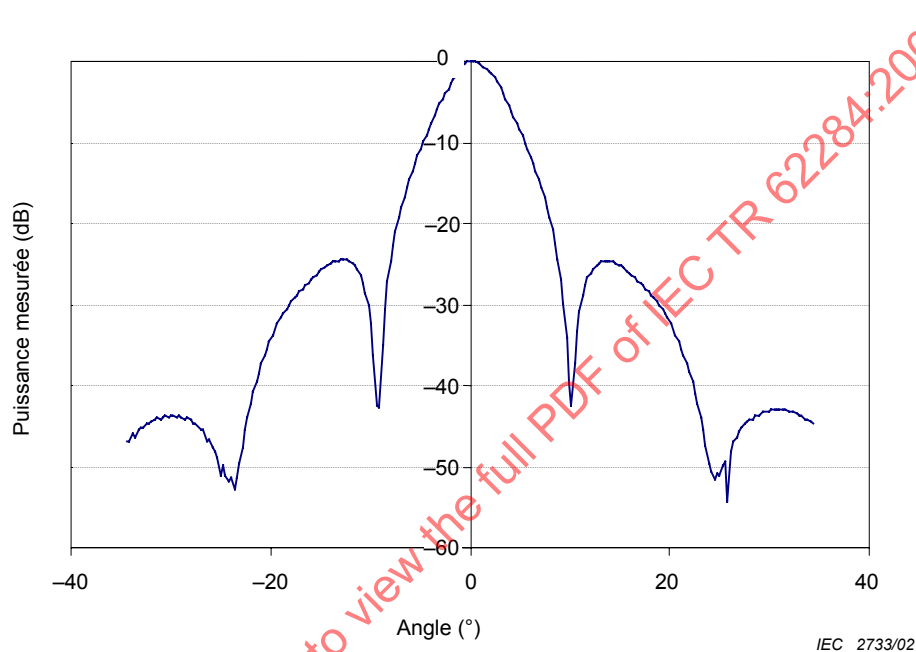
ITU-T Recommendation G.650 documents the definition of effective area. Appendix III of ITU-T Recommendation G.650 documents a relationship between effective area and mode field diameter for class IV single-mode fibre. The formula of equation (1) conforms to the relationship given in ITU-T Recommendation G.650.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 62284:2003

## Annexe F

### Traitement des lobes latéraux dans les données de champ lointain

Certains profils en champ lointain contiennent des lobes latéraux (voir la Figure F.1). Ces lobes sont un artefact du champ électrique,  $E$ , devenant négatif. La mesure de la puissance, qui est proportionnelle à  $E^2$ , demeure cependant toujours positive.



**Figure F.1 – Tracé de champ lointain type affichant des lobes latéraux**

Pour réaliser la transformée de l'équation (3), cependant, nous avons besoin d'utiliser le champ électrique,  $E$ , qui est égal à  $\pm P_{ff}^{1/2}$  si nous sommes attentifs à reconstruire le signe de  $E$ . Pour reconstruire celui-ci, nous avons besoin d'examiner le tracé en champ lointain et d'identifier les lobes impairs, qui correspondent au champ  $E$  négatif.

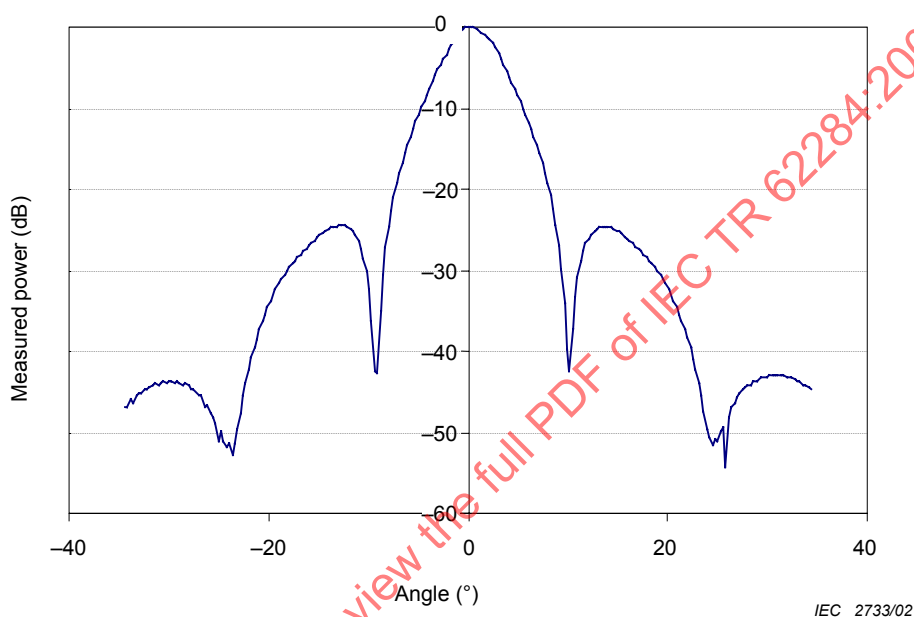
Les routines automatisées peuvent être conçues pour identifier ces lobes, mais il convient de les utiliser avec prudence étant donné qu'une mauvaise identification peut avoir un effet très significatif sur les calculs de  $A_{eff}$  (10 % ou plus). Il convient que toute routine automatisée n'identifie pas des fluctuations normales dans la puissance mesurée ou les caractéristiques de bruit comme des lobes.

Les lobes dans les données d'ouvertures variables sont plus difficiles à identifier, étant donné qu'il existe généralement peu de points de données.

## Annex F

### Treatment of side lobes in far-field data

Some far-field profiles contain side lobes (see Figure F.1). These lobes are an artifact of the electric field,  $E$ , becoming negative. The power measurement, which is proportional to  $E^2$ , however, always remains positive.



**Figure F.1 – Typical far-field plot displaying side lobes**

To perform the transform of equation (3), however, we need to use the electric field,  $E$ , which is equal to  $\pm P_{ff}^{1/2}$  if we are careful to reconstruct the sign of  $E$ . To reconstruct the sign, we need to examine the far-field plot and identify the odd lobes, which correspond to a negative  $E$  field.

Automated routines can be devised to identify these lobes but should be used cautiously since mis-identification can have a very large effect on  $A_{eff}$  calculations (10 % or more). Any automated routine should not identify normal fluctuations in the measured power or noise features as lobes.

Lobes in variable aperture data are more difficult to identify since there are typically few data points.

## Annexe G

### Méthode pour calculer l'aire efficace à partir des données d'ouvertures variables

#### G.0 Introduction

L'aire efficace d'une fibre unimodale est définie comme suit:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[ \int_0^{\infty} f^2(r) r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} f^4(r) r dr} \quad (\text{G.1})$$

où  $f(r)$  est le champ de mode fondamental de la fibre.

La méthode d'ouverture variable, décrite à l'Annexe B, est utilisée pour fournir des mesures de l'aire efficace de la fibre unimodale.

Dans la méthode d'ouverture variable, un calcul numérique significatif est nécessaire pour produire une approximation de l'aire efficace à partir des mesures du flux d'énergie à travers une série d'ouvertures de diamètre croissant. Idéalement, il convient que la procédure numérique utilisée pour convertir les mesures de flux d'énergie en une aire efficace n'engendre aucune erreur supplémentaire. Il convient que l'erreur dans l'aire efficace calculée reflète uniquement le bruit des mesures originales. Malheureusement, quelques-unes des techniques numériques suggérées de la méthode de mesure ne sont pas idéales. Par exemple, la méthode de mesure suggère qu'une dérivée nécessaire au calcul soit approchée en utilisant une formule à différence directe, qui a une importante erreur de troncature [1]<sup>1)</sup> et amplifie le bruit dans les données. De même, l'utilisation de différences directes fournit uniquement la dérivée d'un nombre fixe (et réduit) de points, qui limite la précision d'une intégration numérique subséquente. La méthode de mesure ne fournit pas une contingence pour des valeurs non physiques, négatives de la dérivée, qui peut provenir du bruit dans les données de flux d'énergie. Finalement, les résultats obtenus par A. Hallam [10] suggèrent que l'aire efficace calculée est sensible à la limite supérieure d'intégration choisie pendant l'évaluation numérique des intégrales dans l'équation (G.1).

Dans ce document, nous développons une nouvelle méthode pour évaluer l'aire efficace des données d'ouvertures variables qui, d'après nous, est proche de l'idéal. Du fait que ce document est destiné à être exhaustif, nous incluons un traitement des équations utilisées pour mettre en relation le flux d'énergie de l'ouverture mesurée à l'aire efficace.

#### G.1 Relation entre le champ de mode fondamental et le flux d'énergie d'ouverture

Soit  $P(\alpha)$  l'énergie électromagnétique mesurée circulant à travers une ouverture qui sous-tend un demi-angle  $\alpha$  à une distance perpendiculaire  $D$  à partir d'une face d'extrémité de fibre clivée, illustrée à la Figure G.1. Nous nous référons à  $P(\alpha)$  comme le flux d'énergie d'ouverture. Dans cet article, nous déduisons l'équation mettant en relation  $P(\alpha)$  avec le champ de mode fondamental  $f(r)$  dans la face d'extrémité de fibre.

1) Les chiffres entre crochets se réfèrent à l'Article G.5.

## Annex G

### Method for computing effective area from variable aperture data

#### G.0 Introduction

The effective area of a single-mode fibre is defined as follows:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[ \int_0^{\infty} f^2(r) r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} f^4(r) r dr} \quad (\text{G.1})$$

where  $f(r)$  is the fundamental mode field of the fibre.

The variable aperture method, described in Annex B, is used to provide measurements of the effective area of single-mode fibre.

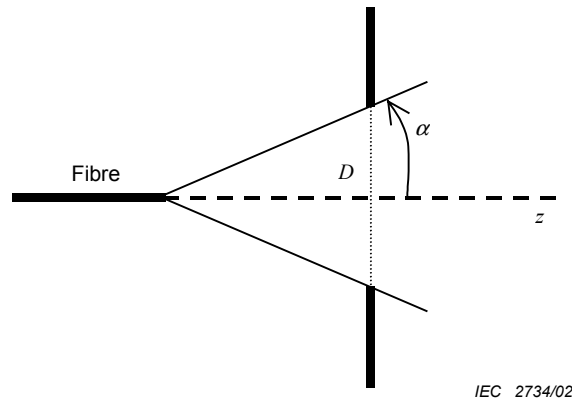
In the variable aperture method, significant numerical computation is required to produce an approximation to the effective area from measurements of the power flow through a series of apertures of increasing diameter. Ideally, the numerical procedure used to convert the power flow measurements to an effective area should not add any error. The error in the computed effective area should reflect only the noise in the original measurements. Unfortunately, some of the suggested numerical techniques in the measurement method are not ideal. For example, the measurement method suggests that a derivative needed in the computation be approximated using a forward-difference formula, which has a large truncation error [1]<sup>1)</sup> and amplifies noise in the data. Also, the use of forward differences only provides the derivative at a fixed (and small) number of points, which limits the accuracy of a succeeding numerical integration. The measurement method does not provide a contingency for unphysical, negative values of the derivative, which can arise from noise in the power flow data. Finally, results obtained by A. Hallam [10] suggest that the computed effective area is sensitive to the upper limit of integration chosen during the numerical evaluation of the integrals in equation (G.1).

In this document, we develop a new method to evaluate effective area from variable aperture data that we believe is close to ideal. Because this paper is intended to be comprehensive, we include a derivation of the equations used to relate measured aperture power flow to effective area.

#### G.1 Relationship between the fundamental mode field and the aperture power flow

Let  $P(\alpha)$  be the measured electromagnetic power flowing through an aperture that subtends a half-angle  $\alpha$  at a perpendicular distance  $D$  from a cleaved fibre endface, illustrated in Figure G.1. We refer to  $P(\alpha)$  as the aperture power flow. In this clause, we derive the equation relating  $P(\alpha)$  to the fundamental mode field  $f(r)$  in the fibre endface.

1) Figures in square brackets refer to Clause G.5.

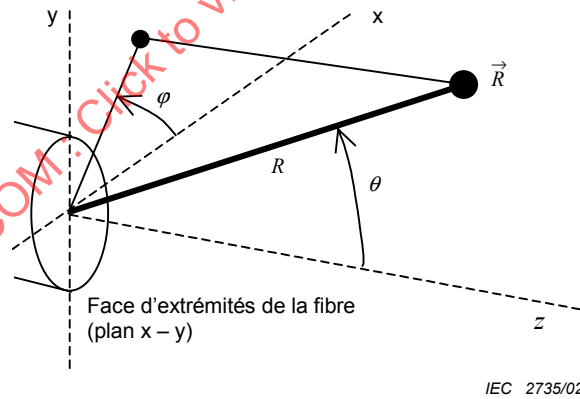


**Figure G.1 – Géométrie de mesure de la méthode d'ouverture variable**

Nous commençons par supposer que la théorie de diffraction scalaire [2] [4] est adéquate pour décrire le champ de rayonnement établi loin de la face d'extrémité de fibre. Dans cette approximation, le champ électromagnétique en ce point  $\vec{R}$  à l'extérieur de la fibre est caractérisé par une fonction scalaire  $\psi(\vec{R})$ , donnée par l'intégrale de diffraction de Rayleigh-Sommerfeld [5]. En particulier, l'énergie électromagnétique circulant à travers le point  $\vec{R}$  est

$$P_{sd}(\vec{R}) = |\psi(\vec{R})|^2$$

Pour évaluer  $\psi(\vec{R})$ , nous construisons un système de coordonnées sphériques dont l'origine est au centre de la face d'extrémité de fibre, illustrée à la Figure G.2.

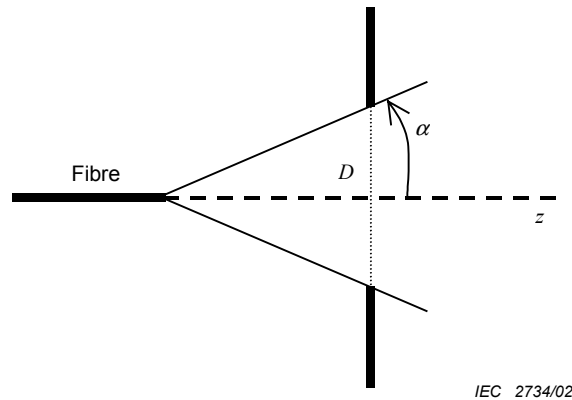


**Figure G.2 – Système de coordonnées utilisé pour évaluer le champ de diffraction**

Le champ de diffraction est ensuite donné par la référence [5].

$$\psi(\vec{R}) = \frac{k}{2\pi i} \int_{x-y \text{ plane}} \frac{e^{ik|\vec{R}-\vec{r}|}}{|\vec{R}-\vec{r}|^2} \hat{z} \cdot (\vec{R}-\vec{r}) f(\vec{r}) d\vec{r} \quad (\text{G.2})$$

où  $\vec{r}$  est un point dans le plan x-y,  $k = 2\pi/\lambda$ , et  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière se propageant dans la fibre. Soit  $r, \beta$  les coordonnées polaires du point  $\vec{r}$  dans le plan x-y, illustré à la Figure G.3.

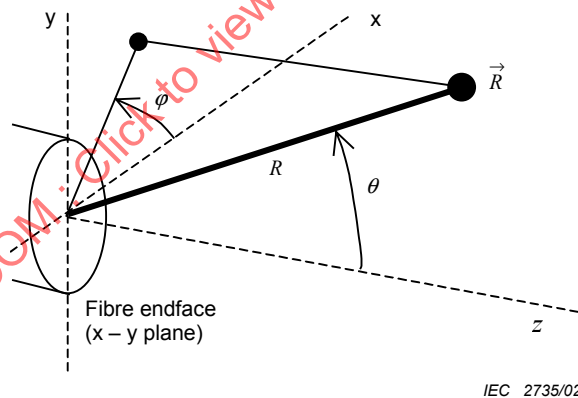


**Figure G.1 – Measurement geometry of the variable aperture method**

We begin by assuming that scalar diffraction theory [2] [4] is adequate to describe the radiation field established far from the fibre endface. In this approximation, the electromagnetic field at a point  $\vec{R}$  outside the fibre is characterised by a scalar function  $\psi(\vec{R})$ , given by the Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral [5]. In particular, the electromagnetic power flowing through the point  $\vec{R}$  is

$$P_{sd}(\vec{R}) = |\psi(\vec{R})|^2$$

To evaluate  $\psi(\vec{R})$ , we construct a spherical co-ordinate system with origin at the centre of the fibre endface, shown in Figure G.2.

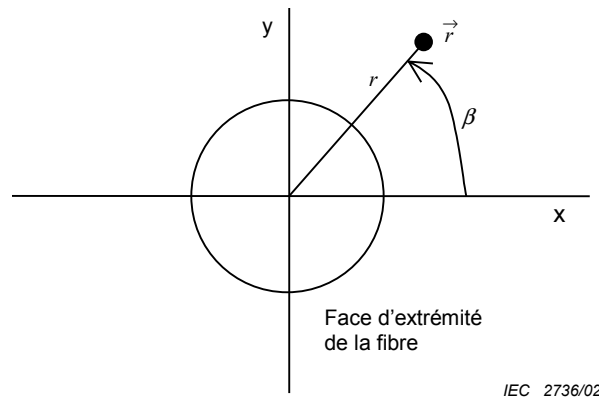


**Figure G.2 – Co-ordinate system used to evaluate the diffraction field**

The diffraction field is then given by reference [5].

$$\psi(\vec{R}) = \frac{k}{2\pi i} \int_{x-y \text{ plane}} \frac{e^{ik|\vec{R}-\vec{r}|}}{|\vec{R}-\vec{r}|^2} \hat{z} \cdot (\vec{R}-\vec{r}) f(\vec{r}) d\vec{r} \quad (\text{G.2})$$

where  $\vec{r}$  is a point in the x-y plane,  $k = 2\pi/\lambda$ , and  $\lambda$  is the wavelength of the light propagating in the fibre. Let  $r, \beta$  be polar co-ordinates of the point  $\vec{r}$  in the x-y plane, illustrated in Figure G.3.



**Figure G.3 – Coordonnées polaires de  $\vec{r}$**

Alors

$$\vec{R} - \vec{r} = (R \cos \varphi \sin \theta - r \cos \beta) \hat{x} + (R \sin \varphi \sin \theta - r \sin \beta) \hat{y} + R \cos \theta \hat{z} \quad (\text{G.3})$$

et l'équation (G.2) devient

$$\psi(\vec{R}) = \frac{kR \cos \theta}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{ik|\vec{R}-\vec{r}|}}{|\vec{R}-\vec{r}|^2} f(r) r dr d\beta \quad (\text{G.4})$$

Du fait que  $f(r)$  diminue rapidement pour  $r > \sim 10\lambda$ , seules les valeurs de  $r \leq \sim 10\lambda$  importent dans la fonction  $f$  à intégrer de (G.4). De même, il sera nécessaire d'évaluer (G.4) pour  $R \sim 10 \text{ mm}$ . Ainsi, nous pouvons supposer que  $r/R \ll 1$  dans la fonction  $f$  à intégrer de (G.4) et utiliser les approximations

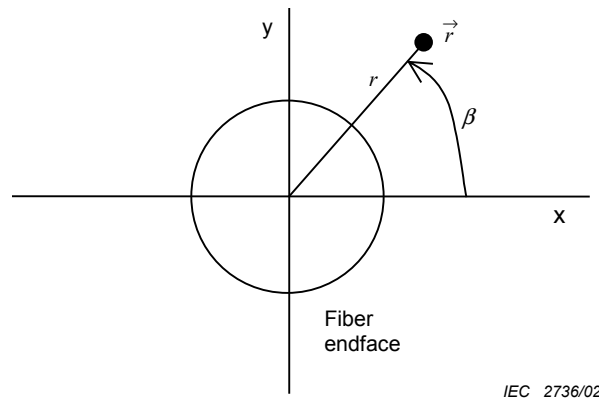
$$|\vec{R} - \vec{r}|^{-2} \approx \frac{1}{R^2} \left[ 1 + 2 \frac{r}{R} \sin \theta \cos(\beta - \varphi) \right] \quad (\text{G.5a})$$

$$|\vec{R} - \vec{r}| \approx R \left[ 1 - \frac{r}{R} \sin \theta \cos(\beta - \varphi) \right] \quad (\text{G.5b})$$

En remplaçant les équations (G.5a) et (G.5b) dans (G.4), on obtient:

$$\psi(\vec{R}) = \frac{k \cos \theta}{2\pi i} \frac{e^{ikR}}{R} \left[ \int_{-\varphi}^{2\pi-\varphi} \int_0^\infty \left\{ 1 + 2 \frac{r}{R} \sin \theta \cos \mu \right\} e^{-ikr \sin \theta \cos \mu} f(r) r dr d\mu \right] \quad (\text{G.6})$$

où l'on a introduit  $\mu = \beta - \varphi$ . Il n'est pas difficile de montrer à partir de l'équation (G.6) que  $\psi(\vec{R})$  est indépendant de  $\varphi$  (par exemple en démontrant que la dérivée partielle par rapport à  $\varphi$  de l'intégrale sur  $\mu$  disparaît). De ce fait, on peut choisir toute valeur convenable de  $\varphi$  à utiliser dans l'évaluation du côté droit de l'équation (G.6). En choisissant  $\varphi = 0$ , et en l'intégrant sur  $\mu$ , on trouve:



IEC 2736/02

**Figure G.3 – Polar co-ordinates of  $\vec{r}$** 

Then

$$\vec{R} - \vec{r} = (R \cos \varphi \sin \theta - r \cos \beta) \hat{x} + (R \sin \varphi \sin \theta - r \sin \beta) \hat{y} + R \cos \theta \hat{z} \quad (\text{G.3})$$

and equation (G.2) becomes

$$\psi(\vec{R}) = \frac{kR \cos \theta}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{ik|\vec{R}-\vec{r}|}}{|\vec{R}-\vec{r}|^2} f(r) r dr d\beta \quad (\text{G.4})$$

Because  $f(r)$  decreases rapidly for  $r > \sim 10\lambda$ , only values of  $r \leq \sim 10\lambda$  will be of importance in the integrand of equation (G.4). Also, we will only need to evaluate equation (G.4) for  $R \sim 10 \text{ mm}$ . Thus, we may assume  $r/R \ll 1$  in the integrand of equation (G.4) and use the approximations

$$|\vec{R} - \vec{r}|^{-2} \approx \frac{1}{R^2} \left[ 1 + 2 \frac{r}{R} \sin \theta \cos(\beta - \varphi) \right] \quad (\text{G.5a})$$

$$|\vec{R} - \vec{r}| \approx R \left[ 1 - \frac{r}{R} \sin \theta \cos(\beta - \varphi) \right] \quad (\text{G.5b})$$

Substituting equations (G.5a) and (G.5b) into (G.4), we obtain:

$$\psi(\vec{R}) = \frac{k \cos \theta}{2\pi i} \frac{e^{ikR}}{R} \left[ \int_{-\varphi}^{2\pi-\varphi} \int_0^{\infty} \left\{ 1 + 2 \frac{r}{R} \sin \theta \cos \mu \right\} e^{-ikr \sin \theta \cos \mu} f(r) r dr d\mu \right] \quad (\text{G.6})$$

where we have introduced  $\mu = \beta - \varphi$ . It is not difficult to show from equation (G.6) that  $\psi(\vec{R})$  is independent of  $\varphi$  (for example, by showing that the partial derivative with respect to  $\varphi$  of the integral over  $\mu$  vanishes). We may, therefore, choose any convenient value of  $\varphi$  to use in the evaluation of the right-hand side of equation (G.6). Choosing  $\varphi = 0$ , and integrating over  $\mu$ , we find

$$\psi(R, \theta) = \frac{k \cos \theta}{i} \frac{e^{ikR}}{R} \int_0^\infty \left[ J_0(rk \sin \theta) - 2i \frac{r}{R} \sin \theta J_1(rk \sin \theta) \right] f(r) r dr \quad (G.7)$$

où  $J_0$ ,  $J_1$  sont des fonctions de Bessel d'ordres 0 et 1, respectivement. Nous diminuons maintenant le terme impliquant  $r/R$  (qui est généralement  $\sim 10^{-3}$ ) pour arriver à

$$\psi(R, \theta) = \frac{k \cos \theta}{i} \frac{e^{ikR}}{R} \int_0^\infty J_0(rk \sin \theta) f(r) r dr \quad (G.8)$$

Nous définissons la transformée de Hankel de  $f(r)$  comme étant [6]

$$F(\rho) = \int_0^\infty J_0(r\rho) f(r) r dr \quad (G.9)$$

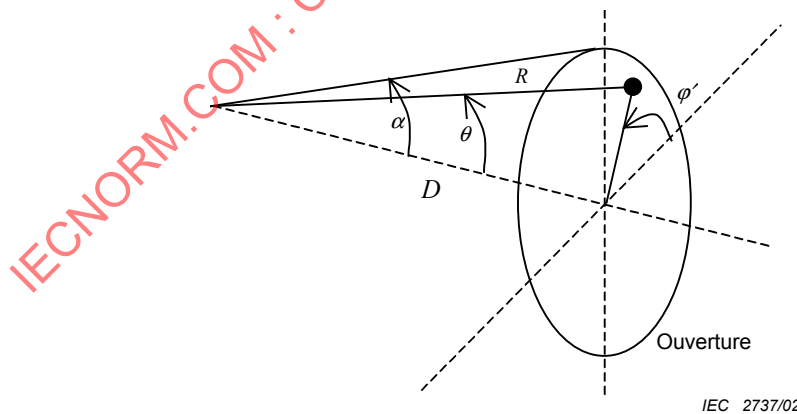
Alors

$$\psi(R, \theta) = \frac{k \cos \theta}{i} \frac{e^{ikR}}{R} F(k \sin \theta) \quad (G.10)$$

Le flux d'énergie d'ouverture est maintenant obtenu en intégrant  $|\psi(R, \theta)|^2$  sur l'ouverture:

$$P(\alpha) = k^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{D \tan \alpha} \frac{\cos^2 \theta(r')}{R^2(r')} F^2(k \sin \theta(r')) r' dr' d\phi' \quad (G.11)$$

où  $r', \phi'$  sont les coordonnées polaires d'un point dans l'ouverture, illustrées à la Figure G.4.



**Figure G.4 – Géométrie pour l'évaluation de l'équation (G.11)**

Nous intégrons l'équation (G.11) sur  $\phi'$ , et changeons les variables dans l'intégrale restante de  $r'$  à  $\theta$ . Du fait de  $r' = D \tan \theta$ , nous avons

$$r' dr' = D^2 \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} d\theta \quad (G.12)$$

$$\psi(R, \theta) = \frac{k \cos \theta}{i} \frac{e^{ikR}}{R} \int_0^\infty \left[ J_0(rk \sin \theta) - 2i \frac{r}{R} \sin \theta J_1(rk \sin \theta) \right] f(r) r dr \quad (\text{G.7})$$

where  $J_0$ ,  $J_1$  are Bessel functions of orders 0 and 1, respectively. We now drop the term involving  $r/R$  (which is typically  $\sim 10^{-3}$ ) to arrive at

$$\psi(R, \theta) = \frac{k \cos \theta}{i} \frac{e^{ikR}}{R} \int_0^\infty J_0(rk \sin \theta) f(r) r dr \quad (\text{G.8})$$

We define the Hankel transform of  $f(r)$  to be [6]

$$F(\rho) = \int_0^\infty J_0(r\rho) f(r) r dr \quad (\text{G.9})$$

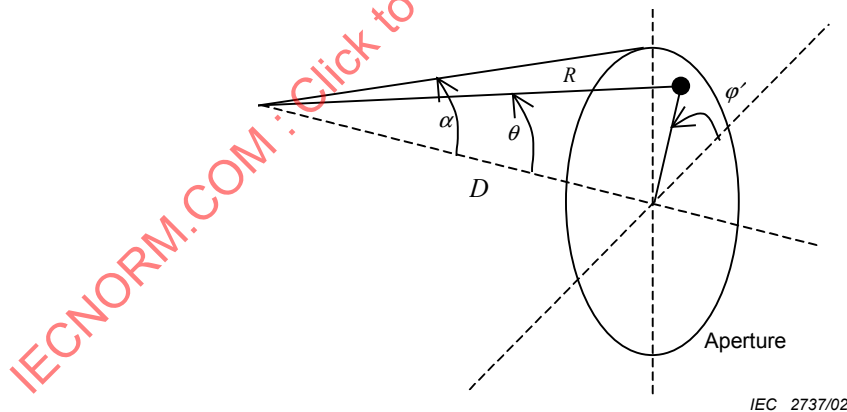
Then

$$\psi(R, \theta) = \frac{k \cos \theta}{i} \frac{e^{ikR}}{R} F(k \sin \theta) \quad (\text{G.10})$$

The aperture power flow is now obtained by integrating  $|\psi(R, \theta)|^2$  over the aperture:

$$P(\alpha) = k^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{D \tan \alpha} \frac{\cos^2 \theta(r')}{R^2(r')} F^2(k \sin \theta(r')) r' dr' d\phi' \quad (\text{G.11})$$

where  $r', \phi'$  are the polar co-ordinates of a point in the aperture, illustrated in Figure G.4.



**Figure G.4 – Geometry for the evaluation of equation (G.11)**

We integrate equation (G.11) over  $\phi'$ , and change variables in the remaining integral from  $r'$  to  $\theta$ . Because  $r' = D \tan \theta$ , we have

$$r' dr' = D^2 \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} d\theta \quad (\text{G.12})$$

Finalement, en notant que  $R = D / \cos \theta$ , nous obtenons

$$P(\alpha) = 2\pi k^2 \int_0^\alpha \cos \theta \sin \theta F^2(k \sin \theta) d\theta \quad (\text{G.13})$$

En différenciant l'équation (G.13) par rapport à  $\alpha$ , nous trouvons

$$\frac{dP}{d\alpha} = 2\pi k^2 \cos \alpha \sin \alpha F^2(k \sin \alpha) \quad (\text{G.14})$$

Nous revenons maintenant à la variable de transformée  $\rho = k \sin \alpha$ . A partir de la règle conjointe,

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\alpha} &= \frac{dP}{d\rho} \frac{d\rho}{d\alpha} = k \cos \alpha \frac{dP}{d\rho} = 2\pi k^2 \cos \alpha \sin \alpha F^2(k \sin \alpha) \\ &= 2\pi k \cos \alpha \rho F^2(\rho) \end{aligned} \quad (\text{G.15})$$

En résolvant la transformée de Hankel  $F(\rho)$ , nous trouvons

$$F(\rho) = \left[ \frac{1}{2\pi\rho} \frac{dP}{d\rho} \right]^{1/2} \quad (\text{G.16})$$

En inversant la transformée de Hankel [6], nous arrivons finalement à la relation désirée entre le flux d'énergie d'ouverture et le champ de mode fondamental:

$$f(r) = \int_0^{\rho_{\text{Max}}} J_0(r\rho) \left[ \frac{1}{2\pi\rho} \frac{dP}{d\rho} \right]^{1/2} \rho d\rho \quad (\text{G.17})$$

où nous avons supposé que  $F(\rho)$  est négligeable pour  $\rho > \rho_{\text{Max}}$ .

## G.2 Approximation numérique du champ de mode fondamental

En ayant établi la relation analytique entre le champ de mode fondamental et le flux d'énergie d'ouverture, nous développons maintenant une procédure numérique pour approcher le champ de mode d'un nombre fini de mesures du flux d'énergie d'ouverture. Supposons que  $P_i$  soit le flux de puissance d'ouverture mesuré à l'angle  $\alpha_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, M$ ). Nous définissons les variables de transformées correspondantes  $\rho_i = (2\pi / \lambda) \sin \alpha_i$ .

Le choix d'une méthode pour approcher  $f(r)$  de  $P_i$  est fortement guidé par la forme de l'équation (G.17). Nous avons besoin de réaliser une intégration numérique sur  $\rho$  pour obtenir le champ de mode. De ce fait, il convient que nous soyons capables d'évaluer la fonction  $f$  à intégrer de l'équation (G.17) à des valeurs arbitraires de  $\rho$ , de sorte que nous puissions réaliser cette quadrature avec une erreur arbitrairement réduite. Cette considération dicte que nous adaptions le  $P_i$  à une fonction analytique, qui nous permettra également de calculer la dérivée exactement dans l'équation (G.17). Sans erreur provenant de la différenciation ou de l'intégration subséquente, la seule erreur dans notre calcul proviendra de l'erreur dans l'adaptation des données à la fonction analytique que nous choisissons.

Finally, noting that  $R = D / \cos \theta$ , we obtain

$$P(\alpha) = 2\pi k^2 \int_0^\alpha \cos \theta \sin \theta F^2(k \sin \theta) d\theta \quad (\text{G.13})$$

Differentiating equation (G.13) with respect to  $\alpha$ , we find

$$\frac{dP}{d\alpha} = 2\pi k^2 \cos \alpha \sin \alpha F^2(k \sin \alpha) \quad (\text{G.14})$$

We now return to the transform variable  $\rho = k \sin \alpha$ . From the chain rule,

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\alpha} &= \frac{dP}{d\rho} \frac{d\rho}{d\alpha} = k \cos \alpha \frac{dP}{d\rho} = 2\pi k^2 \cos \alpha \sin \alpha F^2(k \sin \alpha) \\ &= 2\pi k \cos \alpha \rho F^2(\rho) \end{aligned} \quad (\text{G.15})$$

Solving for the Hankel transform  $F(\rho)$ , we find

$$F(\rho) = \left[ \frac{1}{2\pi \rho} \frac{dP}{d\rho} \right]^{1/2} \quad (\text{G.16})$$

Inverting the Hankel transform [6], we finally arrive at the desired relationship between the aperture power flow and the fundamental mode field:

$$f(r) = \int_0^{\rho_{\text{Max}}} J_0(r\rho) \left[ \frac{1}{2\pi \rho} \frac{dP}{d\rho} \right]^{1/2} \rho d\rho \quad (\text{G.17})$$

where we have assumed that  $F(\rho)$  is negligible for  $\rho > \rho_{\text{Max}}$ .

## G.2 Numerical approximation of the fundamental mode field

Having established the analytic relationship between the fundamental mode field and the aperture power flow, we now develop a numerical procedure to approximate the mode field from a finite number of measurements of the aperture power flow. Let  $P_i$  be the measured aperture power flow at the angle  $\alpha_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, M$ ). We define the corresponding transform variables  $\rho_i = (2\pi / \lambda) \sin \alpha_i$ .

The choice of a method to approximate  $f(r)$  from the  $P_i$  is strongly guided by the form of equation (G.17). We will need to perform a numerical integration over  $\rho$  to obtain the mode field. We should, therefore, be able to evaluate the integrand of equation (G.17) at arbitrary values of  $\rho$ , so that we can perform this quadrature with arbitrarily small error. This consideration dictates that we fit the  $P_i$  to an analytic function, which will also allow us to compute the derivative in equation (G.17) exactly. With no error arising from either the differentiation or the subsequent integration, the only error in our computation will arise from the error in the fit of the data to the analytic function we choose.

Bien sûr, la fonction  $f$  à intégrer de l'équation (G.17) est insignifiante si  $dP/d\rho < 0$ . D'où il convient que nous adaptions les données à une fonction qui est contrainte d'avoir une dérivée non négative. Cela est également clair à partir des considérations physiques: comme la largeur d'ouverture augmente, la quantité d'énergie circulant à travers celle-ci ne peut pas diminuer, donc il convient que le flux d'énergie d'ouverture soit une fonction sans diminution de la largeur d'ouverture  $\alpha$  (ou, de façon équivalente,  $\rho$ ). Des considérations physiques dictent également que  $P(\rho)$  disparaisse à  $\rho = 0$ , et nous aimerions que notre fonction d'adaptation possède cette propriété. Il semble raisonnable à partir de l'équation (G.15) d'exiger également que  $dP/d\rho$  disparaisse à

$$\rho = 0.$$

Ces contraintes étant présentes à l'esprit, nous choisissons d'adapter les données de flux de puissance à la série

$$P(\rho) = \sum_{j=1}^{N-1} c_j \int_0^{\rho} B_{j+1}^k(\rho') d\rho' \quad (\text{G.18})$$

où  $B_j^k(\rho)$  est la  $j^{\text{ème}}$  fonction  $B$ -spline d'ordre  $k$ , défini sur la séquence de nœuds

$$0 = \tau_1 = \dots = \tau_k < \tau_{k+1} < \dots < \tau_N < \tau_{N+1} = \dots = \tau_{N+k} = \rho_{\text{Max}} \quad (\text{G.19})$$

Une discussion de la définition et des propriétés des fonctions  $B$ -splines et de leurs intégrales n'entre pas dans le domaine d'application de ce rapport technique; le lecteur intéressé est invité à consulter la référence [7], qui contient aussi un ensemble de sous-programmes pour l'évaluation efficace des fonctions  $B$ -splines individuelles ou des séries de fonction  $B$ -splines. En différenciant l'équation (G.18), nous constatons que

$$\frac{dP}{d\rho} = \sum_{j=1}^{N-1} c_j B_{j+1}^k(\rho) \quad (\text{G.20})$$

Du fait que les fonctions  $B$ -splines sont non négatives, nous pouvons nous assurer que  $dP/d\rho \geq 0$  en exigeant que les coefficients des fonctions splines  $c_j$  dans l'équation (G.18) soient non négatifs. Il est également clair à partir de l'équation (G.18) que  $P(\rho = 0) = 0$  et du fait de notre choix de séquence de nœuds, et en l'absence de  $B_1^k$  de la série de l'équation (G.20), que  $dP/d\rho$  disparaîtra à  $\rho = 0$  [7].

Nous choisissons les coefficients de la fonction spline  $c_j$  en minimisant la somme des différences au carré entre le  $P_i$  et

$$P(\rho_i) = \sum_{j=1}^{N-1} c_j \int_0^{\rho_i} B_{j+1}^k(\rho') d\rho' \quad (\text{G.21})$$

soumis aux contraintes  $c_j \geq 0$ . Soit

$$E = \sum_{i=1}^M [P(\rho_i) - P_i]^2 = \sum_{i=1}^M \left[ \sum_{j=1}^{N-1} c_j B_{j+1}^k(\rho_i) - P_i \right]^2 \quad (\text{G.22})$$

Of course, the integrand of equation (G.17) is meaningless if  $dP/d\rho < 0$ . Hence, we should fit the data to a function that is constrained to have a nonnegative derivative. This is also clear from physical considerations: as the aperture width increases, the amount of power flowing through it cannot decrease, so the aperture power flow should be a non-decreasing function of the aperture width  $\alpha$  (or, equivalently,  $\rho$ ). Physical considerations also dictate that  $P(\rho)$  should vanish at  $\rho = 0$ , and we would like our fitting function to possess this property. It seems reasonable from equation (G.15) to also require that  $dP/d\rho$  vanish at

$$\rho = 0.$$

With these constraints in mind, we choose to fit the power flow data to the series

$$P(\rho) = \sum_{j=1}^{N-1} c_j \int_0^{\rho} B_{j+1}^k(\rho') d\rho' \quad (\text{G.18})$$

where  $B_j^k(\rho)$  is the  $j^{\text{th}}$   $B$ -spline of order  $k$ , defined on the knot sequence

$$0 = \tau_1 = \dots = \tau_k < \tau_{k+1} < \dots < \tau_N < \tau_{N+1} = \dots = \tau_{N+k} = \rho_{\text{Max}} \quad (\text{G.19})$$

A discussion of the definition and properties of  $B$ -splines and their integrals is beyond the scope of this technical report; the interested reader is urged to consult reference [7], which also contains a set of subroutines for the efficient evaluation of individual  $B$ -splines, or  $B$ -spline series. Differentiating equation (G.18), we see that

$$\frac{dP}{d\rho} = \sum_{j=1}^{N-1} c_j B_{j+1}^k(\rho) \quad (\text{G.20})$$

Because  $B$ -splines are nonnegative, we can ensure that  $dP/d\rho \geq 0$  by requiring the spline coefficients  $c_j$  in equation (G.18), to be nonnegative. It is also clear from equation (G.18) that  $P(\rho = 0) = 0$ , and because of our choice of the knot sequence, and the absence of  $B_1^k$  from the series of equation (G.20),  $dP/d\rho$  will vanish at  $\rho = 0$  [7].

We choose the spline coefficients  $c_j$  by minimising the sum of the squared differences between the  $P_i$  and

$$P(\rho_i) = \sum_{j=1}^{N-1} c_j \int_0^{\rho_i} B_{j+1}^k(\rho') d\rho' \quad (\text{G.21})$$

subject to the constraints  $c_j \geq 0$ . Let

$$E = \sum_{i=1}^M [P(\rho_i) - P_i]^2 = \sum_{i=1}^M \left[ \sum_{j=1}^{N-1} c_j I_{j+1}^k(\rho_i) - P_i \right]^2 \quad (\text{G.22})$$

où nous avons réglé

$$I_{j+1}^k(\rho) = \int_0^{\rho} B_{j+1}^k(\rho') d\rho' \quad (\text{G.23})$$

En développant le carré de l'équation (G.22), et en interchangeant l'ordre des diverses sommations, on trouve

$$E = \sum_{j=1}^{N-1} c_j \sum_{m=1}^{N-1} c_m \sum_{i=1}^M I_{j+1}^k(\rho_i) I_{m+1}^k(\rho_i) - 2 \sum_{j=1}^{N-1} c_j \sum_{i=1}^M P_i I_{j+1}^k(\rho_i) + \sum_{i=1}^M P_i^2 \quad (\text{G.24})$$

Nous définissons maintenant la matrice symétrique  $H$  avec des entrées

$$H_{jm} = \sum_{i=1}^M I_{j+1}^k(\rho_i) I_{m+1}^k(\rho_i) \quad (\text{G.25})$$

et le vecteur colonne  $g$  avec des composants

$$g_j = -2 \sum_{i=1}^M P_i I_{j+1}^k(\rho_i) \quad (\text{G.26})$$

Dans la notation de matrice, l'équation (G.24) devient

$$E = c^T H c + g^T c + a \quad (\text{G.27})$$

où  $c$  est un vecteur colonne à composants  $c_j$ , et l'exposant « $T$ » indique la transposition. La constante  $a$  dans l'équation (G.27) est

$$a = \sum_{i=1}^M P_i^2 \quad (\text{G.28})$$

La minimisation contrainte de l'équation (G.27) est un problème de programmation quadratique standard [8], avec une importante simplification: la matrice contrainte est égale à la matrice-identité. On utilise une méthode de réglage active [8] pour résoudre ce problème, modifiée pour bénéficier de la forme simple de la matrice de contrainte.

Nous n'avons pas encore abordé la sélection de la séquence de nœuds intérieure  $\tau_{k+1}, \dots, \tau_N$  qui définit les fonctions  $B$ -splines utilisées dans l'ajustement. Si les nœuds intérieurs sont sélectionnés pour satisfaire à la condition de Schoenberg-Whitney [7], alors la matrice  $H$  est définie positive, et les équations linéaires qui se présentent pendant les itérations de la méthode de réglage active sont non singulières. Cependant, il est préférable, selon nous, d'utiliser la séquence de nœuds intérieure

$$\tau_{k+i} = \rho_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (\text{G.29})$$

qui ne parvient pas à satisfaire à la condition de Schoenberg-Whitney. Au-delà de sa simplicité évidente, il existe une autre raison impérieuse d'effectuer ce choix. Les contraintes  $c_j \geq 0$  sont suffisantes pour garantir que  $dP/d\rho \geq 0$ , mais non nécessaires. En imposant ces contraintes excessivement sévères (mais très simples), nous nous retrouvons avec un ajustement qui n'est pas aussi souple qu'il le devrait. Notre choix de l'équation (G.29) restaure la souplesse en fournissant plus de termes dans la série de fonction  $B$ -spline que l'on utiliserait autrement dans un réglage par la méthode des moindres carrés.

where we have set

$$I_{j+1}^k(\rho) = \int_0^\rho B_{j+1}^k(\rho') d\rho' \quad (\text{G.23})$$

Expanding the square in equation (G.22), and interchanging the order of various summations, we find

$$E = \sum_{j=1}^{N-1} c_j \sum_{m=1}^{N-1} c_m \sum_{i=1}^M I_{j+1}^k(\rho_i) I_{m+1}^k(\rho_i) - 2 \sum_{j=1}^{N-1} c_j \sum_{i=1}^M P_i I_{j+1}^k(\rho_i) + \sum_{i=1}^M P_i^2 \quad (\text{G.24})$$

We now define the symmetric matrix  $H$  with entries

$$H_{jm} = \sum_{i=1}^M I_{j+1}^k(\rho_i) I_{m+1}^k(\rho_i) \quad (\text{G.25})$$

and the column vector  $g$  with components

$$g_j = -2 \sum_{i=1}^M P_i I_{j+1}^k(\rho_i) \quad (\text{G.26})$$

In matrix notation, equation (G.24) becomes

$$E = c^T H c + g^T c + a \quad (\text{G.27})$$

where  $c$  is a column vector with components  $c_j$ , and the superscript “ $T$ ” indicates the transpose. The constant  $a$  in equation (G.27) is

$$a = \sum_{i=1}^M P_i^2 \quad (\text{G.28})$$

The constrained minimisation of equation (G.27) is a standard quadratic programming problem [8], with an important simplification: the constraint matrix is equal to the identity matrix. We use an active set method [8] to solve this problem, modified to take advantage of the simple form of the constraint matrix.

We have not yet addressed the selection of the interior knot sequence  $\tau_{k+1}, \dots, \tau_N$  which defines the  $B$ -splines used in the fit. If the interior knots are chosen to satisfy the Schoenberg-Whitney condition [7], then the matrix  $H$  will be positive definite, and the linear equations that arise during the iterations of the active set method will be non-singular. However, we prefer to use the interior knot sequence

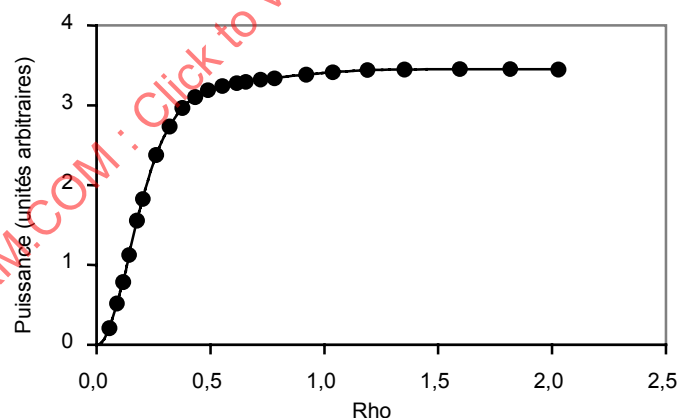
$$\tau_{k+i} = \rho_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (\text{G.29})$$

which fails to satisfy the Schoenberg-Whitney condition. Beyond its obvious simplicity, there is another compelling reason for this choice. The constraints  $c_j \geq 0$  are sufficient to guarantee that  $dP/d\rho \geq 0$ , but not necessary. By imposing these overly stringent (but very simple) constraints, we end up with a fit that is not as flexible as it could be. Our choice of equation (G.29) restores flexibility by providing more terms in the  $B$ -spline series than would otherwise be used in a least-square setting.

Du fait que l'équation (G.29) ne parvient pas à satisfaire à la condition de Schoenberg-Whitney, des systèmes singuliers d'équations linéaires se présentent pendant la solution du problème de programmation quadratique. Pour traiter cette condition, nous empruntons une technique astucieuse de deBoor [7]. La singularité des équations linéaires indique que les intégrales de la fonction  $B$ -spline  $I_j^k(\rho)$  utilisées dans l'ajustement ne sont pas linéairement indépendantes. Nous pouvons restaurer l'indépendance linéaire en réglant le coefficient de l'intégrale de la fonction  $B$ -spline dépendante à zéro, ce qui supprime effectivement cette fonction de l'ajustement. À savoir, si  $I_m^k$  est linéairement dépendante de  $I_j^k$ ,  $j = 1, \dots, m-1$ , alors nous réglons  $c_m$  à 0 et nous poursuivons la solution du problème de programmation quadratique. Il est particulièrement simple d'inclure cette procédure dans une méthode de réglage active: nous attribuons simplement  $c_m$  à l'ensemble des travaux [8]. Nous répétons ce procédé d'ajout de coefficients des intégraux de la fonction  $B$ -spline dépendants à l'ensemble des travaux jusqu'à ce que les équations linéaires qui en résultent soient non singulières. Il est également assez simple de déterminer quelles intégrales de la fonction  $B$ -spline sont linéairement dépendantes. Une décomposition de Cholesky [9] est tentée sur la matrice des équations linéaires qui se présentent pendant une itération de la méthode de réglage active. Si la décomposition ne parvient pas à l'étape  $m$ , alors  $I_m^k$  est linéairement dépendant de ses prédécesseurs.

Du fait que la mise en œuvre de ces modifications à la méthode de réglage active standard peut ne pas être claire pour le lecteur, nous incluons dans l'Annexe H une liste Fortran des sous-programmes qui réalisent la solution désirée du problème de programmation quadratique.

Les Figures G.5 et G.6 démontrent le résultat de la procédure d'ajustement à certaines données de flux d'énergie d'ouverture, en utilisant les fonctions  $B$ -splines d'ordre  $k = 3$ . La Figure G.5 est un résultat type. La ligne continue est l'ajustement et les cercles pleins indiquent les flux d'énergie mesurés.



IEC 2738/02

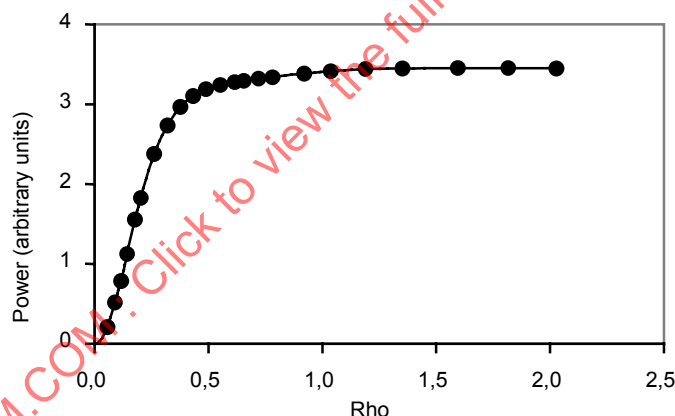
**Figure G.5 – Exemple de l'ajustement aux données de flux d'énergie d'ouverture**

L'erreur quadratique moyenne dans cet ajustement,  $\sqrt{E/M}$ , était  $5,82 \times 10^{-4}$ . Nous utilisons l'erreur quadratique moyenne en tant qu'outil de diagnostic. Lorsqu'elle dépasse  $\sim 0,005$ , nous supposons que les données de flux d'énergie sont trop bruyantes, et répétons la mesure de flux d'énergie.

Because equation (G.29) fails to satisfy the Schoenberg-Whitney condition, singular systems of linear equations will arise during the solution of the quadratic programming problem. To deal with this condition, we borrow a clever technique from deBoor [7]. Singularity in the linear equations indicates that the  $B$ -spline integrals  $I_j^k(\rho)$  used in the fit are not linearly independent. We can restore linear independence by setting the coefficient of the dependent  $B$ -spline integral to zero, which effectively removes this function from the fit. That is, if  $I_m^k$  is linearly dependent on the  $I_j^k$ ,  $j = 1, \dots, m-1$ , then we set  $c_m$  to 0 and proceed with the solution of the quadratic programming problem. It is particularly simple to incorporate this procedure into an active set method: we merely assign  $c_m$  to the working set [8]. We repeat this process of adding coefficients of dependent  $B$ -spline integrals to the working set until the linear equations that result are non-singular. It is also quite simple to determine which  $B$ -spline integrals are linearly dependent. A Cholesky decomposition [9] is attempted on the matrix of the linear equations that arise during an iteration of the active set method. If the decomposition fails at stage  $m$ , then  $I_m^k$  is linearly dependent on its predecessors.

Because the implementation of these modifications to the standard active set method may not be clear to the reader, we include in Annex H a Fortran listing of the subroutines that perform the desired solution of the quadratic programming problem.

Figures G.5 and G.6 demonstrate the result of the fitting procedure to some aperture power flow data, using  $B$ -splines of order  $k = 3$ . Figure G.5 is a typical result. The solid line is the fit, and the solid circles indicate the measured power flows.



IEC 2738/02

**Figure G.5 – Example of the fit to aperture power flow data**

The RMS error in this fit,  $\sqrt{EIM}$ , was  $5,82 \times 10^{-4}$ . We use the RMS error as a diagnostic tool. Whenever it exceeds  $\sim 0,005$ , we assume that the power flow data is too noisy, and repeat the power flow measurement.