

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

62226-2-1

Première édition
First edition
2004-11

**Exposition aux champs électriques ou
magnétiques à basse et moyenne fréquence –
Méthodes de calcul des densités de courant
induit et des champs électriques induits
dans le corps humain –**

**Partie 2-1:
Exposition à des champs magnétiques –
Modèles 2D**

**Exposure to electric or magnetic fields
in the low and intermediate frequency range –
Methods for calculating the current density
and internal electric field induced
in the human body –**

**Part 2-1:
Exposure to magnetic fields – 2D models**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 62226-2-1:2004

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)
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) 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 (www.iec.ch/online_news/justpub) 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
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)
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) 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 (www.iec.ch/online_news/justpub) 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
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

62226-2-1

Première édition
First edition
2004-11

**Exposition aux champs électriques ou
magnétiques à basse et moyenne fréquence –
Méthodes de calcul des densités de courant
induit et des champs électriques induits
dans le corps humain –**

**Partie 2-1:
Exposition à des champs magnétiques –
Modèles 2D**

**Exposure to electric or magnetic fields
in the low and intermediate frequency range –
Methods for calculating the current density
and internal electric field induced
in the human body –**

**Part 2-1:
Exposure to magnetic fields – 2D models**

© IEC 2004 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

XA

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	8
INTRODUCTION.....	12
1 Domaine d'application	14
2 Modèles analytiques	14
2.1 Généralités.....	14
2.2 Modèles analytiques de base pour les champs uniformes	16
3 Modèles numériques.....	18
3.1 Informations générales sur les modèles numériques.....	18
3.2 Modèles 2D – Approche générale	20
3.3 Conductivité des tissus vivants	22
3.4 Modèles 2D – Conditions des calculs numériques	24
3.5 Facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme	24
3.6 Modèles 2D – Résultats des calculs numériques	26
4 Validation des modèles.....	30
Annexe A (normative) Disque dans un champ uniforme	32
Annexe B (normative) Disque dans un champ créé par un fil de longueur infinie.....	38
Annexe C (normative) Disque dans un champ créé par 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés	54
Annexe D (normative) Disque dans un champ magnétique créé par une spire circulaire	76
Annexe E (informative) Approche simplifiée des phénomènes électromagnétiques	100
Annexe F (informative) Calcul analytique du champ magnétique créé par des systèmes simples d'induction: 1 fil, 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et 1 spire circulaire	104
Annexe G (informative) Equations et modèles numériques pour les phénomènes électromagnétiques dans une structure type: disque conducteur dans un champ électromagnétique	108
Bibliographie	112
Figure 1 – Disque conducteur dans une densité de flux magnétique uniforme	16
Figure 2 – Maillage par éléments finis (triangles d'ordre 2) d'un disque, et détail.....	20
Figure 3 – Disque conducteur dans une densité de flux magnétique non uniforme.....	22
Figure 4 – Variation du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K avec la distance à la source, pour les trois types de sources de champ magnétique (rayon du disque $R = 100$ mm)	28
Figure A.1 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque	32
Figure A.2 – $J = f[r]$: Distribution ponctuelle de la densité de courant induit calculée le long d'un diamètre d'un disque homogène dans un champ magnétique uniforme.....	34
Figure A.3 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long d'un diamètre d'un disque homogène dans un champ magnétique uniforme.....	36
Figure B.1 – Disque dans le champ magnétique créé par un fil rectiligne infini	38
Figure B.2 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (<i>source: 1 fil, situé à $d = 10$ mm du bord du disque</i>)	40

CONTENTS

FOREWORD.....	9
INTRODUCTION.....	13
1 Scope	15
2 Analytical models	15
2.1 General.....	15
2.2 Basic analytical models for uniform fields	17
3 Numerical models.....	19
3.1 General information about numerical models.....	19
3.2 2D models – General approach.....	21
3.3 Conductivity of living tissues	23
3.4 2D Models – Computation conditions	25
3.5 Coupling factor for non-uniform magnetic field.....	25
3.6 2D Models – Computation results.....	27
4 Validation of models	31
Annex A (normative) Disk in a uniform field	33
Annex B (normative) Disk in a field created by an infinitely long wire.....	39
Annex C (normative) Disk in a field created by 2 parallel wires with balanced currents	55
Annex D (normative) Disk in a magnetic field created by a circular coil	77
Annex E (informative) Simplified approach of electromagnetic phenomena.....	101
Annex F (informative) Analytical calculation of magnetic field created by simple induction systems: 1 wire, 2 parallel wires with balanced currents and 1 circular coil.....	105
Annex G (informative) Equation and numerical modelling of electromagnetic phenomena for a typical structure: conductive disk in electromagnetic field.....	109
Bibliography	113
Figure 1 – Conducting disk in a uniform magnetic flux density.....	17
Figure 2 – Finite elements meshing (2 nd order triangles) of a disk, and detail	21
Figure 3 – Conducting disk in a non-uniform magnetic flux density.....	23
Figure 4 – Variation with distance to the source of the coupling factor for non-uniform magnetic field, K , for the three magnetic field sources (disk radius $R = 100$ mm).....	29
Figure A.1 – Current density lines J and distribution of J in the disk	33
Figure A.2 – $J = f[r]$: Spot distribution of induced current density calculated along a diameter of a homogeneous disk in a uniform magnetic field.....	35
Figure A.3 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along a diameter of a homogeneous disk in a uniform magnetic field.....	37
Figure B.1 – Disk in the magnetic field created by an infinitely straight wire	39
Figure B.2 – Current density lines J and distribution of J in the disk (<i>source: 1 wire, located at $d = 10$ mm from the edge of the disk</i>).....	41

Figure B.3 – Distribution ponctuelle de la densité de courant induit le long du diamètre AA du disque (source: 1 fil, situé à $d = 10$ mm du bord du disque).....	40
Figure B.4 – Distribution de la densité intégrée de courant induit le long du diamètre AA du disque (source: 1 fil, situé à $d = 10$ mm du bord du disque).....	42
Figure B.5 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (source: 1 fil, situé à $d = 100$ mm du bord du disque)	42
Figure B.6 – Distribution de la densité intégrée de courant induit le long du diamètre AA du disque (source: 1 fil, situé à $d = 100$ mm du bord du disque).....	44
Figure B.7 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm).....	46
Figure B.8 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm).....	48
Figure B.9 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200$ mm).....	50
Figure B.10 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200$ mm).....	52
Figure C.1 – Disque conducteur dans un champ magnétique créé par 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés	54
Figure C.2 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, séparés par 5 mm, situés à $d = 7,5$ mm du bord du disque)	56
Figure C.3 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long du diamètre AA du disque (source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, situés à $d = 7,5$ mm du bord du disque).....	56
Figure C.4 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, séparés par 5 mm, situés à $d = 97,5$ mm du bord du disque)	58
Figure C.5 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long du diamètre AA du disque (source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, séparés par 5 mm, situés à $d = 97,5$ mm du bord du disque)	58
Figure C.6 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 100$ mm)	60
Figure C.7 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 100$ mm)	64
Figure C.8 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 200$ mm)	68
Figure C.9 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 200$ mm)	72
Figure D.1 – Disque conducteur dans un champ magnétique créé par une spire.....	76
Figure D.2 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (source: spire de rayon $r = 50$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm).....	78
Figure D.3 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long du diamètre AA du disque (source: spire de rayon $r = 50$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm).....	78
Figure D.4 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (source: spire de rayon $r = 200$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm).....	80

Figure B.3 – Spot distribution of induced current density along the diameter AA of the disk (source: 1 wire, located at $d = 10$ mm from the edge of the disk)	41
Figure B.4 – Distribution of integrated induced current density along the diameter AA of the disk (source: 1 wire, located at $d = 10$ mm from the edge of the disk)	43
Figure B.5 – Current density lines J and distribution of J in the disk (source: 1 wire, located at $d = 100$ mm from the edge of the disk)	43
Figure B.6 – Distribution of integrated induced current density along the diameter AA of the disk (source: 1 wire, located at $d = 100$ mm from the edge of the disk)	45
Figure B.7 – Parametric curve of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)	47
Figure B.8 – Parametric curve of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)	49
Figure B.9 – Parametric curve of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)	51
Figure B.10 – Parametric curve of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)	53
Figure C.1 – Conductive disk in the magnetic field generated by 2 parallel wires with balanced currents	55
Figure C.2 – Current density lines J and distribution of J in the disk (source: 2 parallel wires with balanced currents, separated by 5 mm, located at $d = 7,5$ mm from the edge of the disk)	57
Figure C.3 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk (source: 2 parallel wires with balanced currents, separated by 5 mm, located at $d = 7,5$ mm from the edge of the disk)	57
Figure C.4 – Current density lines J and distribution of J in the disk (source: 2 parallel wires with balanced currents separated by 5 mm, located at $d = 97,5$ mm from the edge of the disk)	59
Figure C.5 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk (source: 2 parallel wires with balanced currents separated by 5 mm, located at $d = 97,5$ mm from the edge of the disk)	59
Figure C.6 – Parametric curves of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 100$ mm)	61
Figure C.7 – Parametric curves of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 100$ mm)	65
Figure C.8 – Parametric curves of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 200$ mm)	69
Figure C.9 – Parametric curves of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 200$ mm)	73
Figure D.1 – Conductive disk in a magnetic field created by a coil	77
Figure D.2 – Current density lines J and distribution of J in the disk (source: coil of radius $r = 50$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	79
Figure D.3 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk (source: coil of radius $r = 50$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	79
Figure D.4 – Current density lines J and distribution of J in the disk (source: coil of radius $r = 200$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	81

Figure D.5– $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long du diamètre AA du disque (source: spire de rayon $r = 200$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	80
Figure D.6 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (source: spire de rayon $r = 10$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	82
Figure D.7 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long du diamètre AA du disque (source: spire de rayon $r = 10$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	82
Figure D.8 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en une spire et pour différents rayons de spire r (disque homogène $R = 100$ mm)	84
Figure D.9 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en une spire et pour différents rayons de spire r (disque homogène $R = 100$ mm)	88
Figure D.10 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en une spire et pour différents rayons de spire r (disque homogène $R = 200$ mm)	92
Figure D.11 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en une spire et pour différents rayons de spire r (disque homogène $R = 200$ mm)	96
Tableau 1 – Valeurs numériques du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K pour différents types de sources de champ magnétique, à différentes distances entre les sources et le disque conducteur ($R = 100$ mm)	30
Tableau B.1 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm)	46
Tableau B.2 – Valeur numérique du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm)	48
Tableau B.3 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200$ mm)	50
Tableau B.4 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200$ mm)	52
Tableau C.1 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 100$ mm)	62
Tableau C.2 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 100$ mm)	66
Tableau C.3 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 200$ mm)	70
Tableau C.4 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 200$ mm)	74
Tableau D.1 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en une spire (disque homogène $R = 100$ mm)	86
Tableau D.2 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en une spire (disque homogène $R = 100$ mm)	90
Tableau D.3 – Valeurs numériques de facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en une spire (disque homogène $R = 200$ mm)	94
Tableau D.4 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en une spire (disque homogène $R = 200$ mm)	98

Figure D.5 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk (source: coil of radius $r = 200$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	81
Figure D.6 – Current density lines J and distribution of J in the disk (source: coil of radius $r = 10$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	83
Figure D.7 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk (source: coil of radius $r = 10$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)	83
Figure D. 8 – Parametric curves of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of a coil and for different coil radius r (homogeneous disk $R = 100$ mm)	85
Figure D.9 – Parametric curves of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of a coil and for different coil radius r (homogeneous disk $R = 100$ mm)	89
Figure D.10 – Parametric curves of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of a coil and for different coil radius r (homogeneous disk $R = 200$ mm)	93
Figure D.11 – Parametric curves of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of a coil and for different coil radius r (homogeneous disk $R = 200$ mm)	97
Table 1 – Numerical values of the coupling factor for non-uniform magnetic field K for different types of magnetic field sources, and different distances between sources and conductive disk ($R = 100$ mm)	31
Table B.1 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)	47
Table B.2 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)	49
Table B.3 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)	51
Table B.4 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)	53
Table C.1 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents (homogeneous disk: $R = 100$ mm)	63
Table C.2 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents (homogeneous disk: $R = 100$ mm)	67
Table C.3 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents (homogeneous disk: $R = 200$ mm)	71
Table C.4 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents (homogeneous disk: $R = 200$ mm)	75
Table D.1 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of a coil (homogeneous disk: $R = 100$ mm)	87
Table D.2 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of a coil (homogeneous disk: $R = 100$ mm)	91
Table D.3 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of a coil (homogeneous disk: $R = 200$ mm)	95
Table D.4 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of a coil (homogeneous disk: $R = 200$ mm)	99

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

EXPOSITION AUX CHAMPS ÉLECTRIQUES OU MAGNÉTIQUES À BASSE ET MOYENNE FRÉQUENCE – MÉTHODES DE CALCUL DES DENSITÉS DE COURANT INDUIT ET DES CHAMPS ÉLECTRIQUES INDUITS DANS LE CORPS HUMAIN –

Partie 2-1: Exposition à des champs magnétiques – Modèles 2D

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). 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 de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 62226-2-1 a été établie par le comité technique 106: Méthodes d'évaluation des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques en relation avec l'exposition humaine.

La présente Partie 2-1 doit être utilisée conjointement avec la première édition de la CEI 62226-1:2004, *Exposition aux champs électriques ou magnétiques à basse et moyenne fréquence – Méthodes de calcul des densités de courant induit et des champs électriques induits dans le corps humain – Partie 1: Généralités.*

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**EXPOSURE TO ELECTRIC OR MAGNETIC FIELDS
IN THE LOW AND INTERMEDIATE FREQUENCY RANGE –
METHODS FOR CALCULATING THE CURRENT DENSITY
AND INTERNAL ELECTRIC FIELD INDUCED IN THE HUMAN BODY –****Part 2-1: Exposure to magnetic fields –
2D models**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of 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, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). 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. 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 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 IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62226-2-1 has been prepared by IEC technical committee 106: Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure.

This Part 2-1 is intended to be used in conjunction with the first edition of IEC 62226-1:2004, *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 1: General*.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
106/79/FDIS	106/83/RVD

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

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

La présente Norme internationale constitue la Partie 2-1 de la série CEI 62226, qui regroupera un certain nombre de normes internationales et rapports techniques dans le domaine du calcul des densités de courant induit et des champs électriques internes induits et sera publiée sous le titre général *Exposition aux champs électriques ou magnétiques à basse et moyenne fréquence – Méthodes de calcul des densités de courant induit et des champs électriques induits dans le corps humain*

Il est prévu de publier cette série selon la structure suivante:

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Exposition à des champs magnétiques
 - Partie 2-1: Modèles 2D
 - Partie 2-2: Modèles 3D
 - Partie 2-3: Lignes directrices pour l'utilisation pratique des facteurs de couplage
- Partie 3: Exposition à des champs électriques
 - Partie 3-1: Modèles analytiques et numériques 2D
 - Partie 3-2: Modèles numériques 3D
- Partie 4: Paramètres électriques des tissus humains vivants (Rapport technique)

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous «<http://webstore.iec.ch>» dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

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

FDIS	Report on voting
106/79/FDIS	106/83/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

This International Standard constitutes Part 2-1 of IEC 62226 series, which will regroup several international standards and technical reports within the framework of the calculation of induced current densities and internal electric fields, and will be published under the general title of *Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body*.

This series is planned to be published according to the following structure:

- Part 1: General
- Part 2: Exposure to magnetic fields
 - Part 2-1 : 2D models
 - Part 2-2 : 3D models
 - Part 2-3 : Guidelines for practical use of coupling factors
- Part 3: Exposure to electric fields
 - Part 3-1: Analytical and 2D numerical models
 - Part 3-2: 3D numerical models
- Part 4: Electrical parameters of human living tissues (Technical Report)

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

L'intérêt que porte le public à l'exposition aux champs électriques et magnétiques a conduit les organisations internationales et nationales à proposer des limites fondées sur leurs effets néfastes avérés.

La présente norme s'applique à la gamme de fréquences pour laquelle les limites d'exposition sont fondées sur des tensions ou des courants induits dans le corps humain, quand il est exposé aux champs électriques et magnétiques. Cette gamme de fréquences couvre les fréquences basses et intermédiaires jusqu'à 100 kHz. Certaines méthodes décrites dans la présente norme peuvent être utilisées à des fréquences plus élevées sous des conditions spécifiques.

Les limites d'exposition fondées sur l'expérimentation biologique et médicale à propos de ces phénomènes d'induction fondamentaux sont usuellement appelées «restrictions de base». Elles incluent des facteurs de sécurité.

Les quantités électriques induites n'étant pas directement mesurables, des limites dérivées sont aussi proposées. Ces limites, appelées «niveaux de référence» sont données en termes de champs électriques et magnétiques externes. Elles sont fondées sur des modèles très simples de couplage entre les champs externes et le corps. Ces limites dérivées sont conservatrices.

Des modèles sophistiqués de calcul des courants induits dans le corps ont été utilisés et font l'objet de nombreuses publications scientifiques. Ils utilisent des codes numériques de calcul 3D pour le champ électromagnétique et des modèles détaillés de la structure interne du corps avec les caractéristiques électriques spécifiques des tissus du corps humain. Cependant, le développement de tels modèles est toujours en cours; les données de conductivité électrique disponibles actuellement sont encore très imparfaites, et la résolution spatiale des modèles progresse toujours. De tels modèles sont ainsi considérés comme relevant encore du domaine de la recherche scientifique et on ne peut envisager que les résultats tirés de ces modèles soient définitivement fixés dans des normes. Cependant, il est admis que de tels modèles peuvent apporter, et apportent, une contribution utile au processus de normalisation, particulièrement pour les normes de produit où des cas particuliers d'exposition sont étudiés. Quand des résultats de tels modèles sont utilisés dans des normes, il convient qu'ils soient revus périodiquement pour s'assurer qu'ils reflètent toujours l'état actuel de la connaissance scientifique.

INTRODUCTION

Public interest concerning human exposure to electric and magnetic fields has led international and national organisations to propose limits based on recognised adverse effects.

This standard applies to the frequency range for which the exposure limits are based on the induction of voltages or currents in the human body, when exposed to electric and magnetic fields. This frequency range covers the low and intermediate frequencies, up to 100 kHz. Some methods described in this standard can be used at higher frequencies under specific conditions.

The exposure limits based on biological and medical experimentation about these fundamental induction phenomena are usually called “basic restrictions”. They include safety factors.

The induced electrical quantities are not directly measurable, so simplified derived limits are also proposed. These limits, called “reference levels”, are given in terms of external electric and magnetic fields. They are based on very simple models of coupling between external fields and the body. These derived limits are conservative.

Sophisticated models for calculating induced currents in the body have been used and are the subject of a number of scientific publications. These use numerical 3D electromagnetic field computation codes and detailed models of the internal structure with specific electrical characteristics of each tissue within the body. However such models are still developing; the electrical conductivity data available at present has considerable shortcomings; and the spatial resolution of models is still advancing. Such models are therefore still considered to be in the field of scientific research and at present it is not considered that the results obtained from such models should be fixed indefinitely within standards. However it is recognised that such models can and do make a useful contribution to the standardisation process, specially for product standards where particular cases of exposure are considered. When results from such models are used in standards, the results should be reviewed from time to time to ensure they continue to reflect the current status of the science.

EXPOSITION AUX CHAMPS ÉLECTRIQUES OU MAGNÉTIQUES À BASSE ET MOYENNE FRÉQUENCE – MÉTHODES DE CALCUL DES DENSITÉS DE COURANT INDUIT ET DES CHAMPS ÉLECTRIQUES INDUITS DANS LE CORPS HUMAIN –

Partie 2-1: Exposition à des champs magnétiques – Modèles 2D

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62226 introduit le facteur de couplage K , pour permettre l'évaluation de l'exposition dans des situations d'expositions complexes, telles que les champs magnétiques non uniformes ou les champs électriques perturbés. Le facteur de couplage K peut avoir différentes interprétations physiques selon qu'il se réfère à l'exposition à un champ électrique ou un champ magnétique.

L'objet de cette partie est de définir plus en détail ce facteur de couplage K , pour les cas de modèles simples de corps humain, exposé à des champs magnétiques non uniformes. Dans le cas présent, il est appelé «facteur de couplage pour champ magnétique non uniforme».

Tous les calculs ci-après utilisent l'approximation des basses fréquences dans laquelle les courants de déplacements sont négligés. Cette approximation a été validée dans la gamme des basses fréquences et dans le corps humain pour lequel $\varepsilon\omega \ll \sigma$.

Pour les fréquences supérieures à quelques kHz, il convient que le rapport de la conductivité et de la permittivité soit calculé afin de valider cette hypothèse.

2 Modèles analytiques

2.1 Généralités

Dans les guides traitant de l'exposition du corps humain aux champs magnétiques jusqu'à environ 100 kHz, les restrictions de base sont généralement exprimées en termes de densité de courant induit ou de champ électrique interne. Ces quantités électriques ne peuvent pas être mesurées directement et l'objet de ce document est de donner des méthodes et outils pour évaluer ces quantités à partir du champ magnétique externe.

La densité de courant induit J et le champ électrique interne E_i sont liés étroitement par la relation simple:

$$J = \sigma E_i \quad (1)$$

où σ est la conductivité des tissus vivants.

Pour simplifier, le contenu de cette norme est présenté en termes de densité de courant induit J , à partir de laquelle les valeurs du champ électrique interne peuvent être aisément déduites en utilisant l'équation précédente.

EXPOSURE TO ELECTRIC OR MAGNETIC FIELDS IN THE LOW AND INTERMEDIATE FREQUENCY RANGE – METHODS FOR CALCULATING THE CURRENT DENSITY AND INTERNAL ELECTRIC FIELD INDUCED IN THE HUMAN BODY –

Part 2-1: Exposure to magnetic fields – 2D models

1 Scope

This part of IEC 62226 introduces the coupling factor K , to enable exposure assessment for complex exposure situations, such as non-uniform magnetic field or perturbed electric field. The coupling factor K has different physical interpretations depending on whether it relates to electric or magnetic field exposure.

The aim of this part is to define in more detail this coupling factor K , for the case of simple models of the human body, exposed to non-uniform magnetic fields. It is thus called “coupling factor for non-uniform magnetic field”.

All the calculations developed in this document use the low frequency approximation in which displacement currents are neglected. This approximation has been validated in the low frequency range in the human body where parameter $\varepsilon\omega \ll \sigma$.

For frequencies up to a few kHz, the ratio of conductivity and permittivity should be calculated to validate this hypothesis.

2 Analytical models

2.1 General

Basic restrictions in guidelines on human exposure to magnetic fields up to about 100 kHz are generally expressed in terms of induced current density or internal electric field. These electrical quantities cannot be measured directly and the purpose of this document is to give methods and tools on how to assess these quantities from the external magnetic field.

The induced current density J and the internal electric field E_i are closely linked by the simple relation:

$$J = \sigma E_i \quad (1)$$

where σ is the conductivity of living tissues.

For simplicity, the content of this standard is presented in terms of induced current densities J , from which values of the internal electric field can be easily derived using the previous formula.

Des modèles analytiques ont été utilisés dans les recommandations de santé sur les champs électromagnétiques pour quantifier la relation entre les courants induits ou le champ électrique interne avec les champs externes. Ces modèles sont basés sur des hypothèses de géométries très simplifiées pour représenter le corps, avec une conductivité homogène, et un champ magnétique uniforme. De tels modèles sont très limités. Le corps humain est une structure non homogène bien plus complexe et le champ appliqué est le plus souvent non uniforme parce qu'il est généré par des courants circulant dans des ensembles de conducteurs et de bobines.

Par exemple, dans un système de chauffage par induction, le champ magnétique est en fait la superposition d'un champ d'excitation (créé par la bobine), et un champ de réaction (créé par les courants induits dans la pièce à chauffer). Dans le corps, ce champ de réaction est négligeable et peut être ignoré.

Les Annexes E et F présentent le calcul analytique du champ magnétique H créé par des sources simples et l'Annexe G présente la méthode analytique pour calculer le courant induit dans un disque conducteur.

2.2 Modèles analytiques de base pour les champs uniformes

Les modèles analytiques les plus simples utilisés dans les guides donnant des recommandations en matière de santé sur les champs électromagnétiques sont fondés sur l'hypothèse d'un couplage entre un champ magnétique externe uniforme à une fréquence unique et un disque homogène de conductivité donnée, utilisé pour représenter la partie considérée du corps humain, comme illustré à la Figure 1. De tels modèles sont utilisés par exemple dans les recommandations ICNIRP ¹⁾ et NRPB ²⁾.

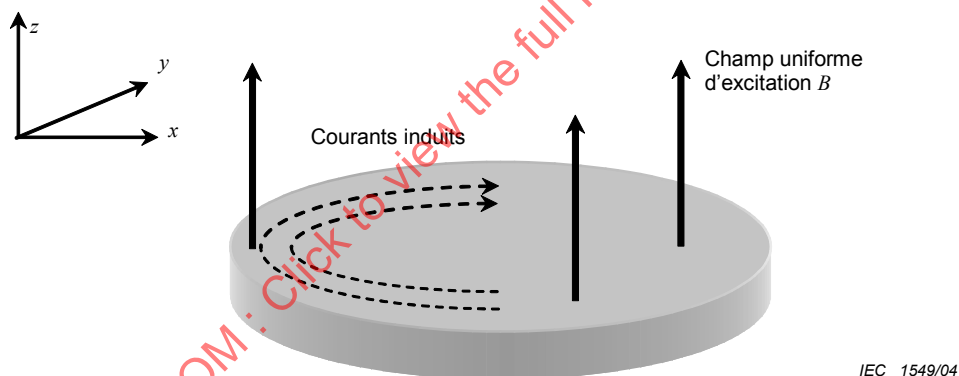


Figure 1 – Disque conducteur dans une densité de flux magnétique uniforme

L'objectif de tels modèles est de fournir une méthode simple pour évaluer des courants induits et des champs internes. Cette approche très préliminaire est simple et donne des valeurs conservatrices pour les quantités électriques calculées.

Pour les champs magnétiques alternatifs, le calcul suppose que le corps, ou la partie du corps exposée est une section circulaire de rayon r , et de conductivité σ . Le calcul est fait sous des conditions de couplage maximal, c'est-à-dire avec un champ magnétique uniforme perpendiculaire au disque. Dans ce cas, la densité de courant induit au rayon r est donnée par:

$$J(r) = \frac{r\sigma}{2} \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

où B est la densité de flux magnétique.

1) Health Physics (vol. 74, n° 4, April 1998, pp 496-522).

2) NRPB, 1993, Board Statement on Restrictions on Human Exposure to Static and Time-varying Electromagnetic Fields and Radiation, Volume 4, No 5, 1.

Analytical models have been used in EMF health guidelines to quantify the relationship between induced currents or internal electric field and the external fields. These involve assumptions of highly simplified body geometry, with homogeneous conductivity and uniform applied magnetic field. Such models have serious limitations. The human body is a much more complicated non-homogeneous structure, and the applied field is generally non-uniform because it arises from currents flowing through complex sets of conductors and coils.

For example, in an induction heating system, the magnetic field is in fact the superposition of an excitation field (created by the coils), and a reaction field (created by the induced currents in the piece). In the body, this reaction field is negligible and can be ignored.

Annex E and F presents the analytical calculation of magnetic field H created by simple sources and Annex G presents the analytical method for calculating the induced current in a conductive disk.

2.2 Basic analytical models for uniform fields

The simplest analytical models used in EMF health guidelines are based on the hypothesis of coupling between a uniform external magnetic field at a single frequency, and a homogeneous disk of given conductivity, used to represent the part of the body under consideration, as illustrated in Figure 1. Such models are used for example in the ICNIRP ¹⁾ and NRPB ²⁾ guidelines.

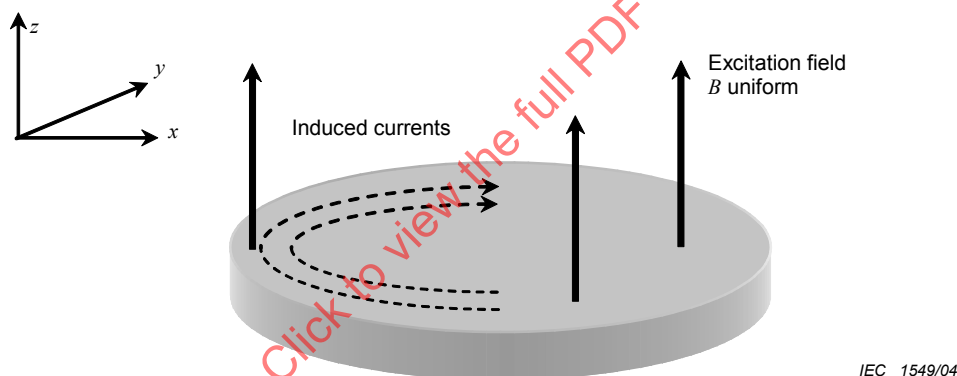


Figure 1 – Conducting disk in a uniform magnetic flux density

The objective of such a modelling is to provide a simple method to assess induced currents and internal fields. This very first approach is simple and gives conservative values of the electrical quantities calculated.

For alternating magnetic fields, the calculation assumes that the body or the part of the body exposed is a circular section of radius r , with conductivity σ . The calculation is made under maximum coupling conditions i.e. with a uniform magnetic field perpendicular to this disk. In this case, the induced current density at radius r is given by:

$$J(r) = \frac{r\sigma}{2} \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

where B is the magnetic flux density.

¹⁾ Health Physics (vol. 74, n° 4, April 1998, pp 496-522).

²⁾ NRPB, 1993, Board Statement on Restrictions on Human Exposure to Static and Time-varying Electromagnetic Fields and Radiation, Volume 4, No 5, 1.

Pour une fréquence unique f , cette équation devient:

$$J(r) = \sigma \pi r f B \quad (3)$$

Comme illustré à la Figure 1 (voir aussi l'Annexe A), les courants induits sont répartis dans le disque, suivant une symétrie de rotation autour de l'axe central du disque. La valeur du courant induit est minimale (zéro) au centre et maximale au bord du disque.

3 Modèles numériques

3.1 Informations générales sur les modèles numériques

Des modèles simples, qui prennent en considération les caractéristiques des champs, sont plus réalistes que ceux qui considèrent seulement les champs uniformes, tels que les modèles analytiques.

Les champs électromagnétiques sont régis par les équations de Maxwell. Ces équations peuvent être résolues avec précision pour des structures à 2 ou 3 dimensions (calculs 2D ou 3D) en utilisant diverses méthodes numériques, telles que

- la méthode des éléments finis (FEM);
- la méthode des équations intégrales de frontière (BIE ou BEM), ou méthode des moments;
- la méthode des différences finies (FD);
- la méthode des impédances (IM).

D'autres méthodes découlent de celles-ci. Par exemple, les méthodes suivantes découlent de la méthode des différences finies:

- méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD);
- méthode des différences finies dans le domaine temporel en fonction de la fréquence ((FD)²TD);
- méthode des différences finies en potentiel scalaire (SPFD).

Des méthodes hybrides ont aussi été développées pour améliorer les modélisations (exemple: FE + BIE).

Des logiciels du commerce peuvent résoudre avec précision les équations de Maxwell par la prise en compte des structures géométriques réelles et des caractéristiques physiques des matériaux, avec des conditions de source de courant aussi bien permanentes que transitoires.

Le choix d'une méthode numérique est guidé par un compromis entre la précision, la performance de l'ordinateur, les exigences de capacité de mémoire, et dépend de plusieurs paramètres tels que

- la simulation du champ d'exposition;
- la taille et la forme du corps humain à modéliser;
- le niveau de description du corps humain (taille de voxel), ou la finesse du maillage;
- la gamme de fréquences, de façon à pouvoir négliger certaines parties des relations de Maxwell (par exemple le terme de courant de déplacement pour les basses fréquences);
- le signal électrique d'alimentation (sinusoïdal, périodique ou transitoire);

For a single frequency f , this becomes:

$$J(r) = \sigma \pi r f B \quad (3)$$

As illustrated in Figure 1 (see also Annex A), induced currents are distributed inside the disk, following a rotation symmetry around the central axis of the disk. The value of induced currents is minimum (zero) at the centre and maximum at the edge of the disk.

3 Numerical models

3.1 General information about numerical models

Simple models, which take into consideration field characteristics, are more realistic than those, which consider only uniform fields, such as analytical ones.

Electromagnetic fields are governed by Maxwell's equations. These equations can be accurately solved in 2- or 3-dimensional structures (2D or 3D computations) using various numerical methods, such as:

- finite elements method (FEM);
- boundary integral equations method (BIE or BEM), or moment method;
- finite differences method (FD);
- impedance method (IM).

Others methods derive from these. For example, the following derive from the finite differences method:

- finite difference time domain (FDTD);
- frequency dependent finite difference time domain ((FD)²TD);
- scalar potential finite difference (SPFD).

Hybrid methods have been also developed in order to improve modelling (example: FE + BIE).

Commercially available software can accurately solve Maxwell's equations by taking into account real geometrical structures and physical characteristics of materials, as well as in steady state or transient current source conditions.

The choice of the numerical method is guided by a compromise between accuracy, computational efficiency, memory requirements, and depends on many parameters, such as:

- simulated field exposure;
- size and shape of human object to be modelled;
- description level of the human object (size of voxel), or fineness of the meshing;
- frequency range, in order to neglect some parts of Maxwell's relations (example: displacement current term for low frequency);
- electrical supply signal (sinusoidal, periodic or transient);

- le type de résolution (2D ou 3D);
- la formulation mathématique;
- les paramètres physiques linéaires ou non linéaires (conductivité ...);
- les performances de la méthode numérique;
- etc.

Ainsi, le temps de calcul peut varier considérablement.

Les valeurs électromagnétiques calculées peuvent être présentées sous différentes formes, incluant:

- la distribution du champ magnétique H , de la densité de flux B , du champ électrique E , de la densité de courant J . Ces distributions peuvent être présentées sous formes de courbes iso-valeur de couleurs différentes et/ou de courbes, permettant une évaluation visuelle des phénomènes et des éventuels «points chauds»;
- les valeurs locales ou intégrées dans l'espace de H , B , E , J , etc.;
- les valeurs globales: puissance active.

Ces méthodes sont très utiles pour résoudre des problèmes spécifiques; cependant, elles ne peuvent convenir à l'étude de problèmes généraux.

3.2 Modèles 2D – Approche générale

Afin d'appréhender rapidement les courants induits dans le corps humain, des simulations 2D peuvent être réalisées en utilisant une représentation simple du corps (un disque conducteur: exemple de modélisation donné à la Figure 2) dans un champ magnétique non uniforme, comme illustré à la Figure 3.

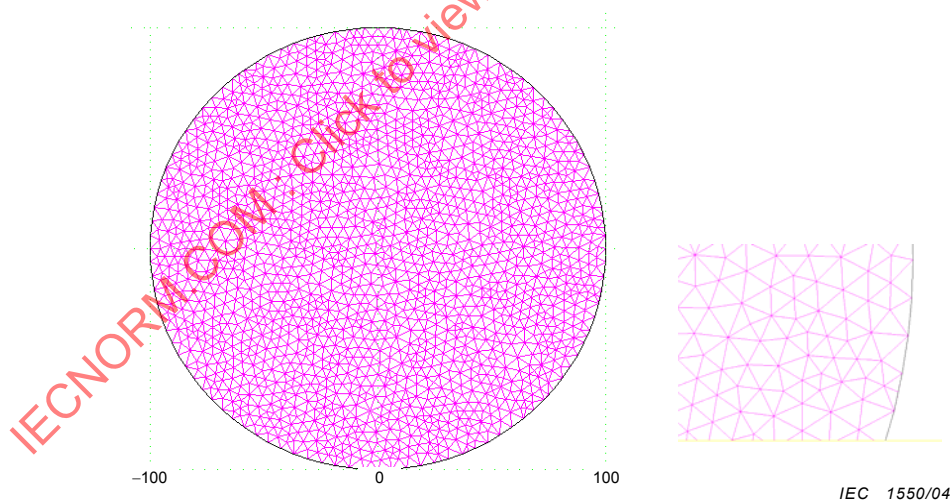


Figure 2 – Maillage par éléments finis (triangles d'ordre 2) d'un disque, et détail

- type of resolution (2D or 3D);
- mathematical formulation;
- linear or non linear physical parameters (conductivity, ...);
- performances of the numerical method;
- etc.

Computation times can therefore vary significantly.

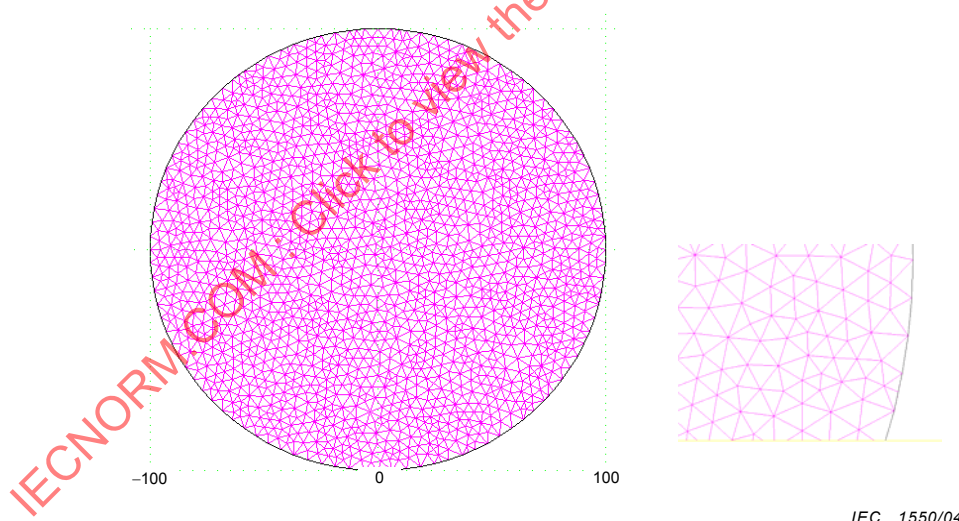
Computed electromagnetic values can be presented in different ways, including:

- distributions of magnetic field H , flux density B , electric field E , current density J . These distributions can be presented in the form of coloured iso-value lines and/or curves, allowing a visual assessment of the phenomena and the possible "hot" points;
- local or spatial averaged integral values of H , B , E , J , etc.;
- global magnitude values: active power.

These methods are very helpful for solving specific problems; however they cannot be conveniently used to study general problems.

3.2 2D models – General approach

In order to gain quickly an understanding of induced currents in the human body, 2D simulations can be performed using a simple representation of the body (a conductive disk: example of modelling given in Figure 2) in a non-uniform magnetic field, as illustrated in Figure 3.



IEC 1550/04

Figure 2 – Finite elements meshing (2nd order triangles) of a disk, and detail

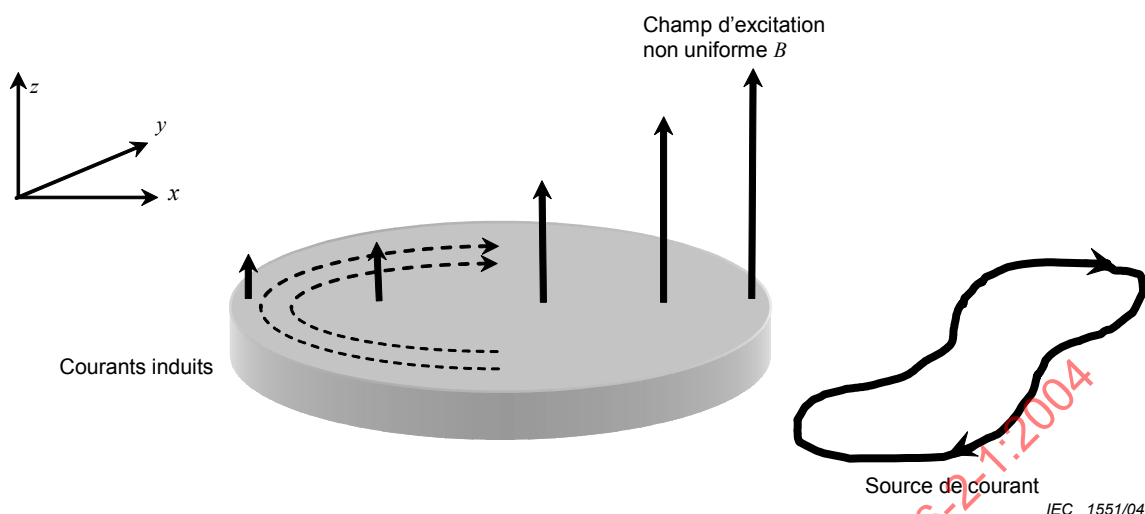


Figure 3 – Disque conducteur dans une densité de flux magnétique non uniforme

En partant des relations de Maxwell (approximation basse fréquence), une équation unique peut être obtenue avec une formulation mathématique spécifique (voir Annexe G):

$$\frac{1}{\sigma} \nabla^2 \bar{H}_r - \mu_0 \frac{\partial \bar{H}_r}{\partial t} = \mu_0 \frac{\partial \bar{H}_{ex}}{\partial t} \quad (4)$$

où

H_{ex} est le champ d'excitation créé par les sources de courant;

H_r est le champ de réaction créé par les courants induits:

$$\bar{J} = \text{Rot}(\bar{H}_r) \quad (5)$$

L'équation (4) est résolue pour une géométrie 2D en utilisant la méthode des éléments finis appliquée au maillage illustré à la Figure 2.

Le champ d'excitation H_{ex} est calculé pour trois sources de champs non uniformes en utilisant les expressions analytiques données à l'Annexe F. Les trois sources modélisées sont: un courant circulant dans un fil infini, deux fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et une boucle de courant.

Des coordonnées X, Y, Z sont utilisés. Le plan $X-Y$ est le plan du disque étudié dans lequel des courants induits sont générés. Excepté pour le cas particulier où H_{ex} est uniforme, les sources de courant sont dans le même plan. Seule la composante de H_{ex} le long de l'axe z est prise en compte. Les courants induits dans le disque ont deux composantes J_x, J_y .

Des exemples de résultats numériques sont présentés aux Annexes A à D.

3.3 Conductivité des tissus vivants

Le calcul numérique des courants induits dans le corps par le champ magnétique externe est fortement affecté par la conductivité des différents tissus du corps et par leurs propriétés anisotropiques. Les résultats présentés dans ce document supposent que la conductivité est homogène et isotrope avec une valeur de 0,2 S/m. Cette valeur est cohérente avec la valeur moyenne estimée dans les recommandations de santé sur les champs électromagnétiques.

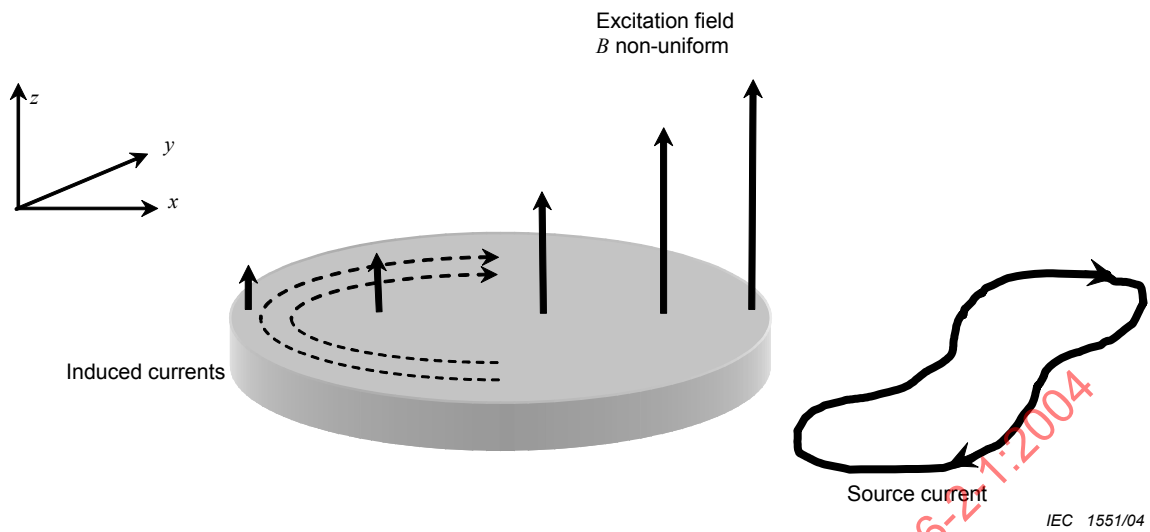


Figure 3 – Conducting disk in a non-uniform magnetic flux density

Starting from Maxwell's relations (low frequency approximation), a single equation can be obtained with a specific mathematical formulation (see Annex G):

$$\frac{1}{\sigma} \nabla^2 \bar{H}_r - \mu_0 \frac{\partial \bar{H}_r}{\partial t} = \mu_0 \frac{\partial \bar{H}_{ex}}{\partial t} \quad (4)$$

where

H_{ex} is the excitation field created by the source currents,

H_r is the reaction field created by the induced currents:

$$\vec{J} = \text{Curl}(\vec{H}_r) \quad (5)$$

Equation (4) is solved for a 2D geometry using the finite element method applied to the meshing illustrated in Figure 2.

The excitation field H_{ex} is calculated for three non-uniform field sources using the analytical expressions given in Annex F. The three sources modelled are: a current flowing through an infinitely long wire, two parallel wires with balanced currents and a current loop.

X , Y , Z co-ordinates are used. XY -plane is the study plane of the disk in which induced currents are generated. Except for the particular case where H_{ex} is uniform, source currents are in the same plane. Only the one component of H_{ex} along the Z -axis is taken into account. The induced currents in the disk have two components J_x , J_y .

Examples of numerical results are presented in Annexes A to D.

3.3 Conductivity of living tissues

The computation of induced currents in the body from the external magnetic field is strongly affected by the conductivity of the different tissues in the body and their anisotropic properties. The results presented in this document assume that the conductivity is homogeneous and isotropic with a value of 0,2 S/m. This value is consistent with the average value assumed in EMF health guidelines.

Les évaluations les plus récentes des données disponibles indiquent une conductivité moyenne légèrement plus élevée: 0,22 S/m. Des travaux expérimentaux sont en cours pour fournir plus d'informations fiables sur la conductivité. La conductivité moyenne sélectionnée pourrait être changée dans le futur dès lors que des données plus fiables seront disponibles. Les valeurs de courant induit présentées dans ce rapport seraient alors révisées proportionnellement à la conductivité. Néanmoins, le facteur de couplage pour les champs magnétiques non-uniformes K , défini précédemment, est indépendant de la conductivité.

3.4 Modèles 2D – Conditions des calculs numériques

Des codes numériques 2D ont été utilisés pour simuler le courant induit dans un disque conducteur par un champ magnétique alternatif de fréquence f produit par quatre sources de champ différentes:

- champ uniforme et unidirectionnel dans tout l'espace considéré (Annexe A);
- courant circulant dans un fil infiniment long (Annexe B);
- 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (Annexe C);
- courant circulant à travers une spire (Annexe D).

Pour faciliter une comparaison avec les modèles analytiques, toutes les valeurs numériques des paramètres de calculs ont été fixés pour l'ensemble de cette norme:

- rayon du disque: $R = 100$ mm et $R = 200$ mm;
- conductivité du disque: $\sigma = 0,2$ S/m;
- sources de champ à une fréquence de 50 Hz.

Exception faite de la première des quatre sources, le champ magnétique généré par la source est non uniforme et décroissant quand la distance à la source augmente. Dans ces cas, la valeur du champ calculée est la valeur au bord du disque, au plus près de la source.

Le champ de réaction créé par le courant induit dans le disque est négligeable (du fait de la très faible conductivité du disque) et est ignoré.

3.5 Facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme

La densité de courant induite dans le disque par une source localisée de champ magnétique (donc générant un champ non uniforme), est toujours plus faible que la densité de courant qui serait induite par un champ magnétique uniforme dont l'amplitude est égale à l'amplitude du champ non uniforme au bord du disque au plus près de la source localisée. Cette diminution du courant induit pour les sources de champs non uniformes est quantifiée en utilisant le facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K , qui est physiquement défini par:

$$K = \frac{J_{\text{nonuniform}}}{J_{\text{uniform}}} \quad (6)$$

où

$J_{\text{nonuniform}}$ est la densité de courant induit maximale dans le disque exposé au champ magnétique non uniforme d'une source localisée,

J_{uniform} est la densité de courant induit maximale dans le disque exposé à un champ magnétique uniforme.

J_{uniform} est obtenu par l'équation (3):

$$J_{\text{uniform}} = J(r = R) = \sigma \pi R f B \quad (7)$$

The most recent assessment of the available data indicates the average conductivity to be slightly higher: 0,22 S/m. More experimental work is in progress to provide more reliable conductivity information. The preferred average conductivity could be changed in the future as improved information becomes available. In that situation the values of induced current presented in this report should be revised in proportion to the conductivity. Nevertheless, the coupling factor for non-uniform magnetic field K , defined previously, is independent of the conductivity.

3.4 2D Models – Computation conditions

2D computation codes were used to simulate the current induced in a conductive disk by an alternating magnetic field of frequency f , produced by four different field sources:

- uniform and unidirectional field in all considered space (Annex A);
- current flowing through one infinitely long wire (Annex B);
- 2 parallel wires with balanced currents (Annex C);
- current flowing through one circular coil. (Annex D).

In order to facilitate comparisons with analytical models, all numerical values of computation parameters are fixed throughout this standard:

- radius of disk: $R = 100$ mm, and $R = 200$ mm;
- conductivity of disk: $\sigma = 0,2$ S/m;
- field sources at 50 Hz frequency.

With the exception of the first of the four field sources, the magnetic field from the source is non-uniform, decreasing with increasing distance from the source. In these cases the field value quoted is the value at the edge of the disk closest to the source.

The reaction field created by the induced current in the disk is negligible (due to the very low conductivity of the disk) and is ignored.

3.5 Coupling factor for non-uniform magnetic field

The current density induced in the disk by a localised source of magnetic field (therefore generating a non-uniform field), is always lower than the current density that would be induced by a uniform magnetic field whose magnitude is equal to the magnitude of the non-uniform field at the edge of the disk closest to the localised source. This reduction of induced current for non-uniform field sources is quantified using the coupling factor for non-uniform magnetic field K , which is physically defined as:

$$K = \frac{J_{\text{nonuniform}}}{J_{\text{uniform}}} \quad (6)$$

where

$J_{\text{nonuniform}}$ is the maximum induced current density in the disk exposed to the non-uniform magnetic field from a localised source,

J_{uniform} is the maximum induced current density in the disk exposed to a uniform magnetic field.

J_{uniform} is derived from equation (3):

$$J_{\text{uniform}} = J(r = R) = \sigma \pi R f B \quad (7)$$

On doit noter que $K = 1$ quand le champ est uniforme. L'Annexe A illustre la distribution de courant dans un disque de rayon $R = 100$ mm pour un champ appliqué uniforme $B = 1,25$ μ T. Le facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K est calculé numériquement pour les trois sources non uniformes de champ, respectivement aux Annexes B, C, et D.

NOTE 1 Dans ce document, les valeurs ponctuelles calculées des densités de courant induit ont été moyennées (voir Annexes A à D). Ainsi, les valeurs de J_{uniform} et $J_{\text{nonuniform}}$ données ci-dessus sont des valeurs moyennes, sur une section de 1 cm², perpendiculaire à la direction du courant.

NOTE 2 Les valeurs de K sont calculées pour une fréquence de 50 Hz. Néanmoins, du fait de l'approximation pour les basses fréquences, ces valeurs sont aussi valables pour toute la gamme couverte par la présente norme, c'est-à-dire jusqu'à 100 kHz. De même, du fait de l'approximation pour les basses fréquences, K est indépendant de la conductivité.

Pour les cas réels, la distribution spatiale du champ ne peut être décrite aisément par des équations, et le facteur de couplage K peut seulement être estimé (par exemple en utilisant les tables de valeurs données dans les annexes de ce document).

3.6 Modèles 2D – Résultats des calculs numériques

Ce paragraphe est un résumé des résultats numériques détaillés donnés aux Annexes B, C et D, qui correspondent aux trois types de sources. Quelle que soit la source, le modèle du corps humain est traité comme un disque homogène:

- rayon du disque: $R = 100$ mm et $R = 200$ mm;
- conductivité du disque: $\sigma = 0,2$ S/m.

Pour comparer les différents types de sources (c'est-à-dire les modèles de couplage), la valeur du champ magnétique maximal local est normalisée. Quelle que soit la source, l'amplitude du champ magnétique au bord du disque au plus près de la source est égale à l'amplitude du champ homogène (c'est-à-dire $B = 1,25$ μ T, voir Annexe A).

Le Tableau 1 présente une sélection, issue des Annexes B, C et D, de valeurs numériques du facteur K pour les trois sources différentes et pour un disque de rayon $R = 100$ mm. Ces valeurs sont aussi présentées sous forme de graphique à la Figure 4.

Toutes les valeurs du Tableau 1 sont inférieures à 1, et parfois très inférieures à 1, d'un facteur pouvant aller jusqu'à 100. Cela démontre que pour une densité de courant maximale dans le disque, le champ magnétique correspondant au bord du disque peut avoir une large étendue de valeurs en fonction des caractéristiques de la source de champ et de la distance entre le disque et la source.

L'approximation de champ uniforme (pour lequel $K = 1$) est appropriée seulement quand la distance entre la source et le «disque humain» devient grande par rapport à la taille du disque (typiquement 10 fois le rayon du disque). A des distances plus habituelles d'exposition générée, par exemple, par des appareils électriques domestiques, la non-uniformité du champ magnétique avec la distance doit être prise en compte comme il est indiqué dans cette norme.

It shall be noted that $K = 1$ when the field is uniform. Annex A illustrates the current distribution in a disk of radius $R = 100$ mm for an applied uniform field $B = 1,25$ μ T. The coupling factor for non-uniform magnetic field K is calculated numerically for the three non-uniform sources of field, in Annex B, C and D respectively.

NOTE 1 Calculated spot values of induced current densities have been averaged in this document (see Annexes A to D). So the values of J_{uniform} and $J_{\text{nonuniform}}$ given here above are averaged values, integrated over a cross section of 1 cm^2 , perpendicular to the current direction.

NOTE 2 Values of K are calculated at a frequency of 50 Hz. Nevertheless, due to the low frequency approximation, these values are also valid for the whole frequency range covered by this standard i.e. up to 100 kHz. Also, due to the low frequency approximation, K is independent of the conductivity.

For real cases, the spatial arrangement of field cannot easily be described in equations, and the coupling factor K can only be estimated (for example using the table values given in annexes of this document).

3.6 2D Models – Computation results

This subclause is a summary of the detailed numerical results given in Annexes B, C and D, which deal with the three types of sources. Whatever the source, the model of human body is treated as a homogeneous disk:

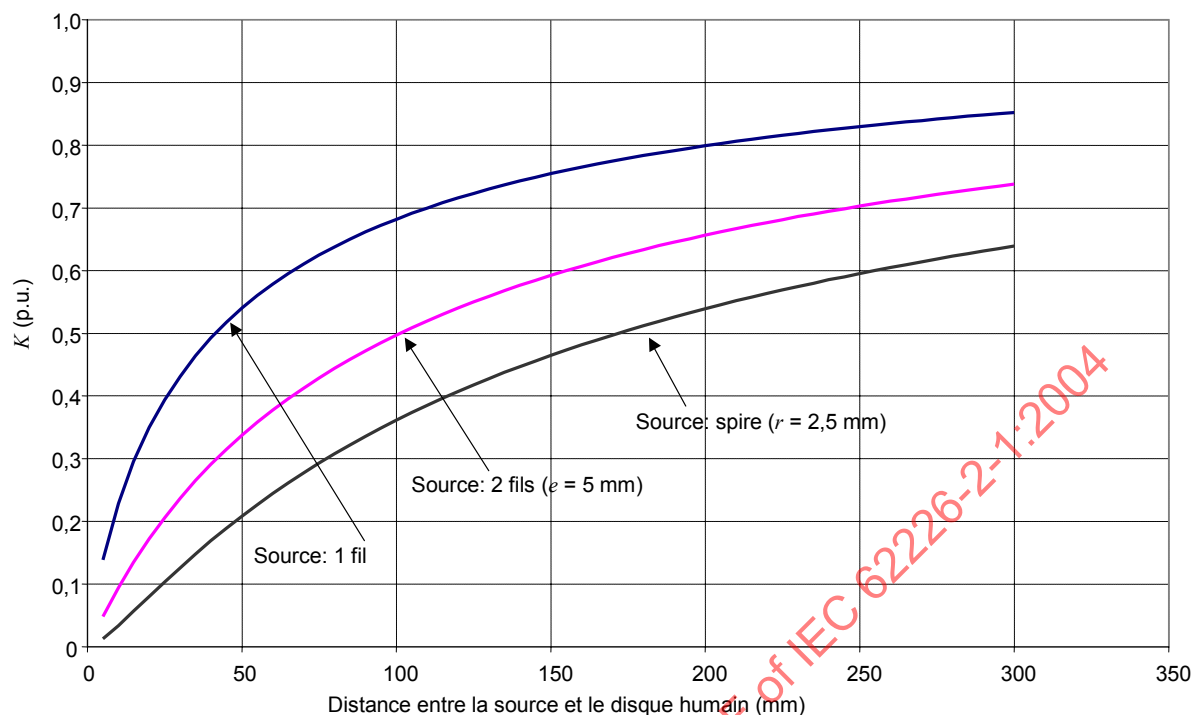
- radius of disk: $R = 100$ mm and $R = 200$ mm;
- conductivity of disk: $\sigma = 0,2$ S/m .

For comparison between the different types of sources (i.e. coupling models), the value of the local maximum magnetic field is normalised. Whatever the source, the magnetic field magnitude at the edge of the disk closest to the source is equal to the uniform field magnitude (i.e. $B = 1,25$ μ T, see annex A).

Table 1 presents a selection from Annexes B, C and D of the numerical values of the factor K for the three different sources and for a disk radius $R = 100$ mm. These results are also presented in a graphic form in Figure 4.

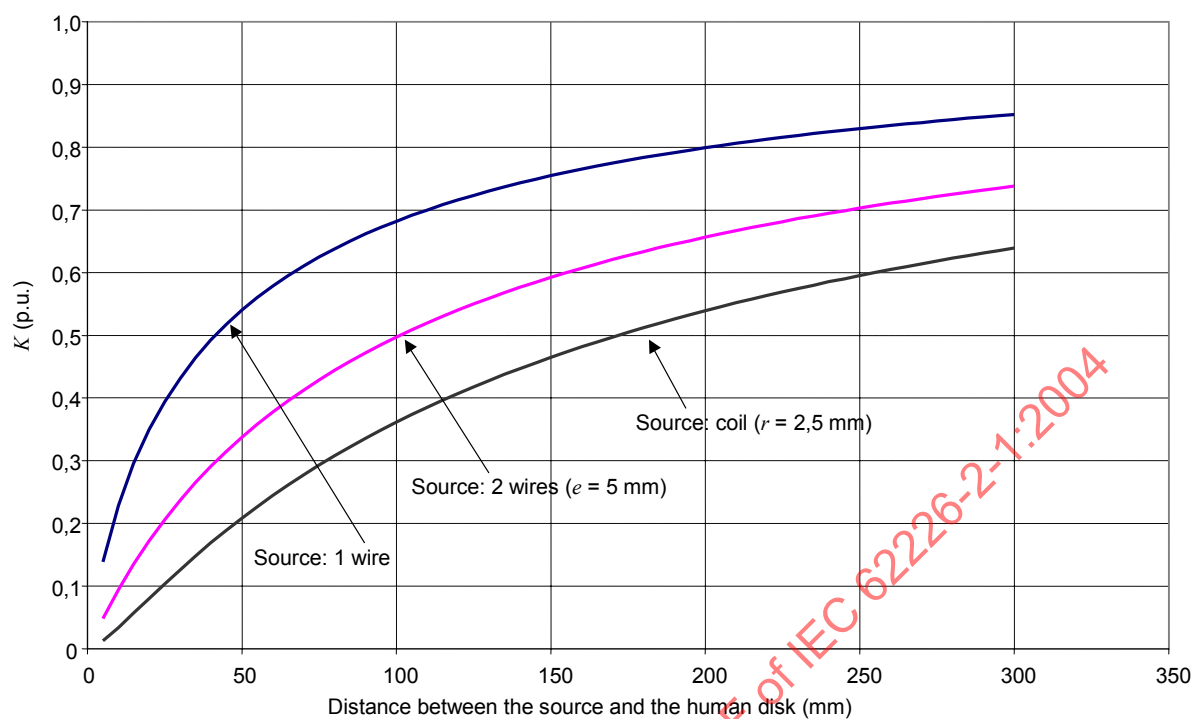
All the values in Table 1 are less than 1, and sometimes much less than 1, by a factor up to about 100. This demonstrates that, for a specified maximum current density in the disk, the corresponding magnetic field at the edge of the disk can have a wide range of values depending on the characteristics of the field source and on the distance between the disk and source.

The uniform field approximation (for which $K = 1$) is appropriate only when the distance between the source and the “human disk” becomes large relative to the size of the disk (typically 10 times the disk radius). At more usual distance of exposure from, for example, domestic appliances, the non-uniformity of the magnetic field with the distance has to be taken into account in the way presented in this standard.



NOTE Des valeurs pour des distances jusqu'à 1 900 mm, et pour d'autres distances de séparation entre fils et d'autres tailles de spires, sont données aux Annexes B, C et D.

Figure 4 – Variation du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K avec la distance à la source, pour les trois types de sources de champ magnétique (rayon du disque $R = 100$ mm)



IEC 1552/04

NOTE Values for distances up to 1 900 mm, and for other wire separations and coil sizes are given in Annexes B, C and D.

Figure 4 – Variation with distance to the source of the coupling factor for non-uniform magnetic field, K , for the three magnetic field sources (disk radius $R = 100$ mm)

Tableau 1 – Valeurs numériques du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K pour différents types de sources de champ magnétique, à différentes distances entre les sources et le disque conducteur ($R = 100$ mm)

Facteur K pour différentes sources			
Distance entre la source et le disque mm	1 fil infini	2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, espacés de 5 mm	1 spire de rayon 2,5 mm
10	0,229	0,094	0,034
20	0,350	0,172	0,080
30	0,432	0,237	0,126
40	0,492	0,291	0,169
50	0,540	0,337	0,208
60	0,579	0,378	0,244
70	0,611	0,413	0,277
80	0,638	0,444	0,308
90	0,661	0,472	0,336
100	0,682	0,497	0,361
110	0,700	0,520	0,385
120	0,716	0,540	0,407
130	0,730	0,559	0,428
140	0,743	0,576	0,447
150	0,754	0,592	0,465
160	0,765	0,607	0,482
170	0,775	0,621	0,497
180	0,783	0,634	0,512
190	0,792	0,645	0,526
200	0,799	0,657	0,539
210	0,806	0,667	0,552
220	0,813	0,677	0,563
230	0,819	0,686	0,575
240	0,824	0,695	0,585
250	0,830	0,703	0,595
260	0,835	0,711	0,605
270	0,839	0,718	0,614
280	0,844	0,725	0,623
290	0,848	0,732	0,631
300	0,852	0,738	0,639

NOTE Des valeurs pour des distances jusqu'à 1 900 mm, pour d'autres distances de séparation entre fils d'autres tailles de spires, sont données aux Annexes B, C et D.

4 Validation des modèles

La validation des outils numériques utilisés pour le calcul informatique des densités de courant induit doit être faite par comparaison avec les résultats donnés dans les annexes de cette norme, qui ont été validés par comparaison avec les publications scientifiques.

Des informations additionnelles concernant les logiciels utilisés pour la validation de calculs numériques peuvent être trouvées dans la bibliographie de la CEI 62226-1.

Table 1 – Numerical values of the coupling factor for non-uniform magnetic field K for different types of magnetic field sources, and different distances between sources and conductive disk ($R = 100$ mm)

K factor for different sources			
Distance between the source and the disk mm	1 infinite wire	2 parallel wires with balanced currents, 5 mm spaced	1 circular coil 2,5 mm radius
10	0,229	0,094	0,034
20	0,350	0,172	0,080
30	0,432	0,237	0,126
40	0,492	0,291	0,169
50	0,540	0,337	0,208
60	0,579	0,378	0,244
70	0,611	0,413	0,277
80	0,638	0,444	0,308
90	0,661	0,472	0,336
100	0,682	0,497	0,361
110	0,700	0,520	0,385
120	0,716	0,540	0,407
130	0,730	0,559	0,428
140	0,743	0,576	0,447
150	0,754	0,592	0,465
160	0,765	0,607	0,482
170	0,775	0,621	0,497
180	0,783	0,634	0,512
190	0,792	0,645	0,526
200	0,799	0,657	0,539
210	0,806	0,667	0,552
220	0,813	0,677	0,563
230	0,819	0,686	0,575
240	0,824	0,695	0,585
250	0,830	0,703	0,595
260	0,835	0,711	0,605
270	0,839	0,718	0,614
280	0,844	0,725	0,623
290	0,848	0,732	0,631
300	0,852	0,738	0,639

NOTE Values for distances up to 1 900 mm, and for other wire separations and coil sizes are given in Annexes B, C and D.

4 Validation of models

The validation of the numerical tools used for computation of induced current densities shall be made by comparison with the results given in the annexes of this standard, which have been validated by comparison with scientific literature.

Additional information concerning the software used for the validation of numerical computation can be found in the bibliographic references of IEC 62226-1.

Annexe A (normative)

Disque dans un champ uniforme

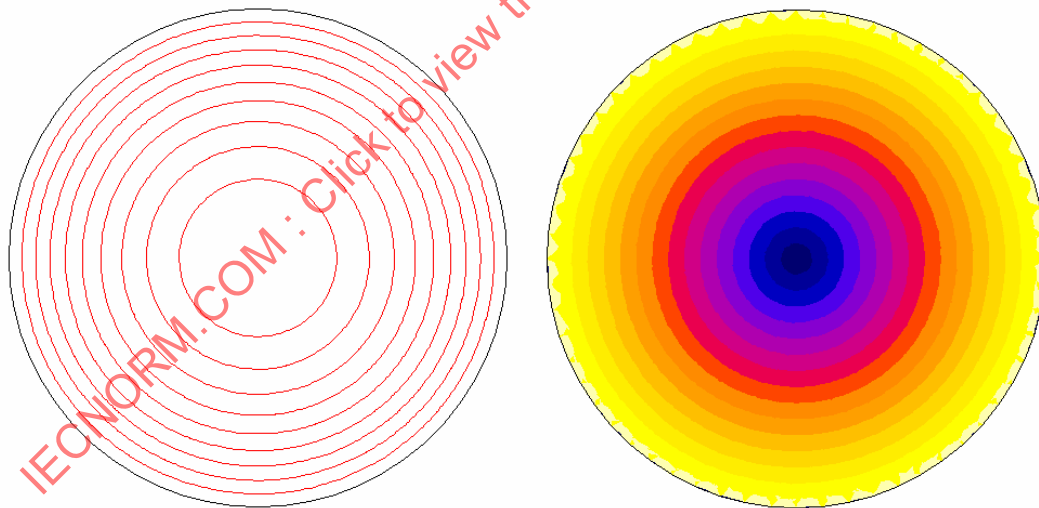
Les courants induits sont calculés dans un disque de conductivité homogène. Afin de permettre la comparaison entre les différentes configurations de sources de champ (en fonction de la géométrie de la source et de la distance par rapport au disque, voir Annexes B à D), les valeurs normalisées suivantes ont été choisies:

- f , fréquence = 50 Hz (voir Note 2 de 3.5);
- B , densité de flux magnétique uniforme = 1,25 μT ;
- R , rayon du disque conducteur = 100 mm;
- σ , conductivité (homogène) = 0,2 S/m.

La prise en compte de ces valeurs dans l'équation (3) donne, au bord du disque

$$J_{\max} = 0,393 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2 \text{ (calcul analytique)}$$

Des résultats issus du calcul numérique en utilisant des méthodes par éléments finis sont présentés ci-après sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure A.1) et de courbe donnant les valeurs numériques des courants induits locaux (Figure A.2):



IEC 1553/04

Figure A.1 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque

Ce calcul numérique donne, au bord du disque, une valeur de:

$$J_{\max} = 0,390 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$$

En considérant l'effet de maillage des modèles numériques, cette valeur numérique de $J_{\max}$ peut être considérée comme égale à la valeur analytique. Ainsi, des approches analytiques et numériques donnent des résultats très similaires dans ce cas simple.

Annex A (normative)

Disk in a uniform field

The induced currents are calculated in a disk of homogeneous conductivity. In order to allow comparison between different field sources configurations (depending on geometry of the source and distance to the disk, see Annex B to D) the following standard values have been chosen:

- f , frequency = 50 Hz (see note 2 in 3.5);
- B , uniform magnetic flux density = 1,25 μT ;
- R , radius of the conductive disk = 100 mm;
- σ , conductivity (homogeneous) = 0,2 S/m.

Using these values in equation (3) gives, at the edge of the disk:

$$J_{\max} = 0,393 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2 \text{ (analytical calculation)}$$

Results of a numerical computation using finite element methods are presented hereafter in the form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure A.1) and curve giving numerical values of local induced currents (Figure A.2):

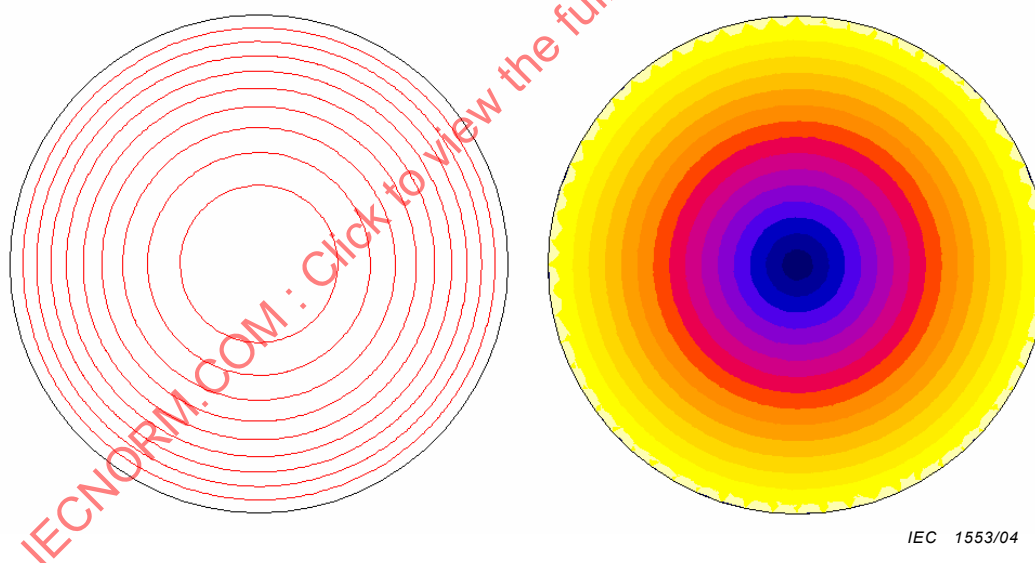


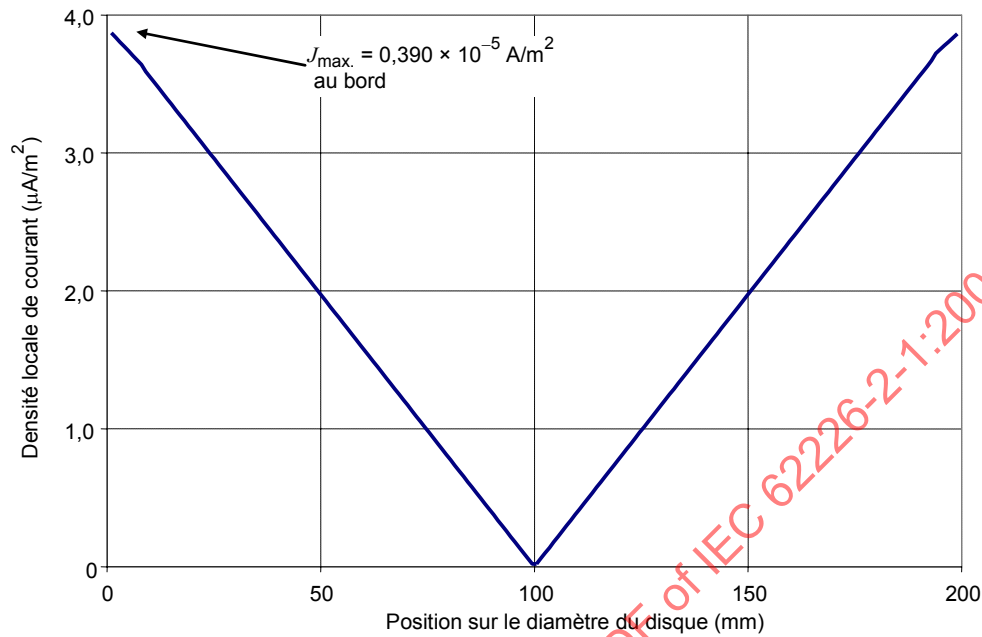
Figure A.1 – Current density lines J and distribution of J in the disk

This computation gives, at the edge of the disk a value of:

$$J_{\max} = 0,390 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$$

Considering the meshing effect of numerical models, this numerical value of $J_{\max}$ can be considered as equal to the analytical one. So, analytical and numerical approaches give very similar results in this simple case.

La densité de courant induit varie linéairement avec la distance le long du diamètre du disque comme le montre la Figure A.2:



IEC 1554/04

Figure A.2 – $J = f[r]$: Distribution ponctuelle de la densité de courant induit calculée le long d'un diamètre d'un disque homogène dans un champ magnétique uniforme

Pour éviter tout biais dû au maillage numérique, les valeurs ponctuelles calculées doivent être moyennées. Dans les calculs numériques du présent document, une section carrée de 1 cm², perpendiculaire à la direction du courant, a été utilisée.

L'équation analytique correspondante est l'intégrale de l'équation (3):

$$J_i(r) = 1/r_m \int_{r-r_m/2}^{r+r_m/2} \sigma \pi f \alpha B d\alpha \quad (\text{A-1})$$

où r_m est la longueur d'intégration, égale à 1 cm (valable pour $r < R - r_m/2$)

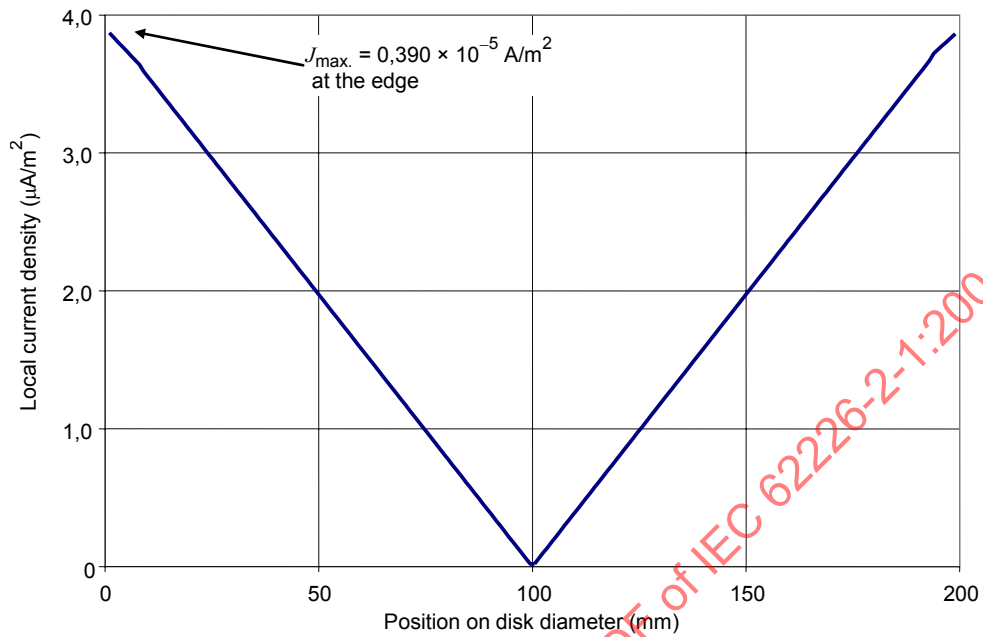
En utilisant les valeurs numériques précédemment définies, la solution analytique de l'équation (A-1) est:

$$J_{i \max} = 0,375 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$$

qui est très similaire à la valeur numérique: $J_{i \max} = 0,374 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$.

En raison de l'intégration, cette valeur est plus faible que la valeur ponctuelle.

The induced current density varies linearly with distance along a diameter of the disk as shown in Figure A.2:



IEC 1554/04

Figure A.2 – $J = f[r]$: Spot distribution of induced current density calculated along a diameter of a homogeneous disk in a uniform magnetic field

To avoid any bias due to numerical meshing, calculated spot values shall be averaged. In the computations of the present document, a square section of 1 cm², perpendicular to the current direction was used.

The corresponding analytical formula is the integral of equation (3):

$$J_i(r) = 1/r_m \int_{r-r_m/2}^{r+r_m/2} \sigma \pi f \alpha B d\alpha \quad (\text{A-1})$$

where r_m is the length of integration, equal to 1 cm (valid for $r < R - r_m/2$)

Using the numerical values previously defined, the analytical solution of equation (A-1) is:

$$J_{i \max} = 0,375 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$$

which is very similar to the numerical value: $J_{i \max} = 0,374 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$.

Due to the integration, this value is lower than the spot value.

La distribution de la densité intégrée de courant induit est aussi une fonction linéaire de la position du point de calcul le long d'un diamètre du disque, comme illustré à la Figure A.3:

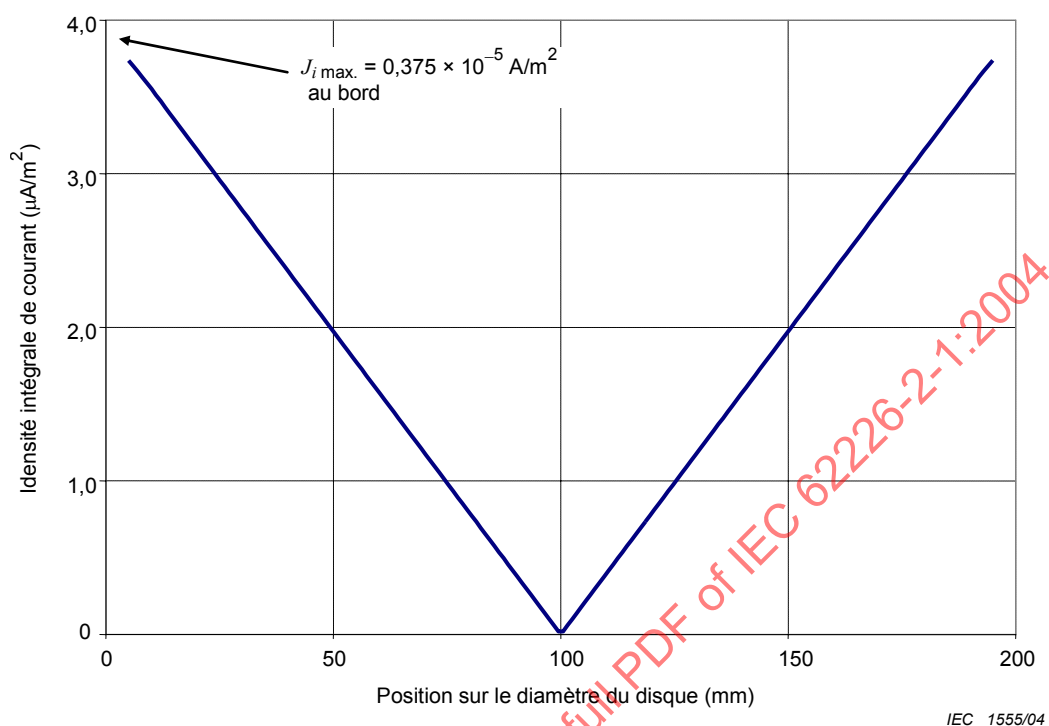


Figure A.3 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long d'un diamètre d'un disque homogène dans un champ magnétique uniforme

The distribution of the integrated induced current density is also a linear function of the position of calculation point along a diameter of the disk, as illustrated in Figure A.3:

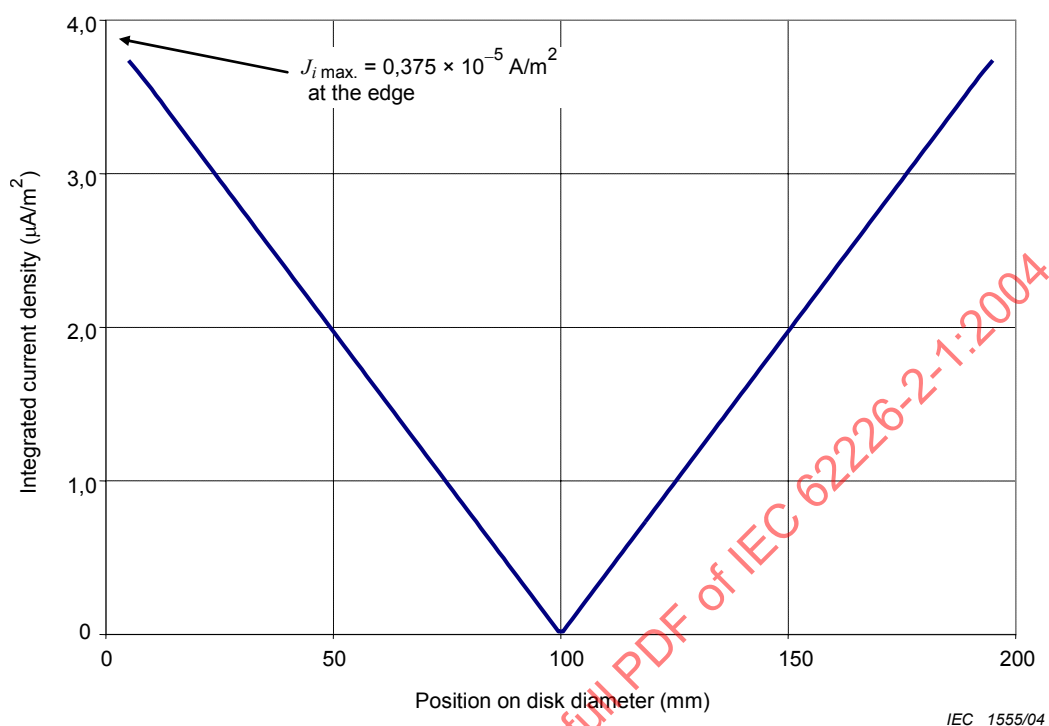


Figure A.3 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along a diameter of a homogeneous disk in a uniform magnetic field

Annexe B (normative)

Disque dans un champ créé par un fil de longueur infinie

Les courants induits sont calculés dans un disque de conductivité homogène. Afin de permettre la comparaison entre les différentes configurations des sources de champ (en fonction de la géométrie de la source et de la distance par rapport au disque) les valeurs normalisées suivantes ont été choisies:

- f , fréquence = 50 Hz (voir Note 2 de 3.5) ;
- B , densité de flux magnétique = 1,25 μT , au bord du disque au plus proche de la source de champ ;
- R , rayon du disque conducteur = 100 mm ou 200 mm ;
- σ , conductivité (homogène) = 0,2 S/m.

Dans cette annexe, la source de champ est un courant alternatif circulant le long d'un fil rectiligne infini. Le disque conducteur et la source de champ sont situés dans le même plan, à une distance d (voir Figure B.1).

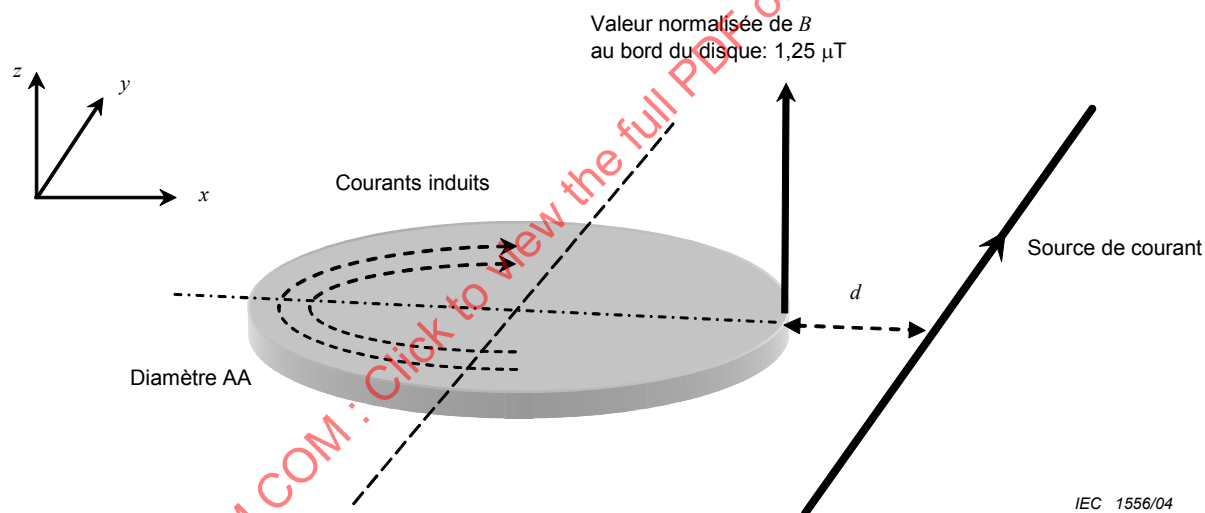


Figure B.1 – Disque dans le champ magnétique créé par un fil rectiligne infini

La distance d est la distance minimale entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source.

La variation du facteur de couplage pour champ magnétique non homogène K est étudiée par rapport à la distance d pour:

- une exposition proche de la source: $0 < d < 300 \text{ mm}$
- une exposition à une distance plus grande: $0 < d < 1\,900 \text{ mm}$

Pour les illustrations et les exemples de calculs numériques de courants induits, 3 distances d ont été étudiées:

- $d = 10 \text{ mm}$;
- $d = 100 \text{ mm}$;
- $d = 1\,000 \text{ mm}$.

Annex B (normative)

Disk in a field created by an infinitely long wire

The induced currents are calculated in a disk of homogeneous conductivity. In order to allow comparison between different field sources configurations (depending on geometry of the source and distance to the disk) the following standard values have been chosen:

- f , frequency = 50 Hz (see note 2 of 3.5);
- B , magnetic flux density = 1,25 μT , at the edge of the disk closer to the field source;
- R , radius of the conductive disk = 100 mm or 200 mm;
- σ , conductivity (homogeneous) = 0,2 S/m.

In this annex, the field source is an alternating current flowing through an infinite straight wire. The conductive disk and the field source are located in the same plane, at a distance d (see Figure B.1).

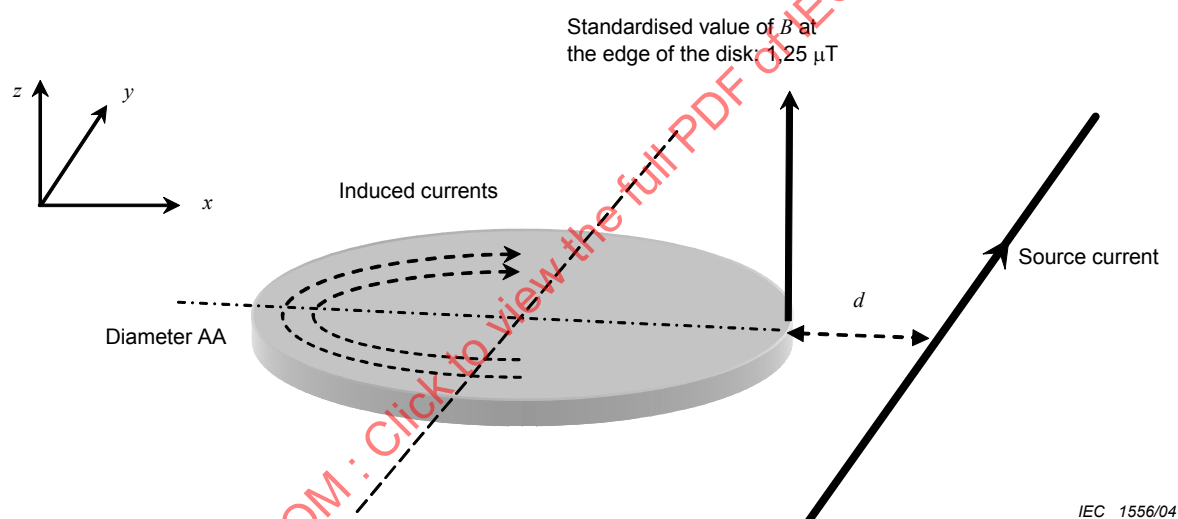


Figure B.1 – Disk in the magnetic field created by an infinitely straight wire

The distance d is the minimum distance between the edge of the disk and the closer part of the source.

The variation of the coupling factor for non-uniform magnetic field K is studied with regard to the distance d for:

- exposure close to the source: $0 < d < 300$ mm
- exposure at higher distance: $0 < d < 1\,900$ mm

For illustrations and examples of induced currents computation, 3 distances d have been studied:

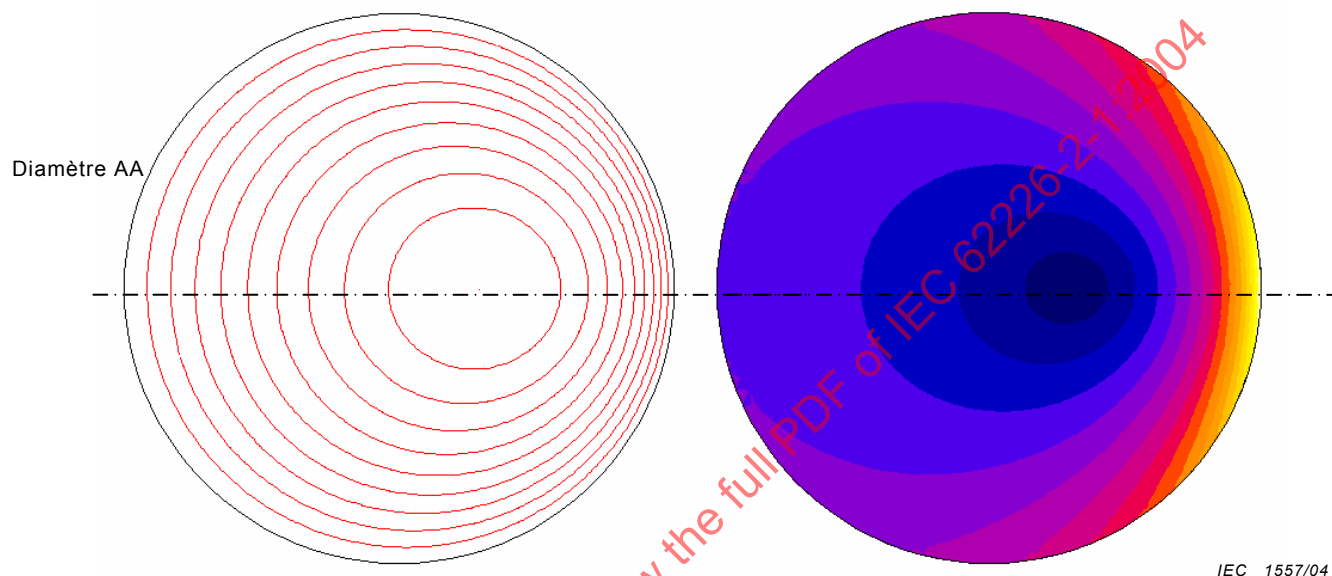
- $d = 10$ mm;
- $d = 100$ mm;
- $d = 1\,000$ mm.

B.1 Calculs pour un disque conducteur de rayon $R = 100$ mm

B.1.1 Exemples de calculs de courants induits dans le disque

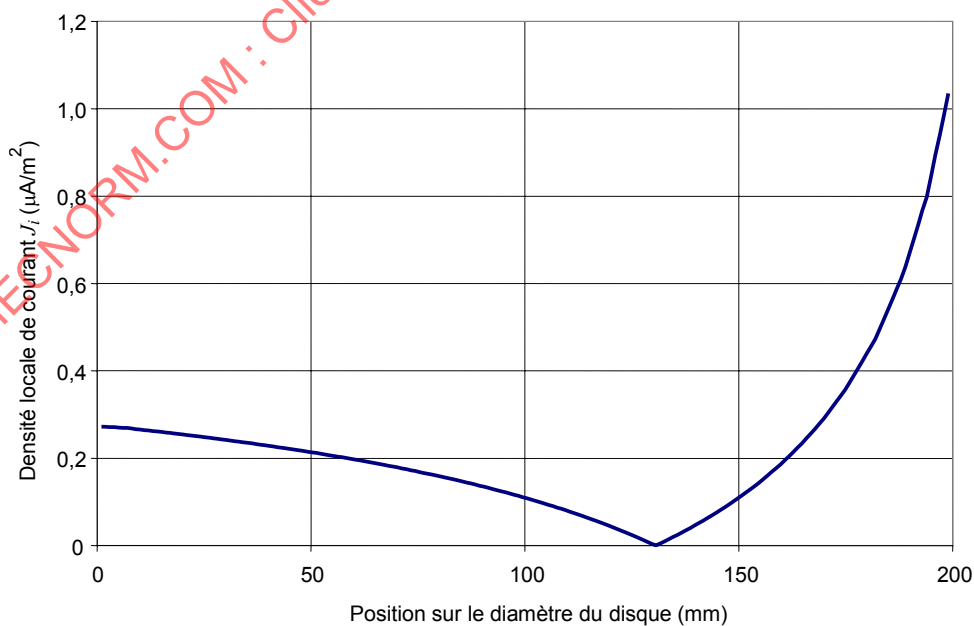
B.1.1.1 Distance à la source $d = 10$ mm

Les résultats du calcul des courants induits locaux dans le disque sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure B.2) et de courbes donnant les valeurs numériques des courants induits (Figures B.3 et B.4). La courbe de la Figure B.4 donne la distribution des courants induits intégrés sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant induit.



IEC 1557/04

Figure B.2 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque
(source: 1 fil, situé à $d = 10$ mm du bord du disque)



IEC 1558/04

Figure B.3 – Distribution ponctuelle de la densité de courant induit le long du diamètre AA du disque
(source: 1 fil, situé à $d = 10$ mm du bord du disque)

NOTE Le diamètre AA est situé comme illustré aux Figures B.1 et B.2.

B.1 Calculations for a conductive disk with a radius $R = 100$ mm

B.1.1 Examples of calculation of induced currents in the disk

B.1.1.1 Distance to the source $d = 10$ mm

Results of the computation of local induced currents in the disk are given hereunder in form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure B.2) and curves giving numerical values of the induced currents (Figures B.3 and B.4). The curve in Figure B.4 gives the distribution of the induced currents integrated over a surface of 1 cm^2 perpendicular to the induced current direction.

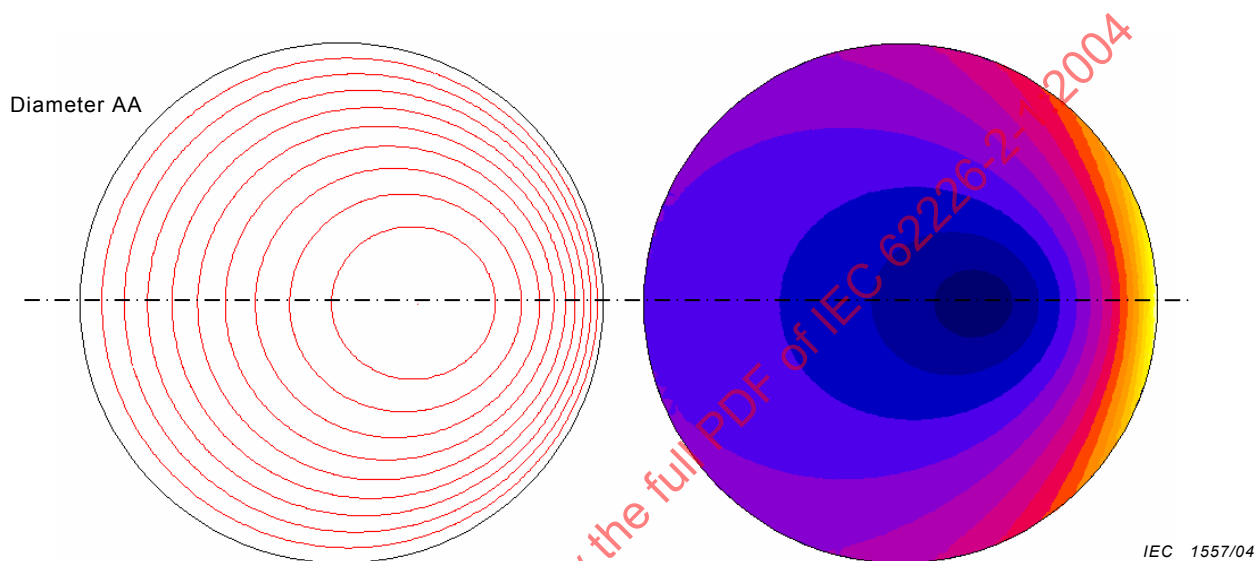


Figure B.2 – Current density lines J and distribution of J in the disk
(source: 1 wire, located at $d = 10$ mm from the edge of the disk)

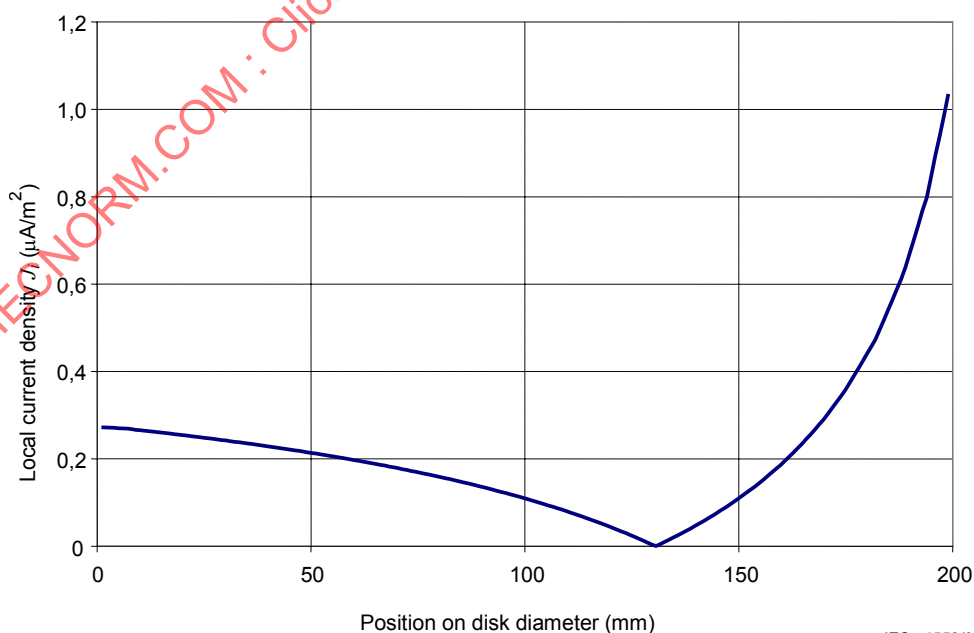


Figure B.3 – Spot distribution of induced current density along the diameter AA of the disk
(source: 1 wire, located at $d = 10$ mm from the edge of the disk)

NOTE The diameter AA is located as illustrated in Figures B.1 and B.2.

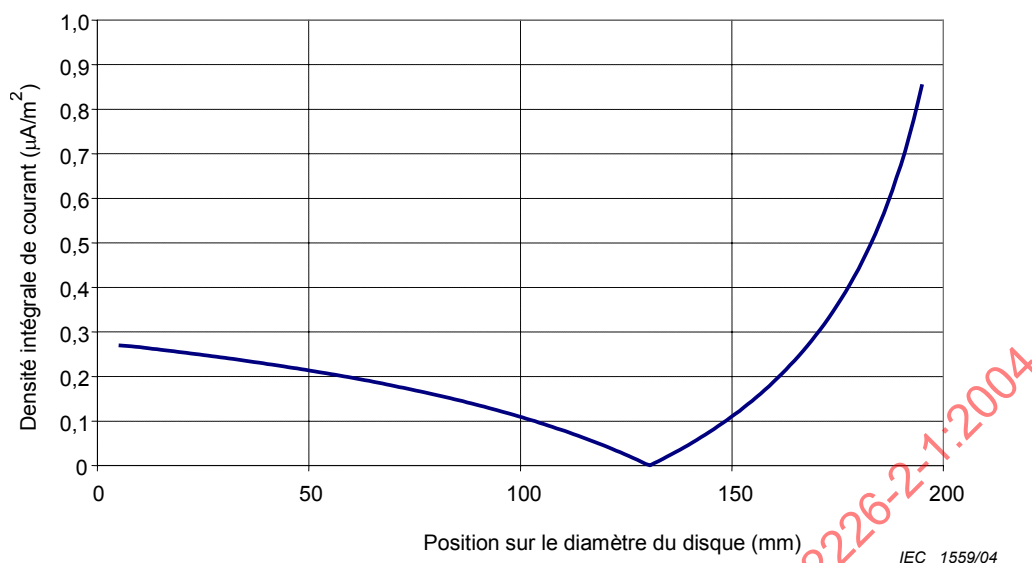


Figure B.4 – Distribution de la densité intégrée de courant induit le long du diamètre AA du disque (source: 1 fil, situé à $d = 10$ mm du bord du disque)

B.1.1.2 Distance de la source $d = 100$ mm

Les résultats du calcul des courants induits locaux dans le disque sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure B.5). La courbe de la Figure B.6 donne les valeurs numériques de la distribution des courants induits intégrés sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant induit.

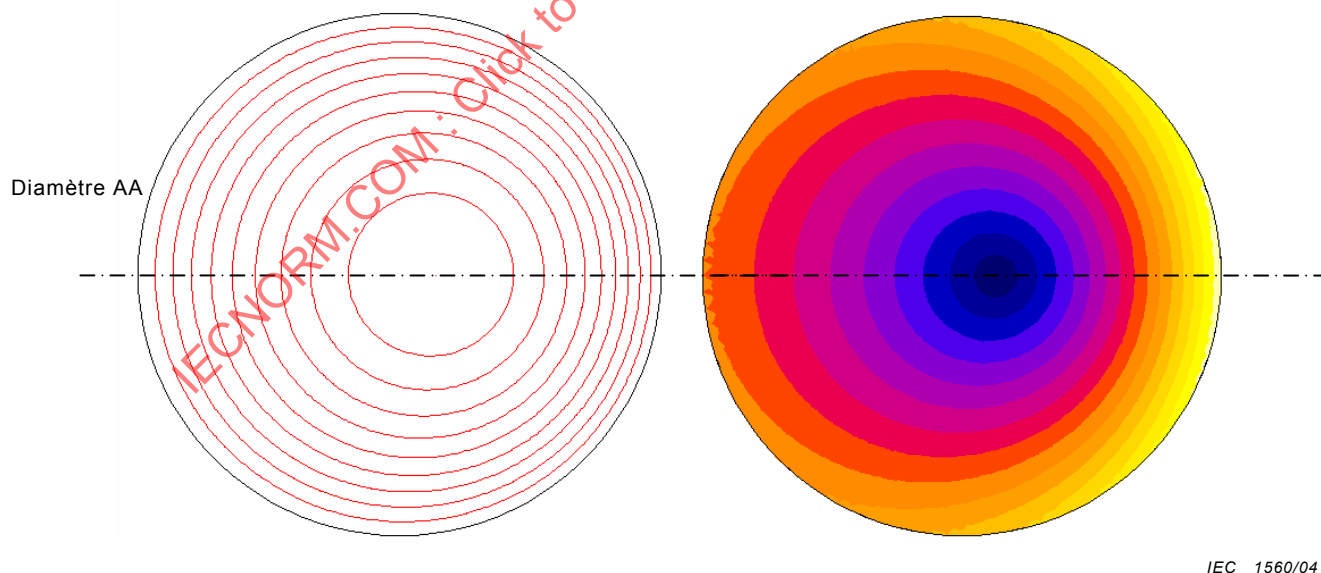


Figure B.5 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque (source: 1 fil, situé à $d = 100$ mm du bord du disque)

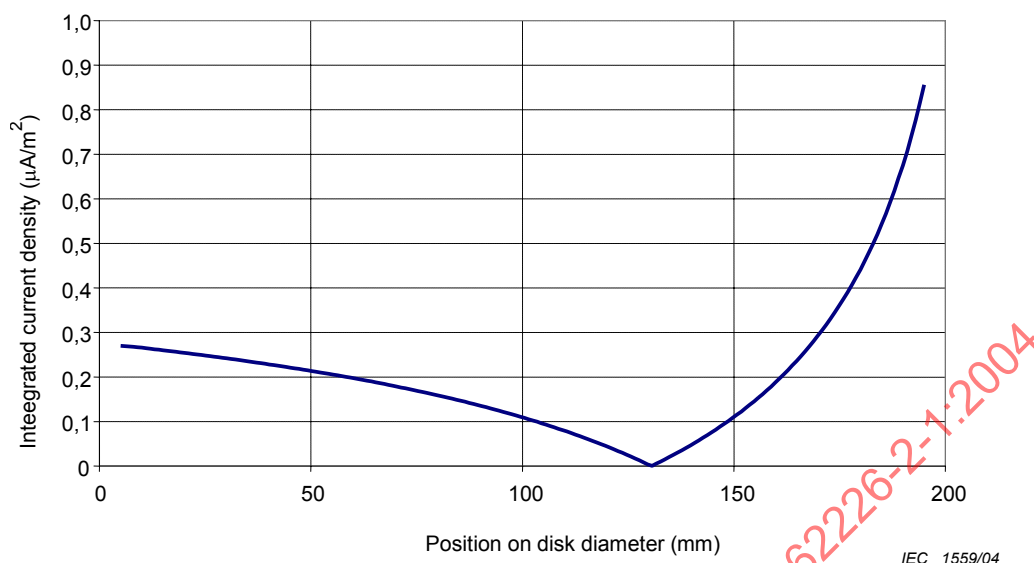


Figure B.4 – Distribution of integrated induced current density along the diameter AA of the disk (source: 1 wire, located at $d = 10$ mm from the edge of the disk)

B.1.1.2 Distance to the source $d = 100$ mm

Results of the computation of local induced currents in the disk are given hereunder in form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure B.5). The curve in Figure B.6 gives the numerical values of the distribution of the induced currents integrated over a surface of 1 cm^2 perpendicular to the induced current direction.

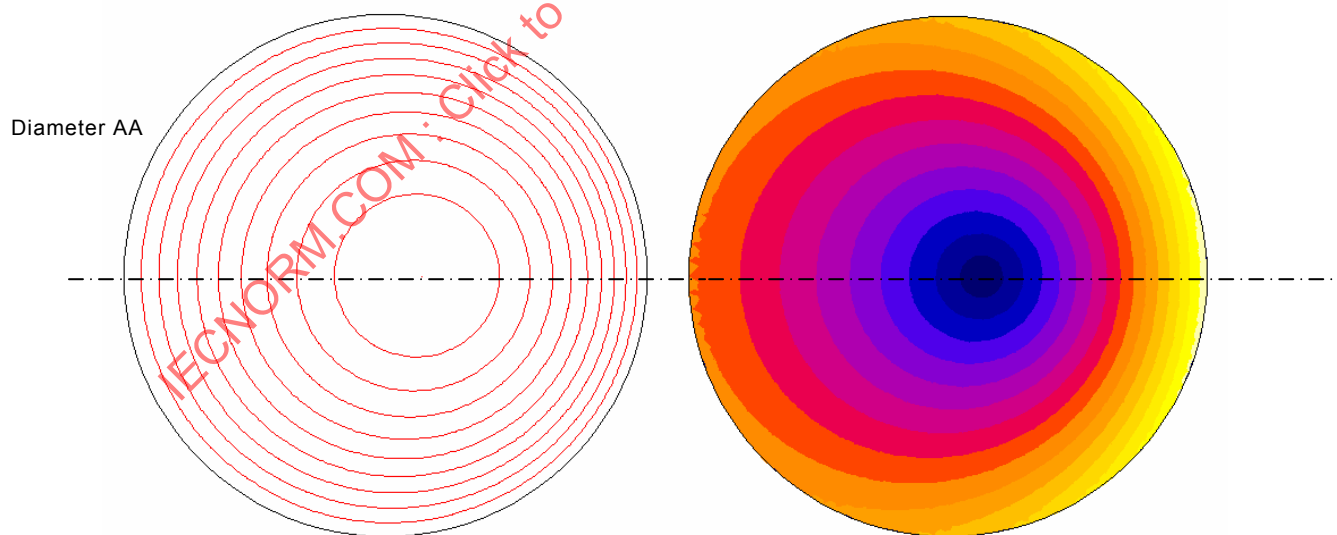
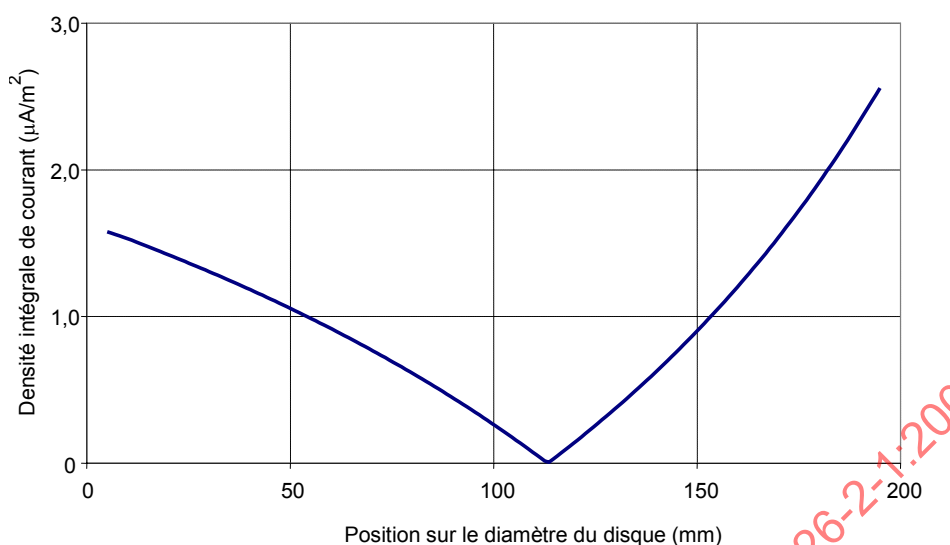


Figure B.5 – Current density lines J and distribution of J in the disk (source: 1 wire, located at $d = 100$ mm from the edge of the disk)



IEC 1561/04

Figure B.6 – Distribution de la densité intégrée de courant induit le long du diamètre AA du disque (source: 1 fil, situé à $d = 100$ mm du bord du disque)

B.1.1.3 Distance de la source $d = 1\,000$ mm

Les lignes de densité de courant J , la distribution de J dans le disque et la distribution de la densité de courant induit calculée sur le diamètre du disque sont très similaires à celles calculées numériquement dans le cas de champs uniformes (Annexe A).

Plus grande est la distance d entre la source et le disque, plus faible est la différence avec les résultats de calcul obtenus avec l'hypothèse de champ uniforme: dans le cas présent, $J_{i\max} = 0,353 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ est à comparer à la valeur calculée avec un champ uniforme ($J_{i\max} = 0,375 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$).

B.1.2 Valeurs calculées du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K

Les résultats du calcul du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K , en fonction de la distance d , sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques (voir Figures B.7 et B.8). Les valeurs numériques correspondantes sont données dans les Tableaux B.1 et B.2.

La distance d est la distance minimale entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source.

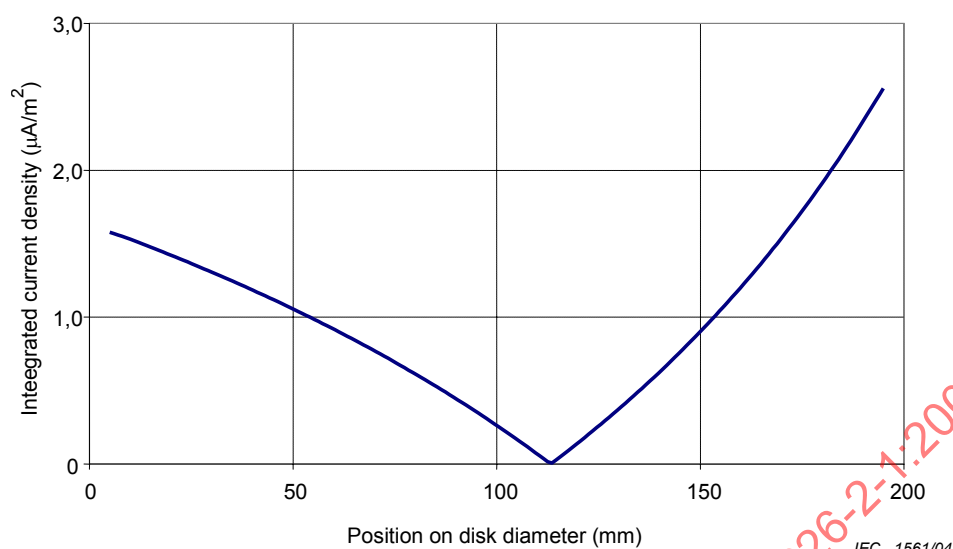


Figure B.6 – Distribution of integrated induced current density along the diameter AA of the disk (source: 1 wire, located at $d = 100$ mm from the edge of the disk)

B.1.1.3 Distance to the source $d = 1\,000$ mm

Current density lines J , distribution of J in the disk and distribution of induced current density calculated on the diameter of the disk are similar to those computed in the case of a uniform field (Annex A).

The higher is the distance d between the source and the disk, the lower is the difference with the computation results obtained with the hypothesis of uniform field: in the present case, $J_{i\max} = 0,353 \times 10^{-5}$ A/m², to be compared to the value calculated with a uniform field ($J_{i\max} = 0,375 \times 10^{-5}$ A/m²).

B.1.2 Calculated values of the coupling factor for non-uniform magnetic field K

Results of the computation of the coupling factor for non-uniform magnetic field K , as a function of the distance d , are given hereunder in a graphic form (see Figures B.7 and B.8). Corresponding numerical values are given in Tables B.1 and B.2.

The distance d is the minimum distance between the edge of the disk and the closer part of the source.

B.1.2.1 Calculs pour de courtes distances de la source: $0 < d < 300$ mm

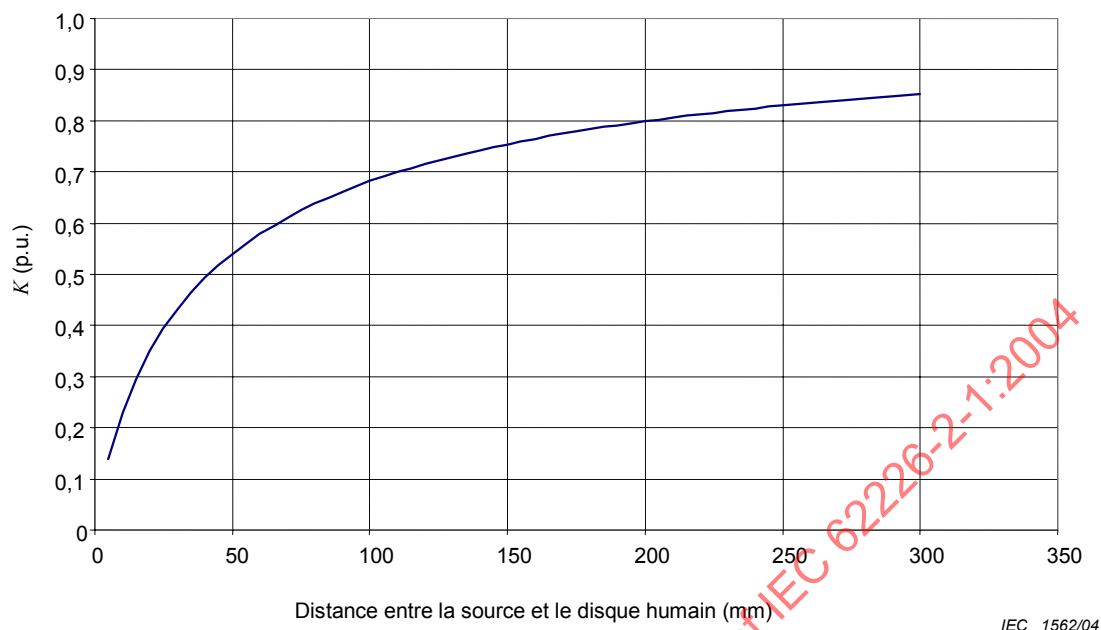


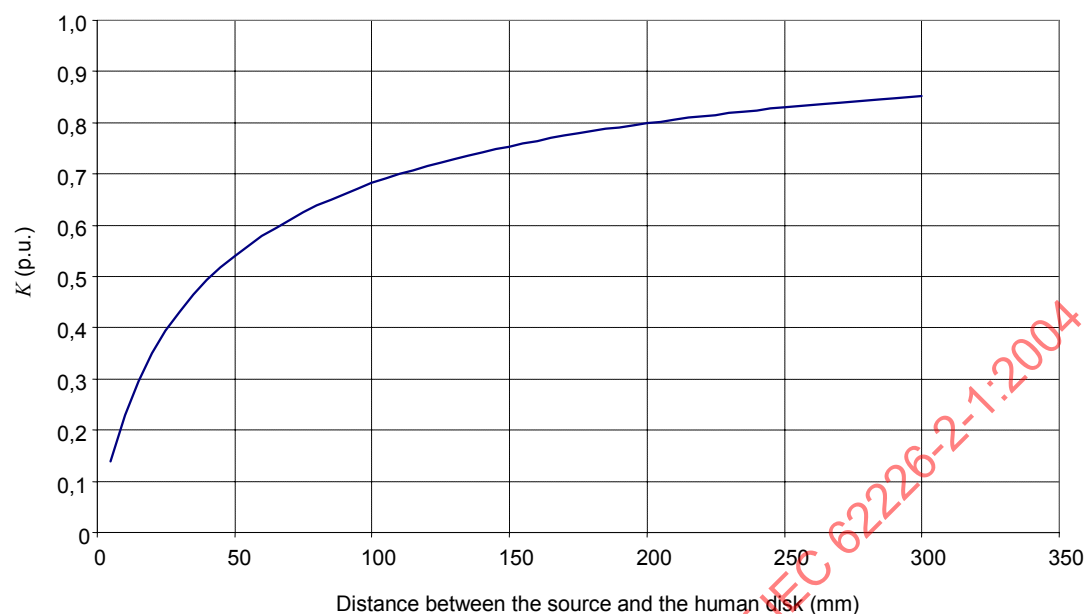
Figure B.7 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm)

Tableau B.1 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm)

Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K
10	0,229
20	0,350
30	0,432
40	0,492
50	0,540
60	0,579
70	0,611
80	0,638
90	0,661
100	0,682

Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K
110	0,700
120	0,716
130	0,730
140	0,743
150	0,754
160	0,765
170	0,775
180	0,783
190	0,792
200	0,799

Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K
210	0,806
220	0,813
230	0,819
240	0,824
250	0,830
260	0,835
270	0,839
280	0,844
290	0,848
300	0,852

B.1.2.1 Calculations for short distances to the source: $0 < d < 300$ mm

IEC 1562/04

Figure B.7 – Parametric curve of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)

Table B.1 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)

Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
10	0,229
20	0,350
30	0,432
40	0,492
50	0,540
60	0,579
70	0,611
80	0,638
90	0,661
100	0,682

Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
110	0,700
120	0,716
130	0,730
140	0,743
150	0,754
160	0,765
170	0,775
180	0,783
190	0,792
200	0,799

Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
210	0,806
220	0,813
230	0,819
240	0,824
250	0,830
260	0,835
270	0,839
280	0,844
290	0,848
300	0,852

B.1.2.2 Calculs pour des distances supérieures: $0 < d < 1\,900$ mm

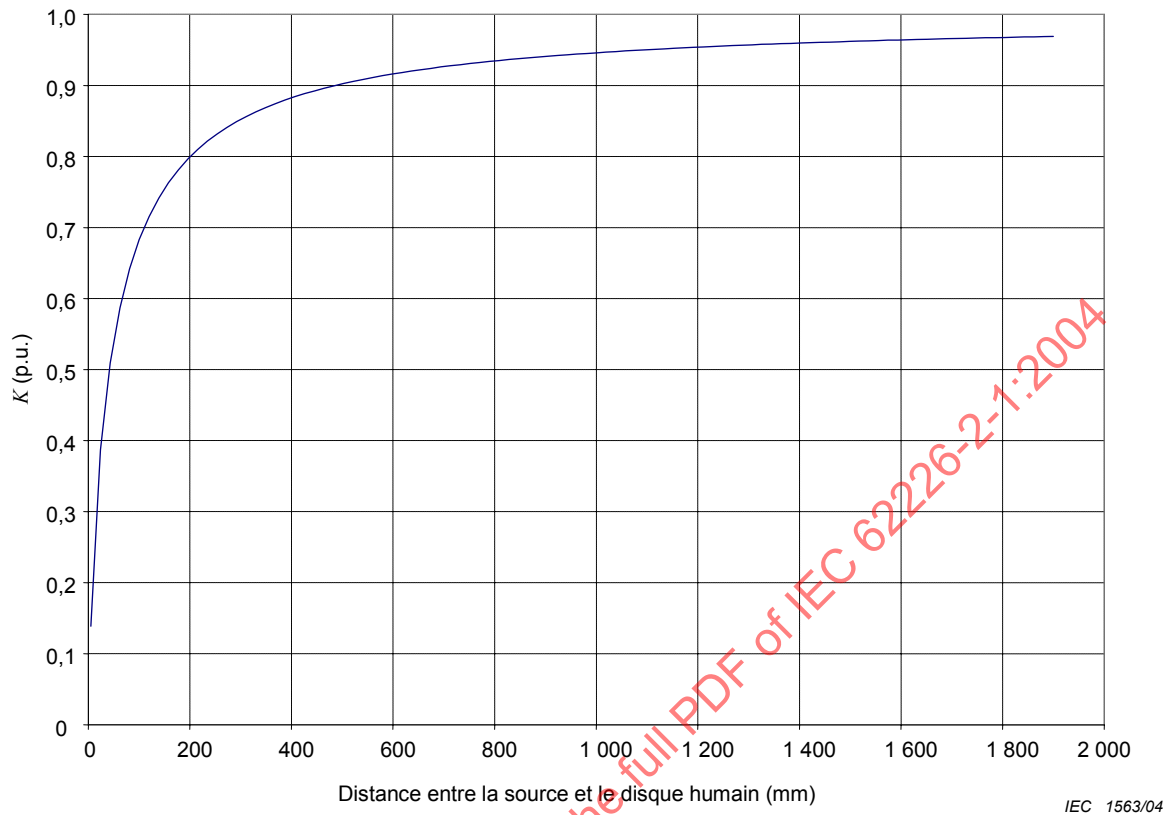


Figure B.8 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm)

Tableau B.2 – Valeur numérique du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 100$ mm)

Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K	Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K	Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K
5	0,139	656	0,922	1 307	0,957
43	0,509	694	0,926	1 345	0,958
82	0,642	732	0,929	1 383	0,959
120	0,715	771	0,932	1 421	0,960
158	0,763	809	0,935	1 460	0,961
196	0,797	847	0,938	1 498	0,962
235	0,821	886	0,940	1 536	0,963
273	0,841	924	0,942	1 575	0,964
311	0,856	962	0,944	1 613	0,964
350	0,869	1 000	0,946	1 651	0,965
388	0,879	1 039	0,948	1 689	0,966
426	0,888	1 077	0,949	1 728	0,966
464	0,896	1 115	0,951	1 766	0,967
503	0,903	1 153	0,952	1 804	0,968
541	0,908	1 192	0,954	1 843	0,968
579	0,914	1 230	0,955	1 881	0,969
618	0,918	1 268	0,956		

B.1.2.2 Calculations for higher distances: $0 < d < 1\,900$ mm

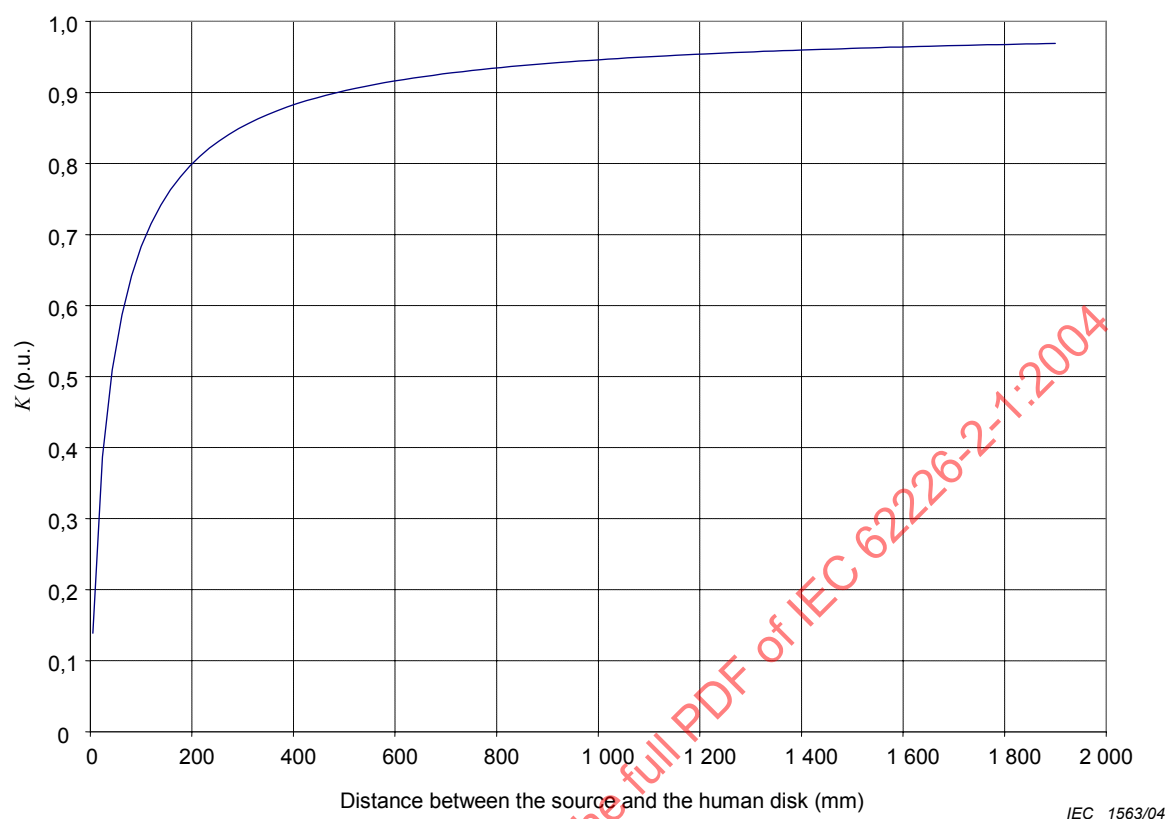


Figure B.8 – Parametric curve of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)

Table B.2 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 100$ mm)

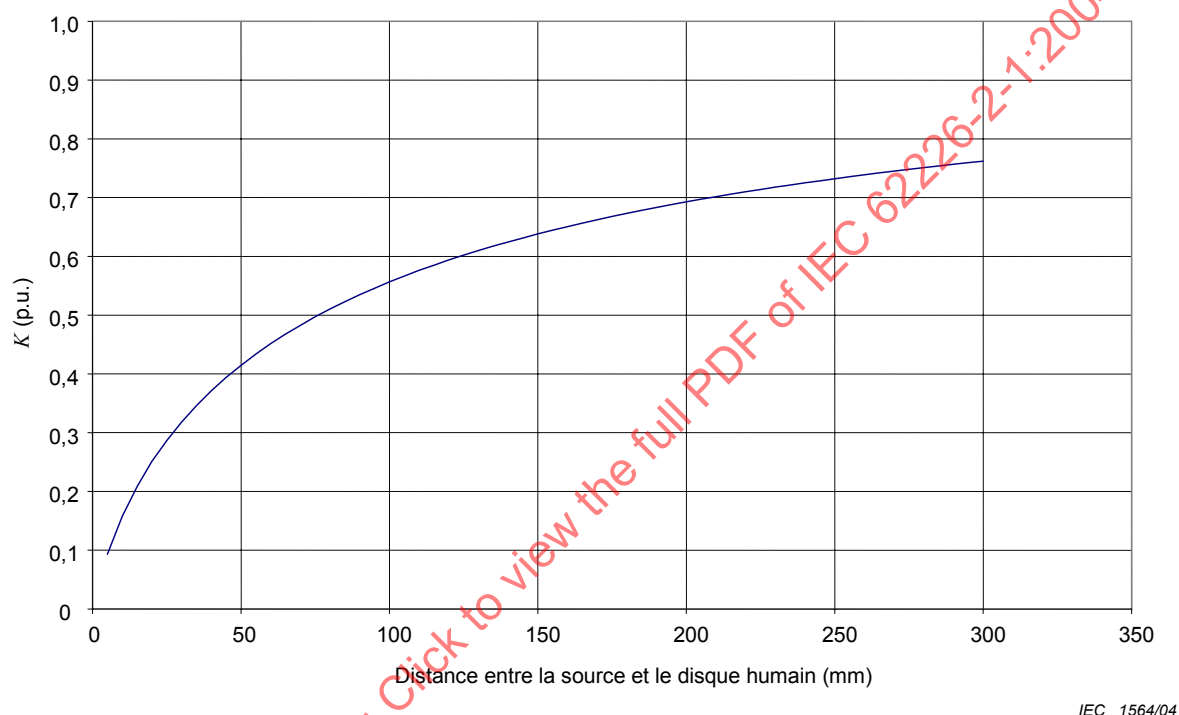
Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K	Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K	Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
5	0,139	656	0,922	1 307	0,957
43	0,509	694	0,926	1 345	0,958
82	0,642	732	0,929	1 383	0,959
120	0,715	771	0,932	1 421	0,960
158	0,763	809	0,935	1 460	0,961
196	0,797	847	0,938	1 498	0,962
235	0,821	886	0,940	1 536	0,963
273	0,841	924	0,942	1 575	0,964
311	0,856	962	0,944	1 613	0,964
350	0,869	1 000	0,946	1 651	0,965
388	0,879	1 039	0,948	1 689	0,966
426	0,888	1 077	0,949	1 728	0,966
464	0,896	1 115	0,951	1 766	0,967
503	0,903	1 153	0,952	1 804	0,968
541	0,908	1 192	0,954	1 843	0,968
579	0,914	1 230	0,955	1 881	0,969
618	0,918	1 268	0,956		

B.2 Calculs pour un disque conducteur de rayon $R = 200$ mm

Les résultats du calcul du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K , en fonction de la distance d , sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques (voir Figures B.9 et B.10). Les valeurs numériques correspondantes sont données dans les Tableaux B.3 et B.4.

La distance d est la distance minimale entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source.

B.2.1 Exposition pour de courtes distances à la source: $0 < d < 300$ mm



IEC 1564/04

Figure B.9 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200$ mm)

Tableau B.3 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200$ mm)

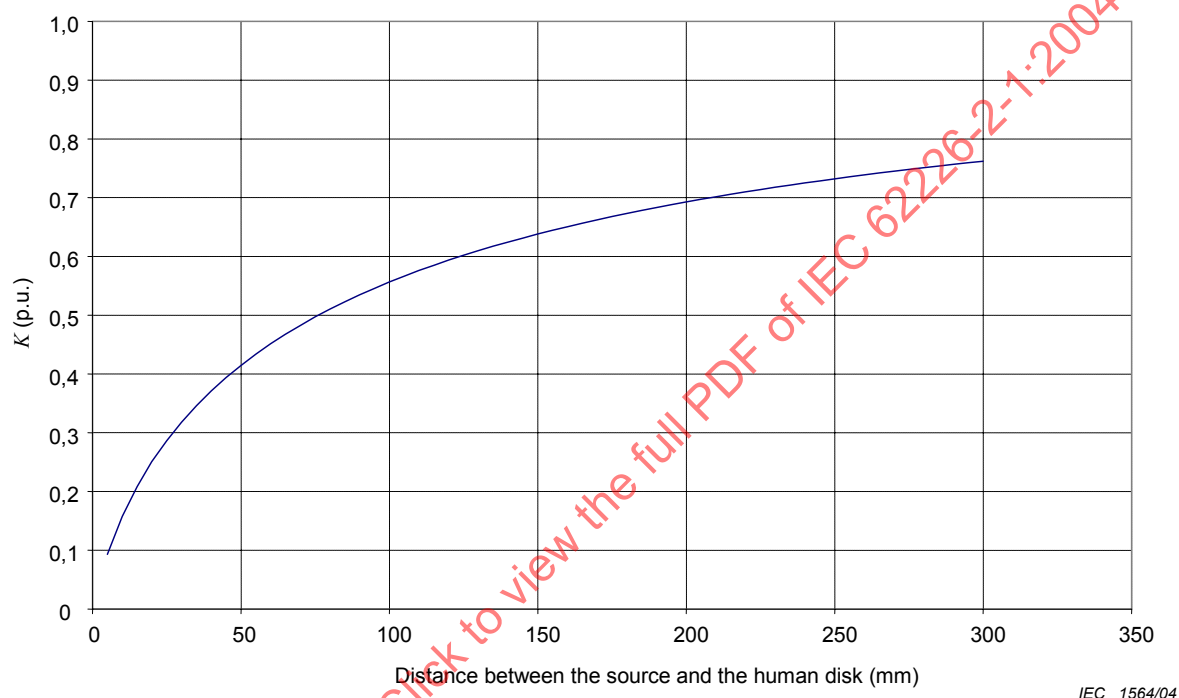
Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K	Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K	Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K
10	0,158	110	0,576	210	0,701
20	0,250	120	0,594	220	0,710
30	0,318	130	0,610	230	0,718
40	0,371	140	0,625	240	0,725
50	0,415	150	0,638	250	0,732
60	0,451	160	0,651	260	0,739
70	0,483	180	0,673	270	0,745
80	0,510	190	0,683	280	0,751
90	0,535	200	0,693	290	0,757
100	0,556			300	0,762

B.2 Calculations for a conductive disk with a radius $R = 200$ mm

Results of the computation of the coupling factor for non-uniform magnetic fields K , as a function of the distance d , are given hereunder in a graphic form (see Figures B.9 and B.10). Corresponding numerical values are given in Tables B.3 and B.4.

The distance d is the minimum distance between the edge of the disk and the closest part of the source.

B.2.1 Calculations for short distances to the source: $0 < d < 300$ mm



IEC 1564/04

Figure B.9 – Parametric curve of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)

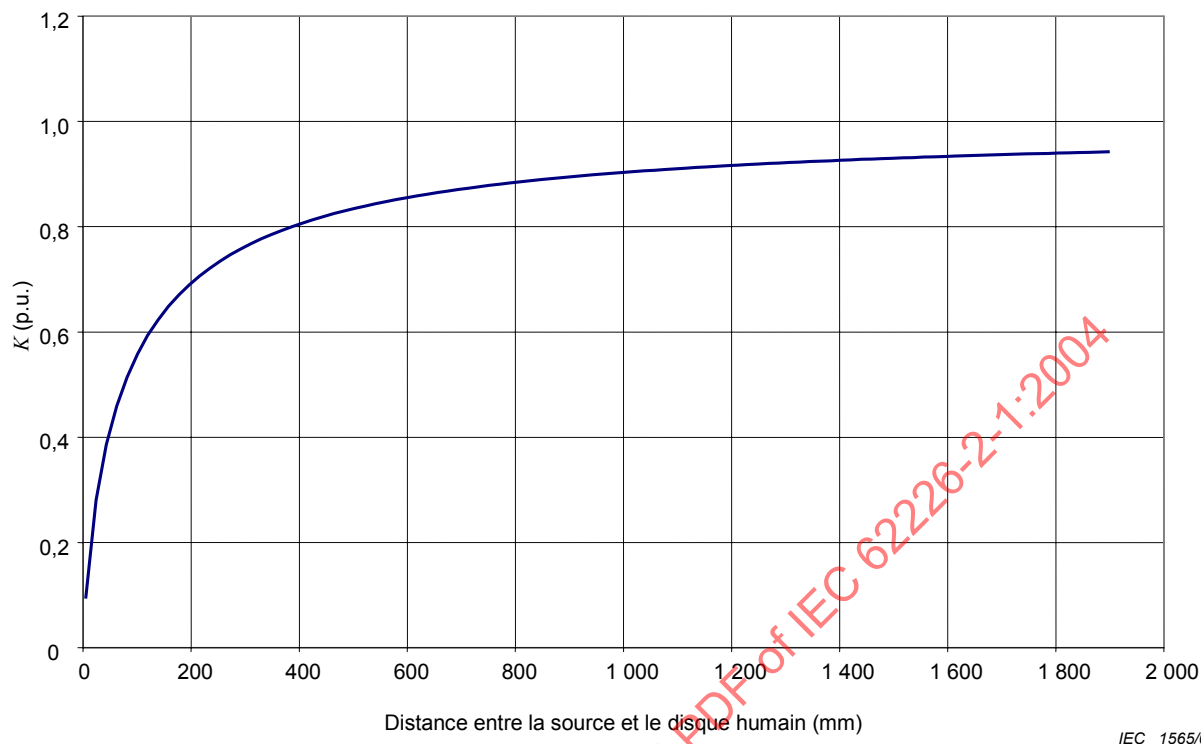
Table B.3 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)

Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
10	0,158
20	0,250
30	0,318
40	0,371
50	0,415
60	0,451
70	0,483
80	0,510
90	0,535
100	0,556

Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
110	0,576
120	0,594
130	0,610
140	0,625
150	0,638
160	0,651
180	0,673
190	0,683
200	0,693

Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
210	0,701
220	0,710
230	0,718
240	0,725
250	0,732
260	0,739
270	0,745
280	0,751
290	0,757
300	0,762

B.2.2 Calculs pour de plus grandes distances à la source: $0 < d < 1\,900\text{ mm}$



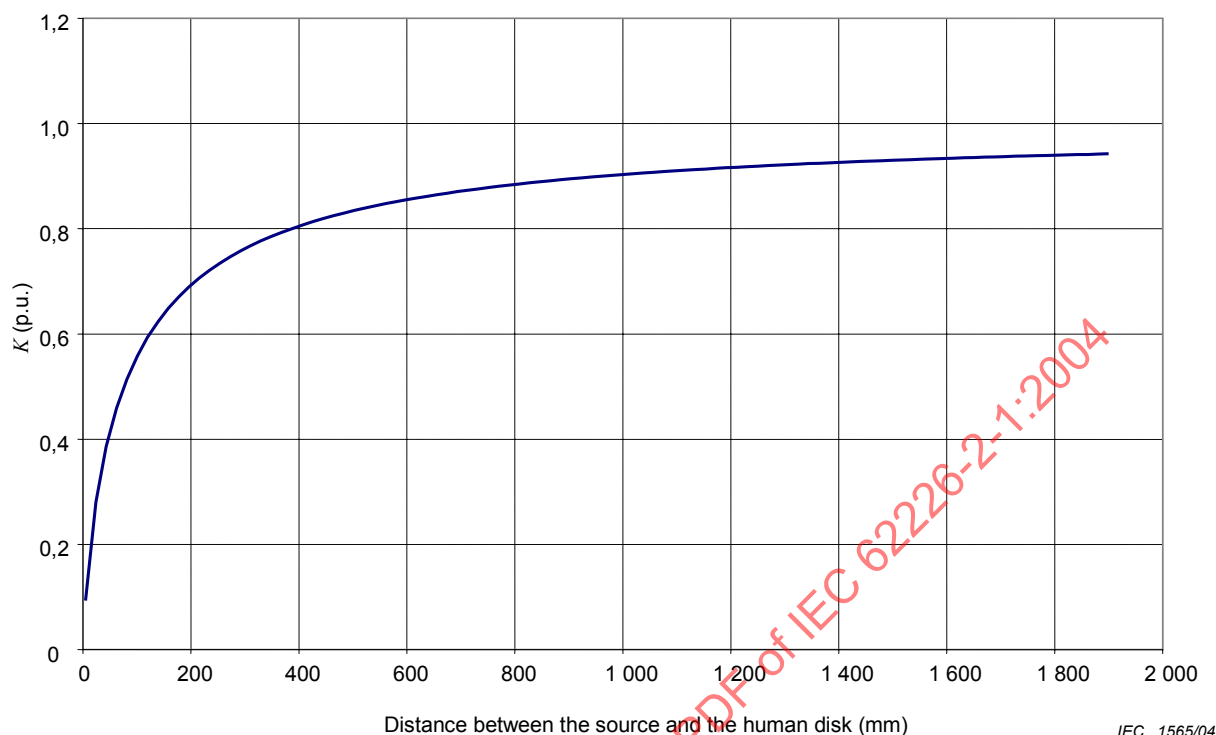
IEC 1565/04

Figure B.10 – Courbe paramétrique du facteur K pour des distances jusqu'à $1\,900\text{ mm}$ d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200\text{ mm}$)

Tableau B.4 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à $1\,900\text{ mm}$ d'une source consistant en un fil de longueur infinie (disque: $R = 200\text{ mm}$)

Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K	Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K	Distance entre la source et le disque mm	Facteur de couplage K
43	0,386	771	0,881	1 345	0,924
120	0,593	809	0,885	1 383	0,925
196	0,689	847	0,889	1 421	0,927
273	0,747	886	0,893	1 460	0,929
330	0,777	924	0,897	1 498	0,930
350	0,785	962	0,900	1 536	0,931
369	0,793	1 000	0,903	1 575	0,933
388	0,800	1 039	0,906	1 594	0,933
426	0,813	1 077	0,909	1 651	0,935
464	0,825	1 115	0,911	1 689	0,937
503	0,835	1 153	0,914	1 709	0,937
541	0,843	1 192	0,916	1 766	0,939
579	0,851	1 211	0,917	1 804	0,940
618	0,858	1 230	0,918	1 843	0,941
656	0,865	1 249	0,919	1 881	0,942
694	0,871	1 268	0,920		
732	0,876	1 307	0,922		

B.2.2 Calculations for higher distances to the source : $0 < d < 1\,900$ mm



IEC 1565/04

Figure B.10 – Parametric curve of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)

Table B.4 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of an infinitely long wire (disk: $R = 200$ mm)

Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K	Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K	Distance between the source and the disk mm	Coupling factor K
43	0,386	771	0,881	1 345	0,924
120	0,593	809	0,885	1 383	0,925
196	0,689	847	0,889	1 421	0,927
273	0,747	886	0,893	1 460	0,929
330	0,777	924	0,897	1 498	0,930
350	0,785	962	0,900	1 536	0,931
369	0,793	1 000	0,903	1 575	0,933
388	0,800	1 039	0,906	1 594	0,933
426	0,813	1 077	0,909	1 651	0,935
464	0,825	1 115	0,911	1 689	0,937
503	0,835	1 153	0,914	1 709	0,937
541	0,843	1 192	0,916	1 766	0,939
579	0,851	1 211	0,917	1 804	0,940
618	0,858	1 230	0,918	1 843	0,941
656	0,865	1 249	0,919	1 881	0,942
694	0,871	1 268	0,920		
732	0,876	1 307	0,922		

Annexe C (normative)

Disque dans un champ créé par 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés

Les courants induits sont calculés dans un disque de conductivité homogène. Afin de permettre la comparaison entre les différentes configurations de sources de champ (en fonction de la géométrie de la source et de la distance par rapport au disque), les valeurs normalisées suivantes ont été choisies:

- f , fréquence = 50 Hz (voir Note 2 de 3.5);
- B , densité de flux magnétique = 1,25 μT , au bord du disque au plus proche de la source de champ;
- R , rayon du disque conducteur = 100 mm et 200 mm;
- σ , conductivité (homogène) = 0,2 S/m.

Dans cette annexe, le champ magnétique est créé par un ensemble de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (ces fils rectilignes et infiniment long sont une représentation simplifiée d'une ligne de transmission ou de distribution électrique). Le disque conducteur et la source de champ sont situés dans le même plan, à une distance d et les 2 fils sont séparés par une distance e (voir Figure C.1).

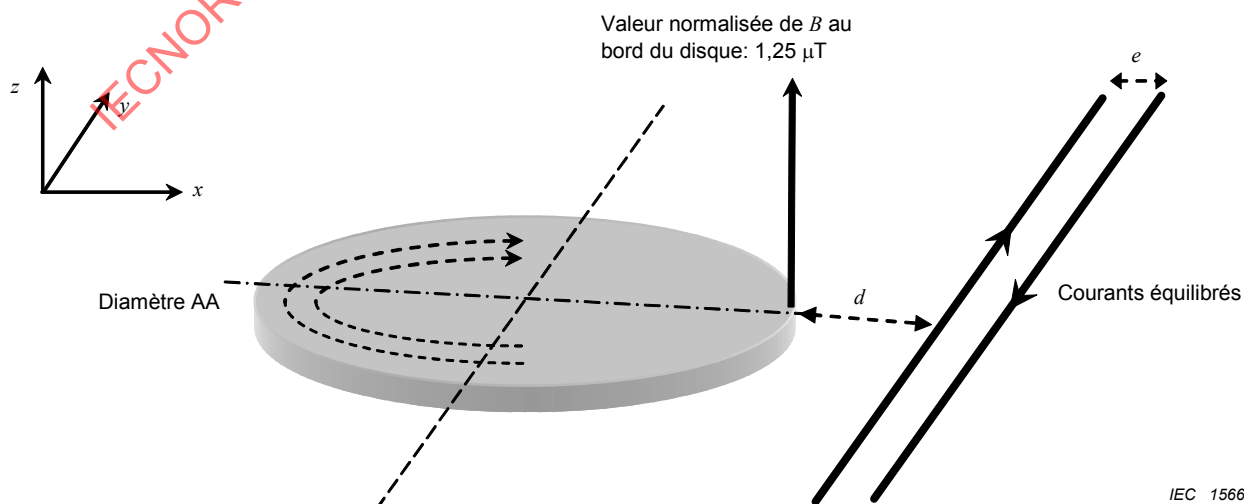
L'évolution du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K est étudiée par rapport à la distance d pour:

- une exposition proche de la source: $0 < d < 300$ mm;
- une exposition à une distance plus grande $0 < d < 1\,900$ mm.

Pour chaque distance d , le facteur K est calculé pour 5 distances e différentes entre les 2 fils: 5 mm, 10 mm, 20 mm, 40 mm et 80 mm.

Pour les illustrations, 3 résultats de calcul numérique sont présentés, correspondant à 3 distances d entre le disque et les fils ($d = 7,5$ mm, 97,5 mm et 900 mm), et avec $e = 5$ mm.

NOTE d est la distance entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source, c'est-à-dire le fil le plus proche. Considérant la distance entre les fils ($e = 5$ mm), une valeur $d = 7,5$ mm correspond à une distance de 10 mm entre le bord du disque et l'axe médian des 2 fils.



IEC 1566/04

Figure C.1 – Disque conducteur dans un champ magnétique créé par 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés

Annex C (normative)

Disk in a field created by 2 parallel wires with balanced currents

The induced currents are calculated in a disk of homogeneous conductivity. In order to allow comparison between different field sources configurations (depending on the geometry of the source and distance to the disk) the following standard values have been chosen:

- f , frequency = 50 Hz (see Note 2 in 3.5);
- B , magnetic flux density = $1,25 \mu\text{T}$, at the edge of the disk closer to the field source;
- R , radius of the conductive disk = 100 mm and 200 mm;
- σ , conductivity (homogeneous) = $0,2 \text{ S/m}$.

In this annex, the magnetic field is generated by a set of 2 parallel wires with balanced currents (these straight and infinitely long wires are a simplified representation of an electrical transmission or distribution line). The conductive disk and the field source are located in the same plane, at a distance d , and the 2 wires are separated by a distance e (see Figure C.1).

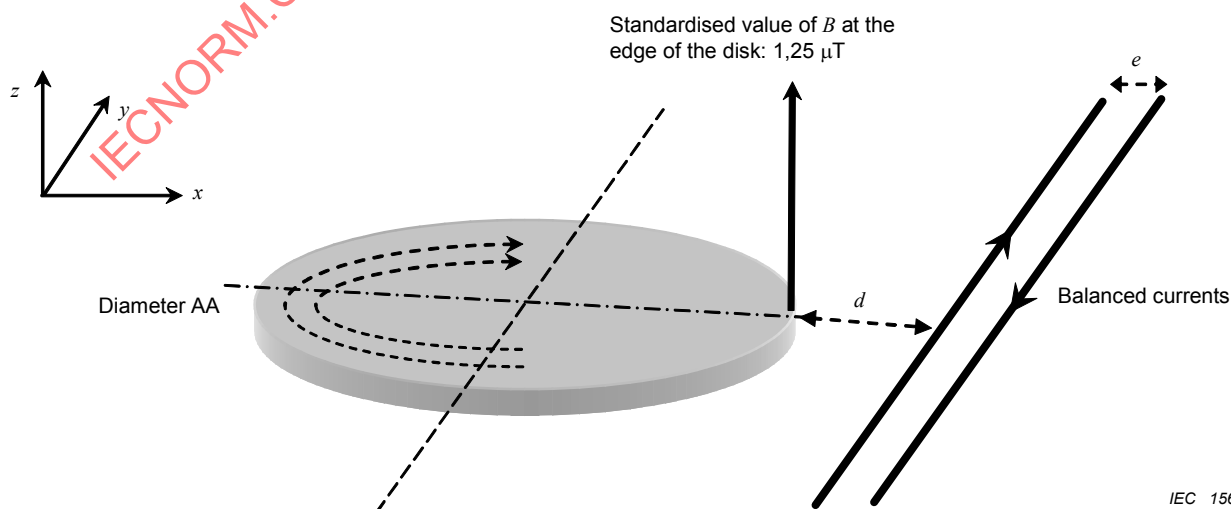
The evolution of the coupling factor for non-uniform magnetic field K is studied with regard to the distance d for:

- exposure close to the source: $0 < d < 300 \text{ mm}$;
- exposure at higher distance $0 < d < 1\,900 \text{ mm}$.

For each distance d , the factor K is calculated for 5 different distances e between the 2 wires: 5 mm, 10 mm, 20 mm, 40 mm and 80 mm.

For illustrations, three results of computation are presented, corresponding to 3 distances d between the disk and the wires ($d = 7,5 \text{ mm}$, $97,5 \text{ mm}$ and 900 mm), and with $e = 5 \text{ mm}$.

NOTE d is the distance between the edge of the disk and the closest part of the source, i.e. the closest wire. Considering the distance between the wires ($e = 5 \text{ mm}$), a value $d = 7,5 \text{ mm}$ corresponds to a distance of 10 mm between the edge of the disk and the median axis of the 2 wires.



IEC 1566/04

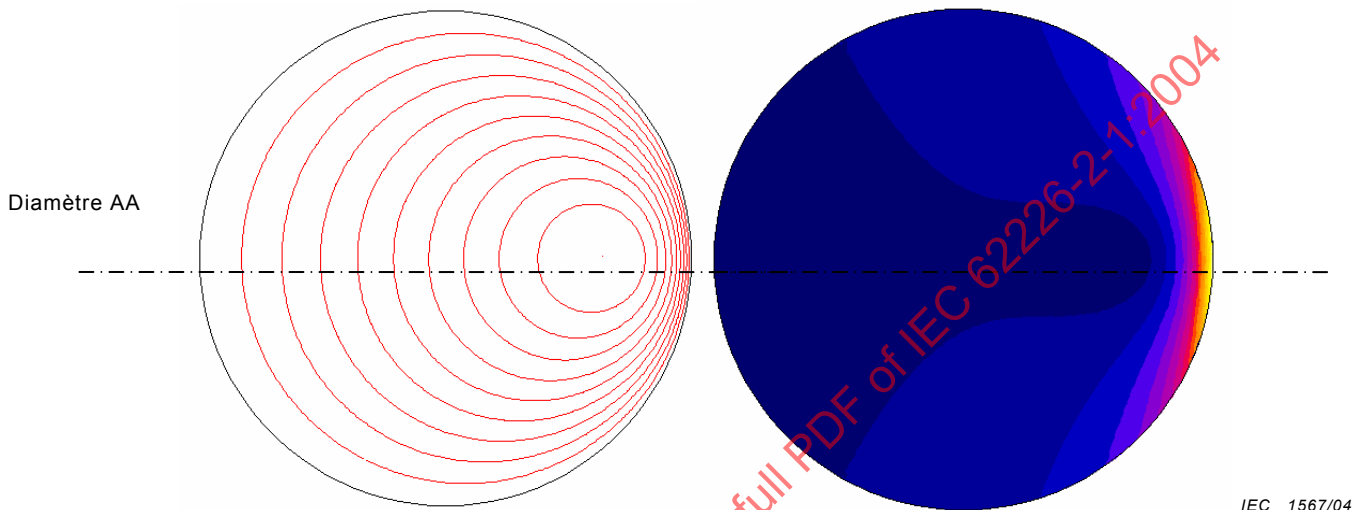
**Figure C.1 – Conductive disk in the magnetic field generated
by 2 parallel wires with balanced currents**

C.1 Calculs pour un disque conducteur de rayon $R = 100$ mm

C.1.1 Exemples de calcul de courants induits dans le disque

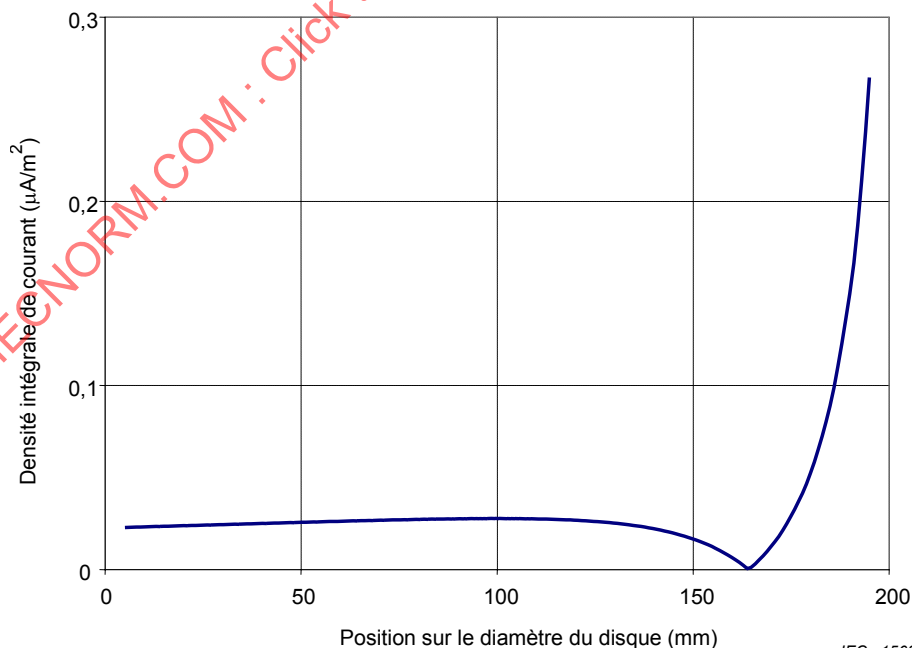
C.1.1.1 Distance à la source $d = 7,5$ mm

Les résultats du calcul des courants induits locaux dans le disque sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure C.2). La courbe de la Figure C.3 donne les valeurs numériques de la distribution des courants induits intégrés sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant induit.



IEC 1567/04

Figure C.2 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque
(source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, séparés par 5 mm, situés à $d = 7,5$ mm du bord du disque)



IEC 1568/04

Figure C.3 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit
calculée le long du diamètre AA du disque (source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, situés à $d = 7,5$ mm du bord du disque)

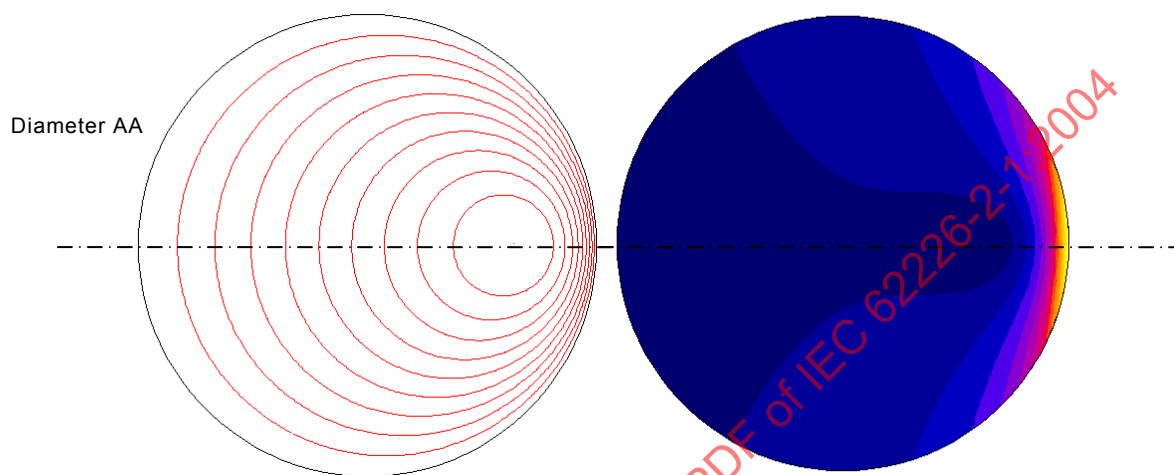
NOTE Le diamètre AA est situé comme illustré aux Figures C.1 et C.2.

C.1 Calculations for a conductive disk with a radius $R = 100$ mm

C.1.1 Examples of calculation of induced currents in the disk

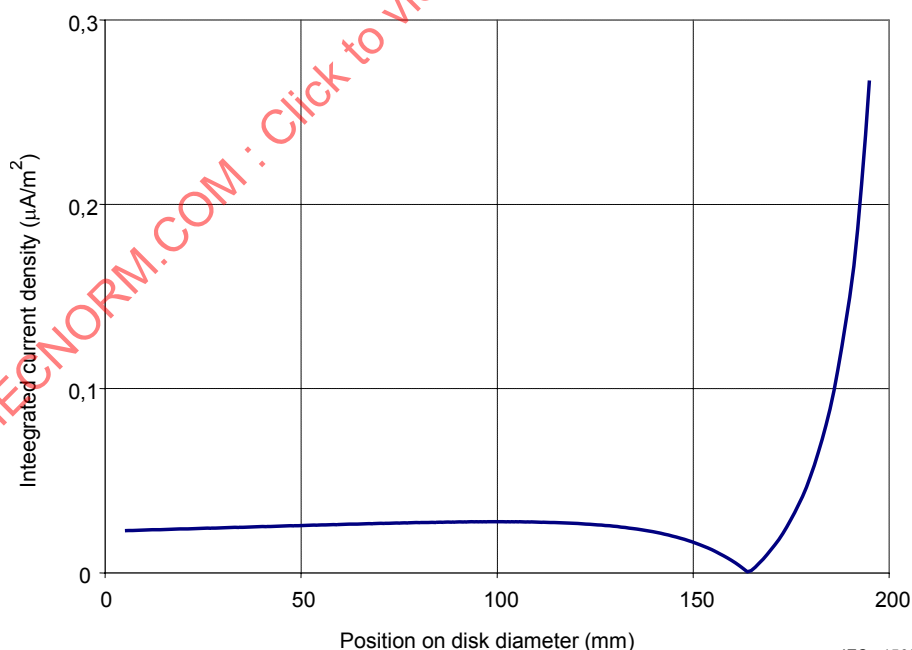
C.1.1.1 Distance to the source $d = 7,5$ mm

Results of the computation of local induced currents in the disk are given hereunder in form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure C.2). The curve in Figure C.3 gives the numerical values of the distribution of the induced currents integrated over a surface of 1 cm^2 perpendicular to the induced current direction.



IEC 1567/04

Figure C.2 – Current density lines J and distribution of J in the disk
(source: 2 parallel wires with balanced currents, separated by 5 mm,
located at $d = 7,5$ mm from the edge of the disk)



IEC 1568/04

Figure C.3 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk
(source: 2 parallel wires with balanced currents, separated by 5 mm,
located at $d = 7,5$ mm from the edge of the disk)

NOTE The diameter AA is located as illustrated in Figures C.1 and C.2.

C.1.1.2 Distance à la source $d = 97,5$ mm

Les résultats du calcul des courants induits locaux dans le disque sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure C.4). La courbe de la Figure C.5 donne les valeurs numériques de la distribution des courants induits intégrés sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant induit.

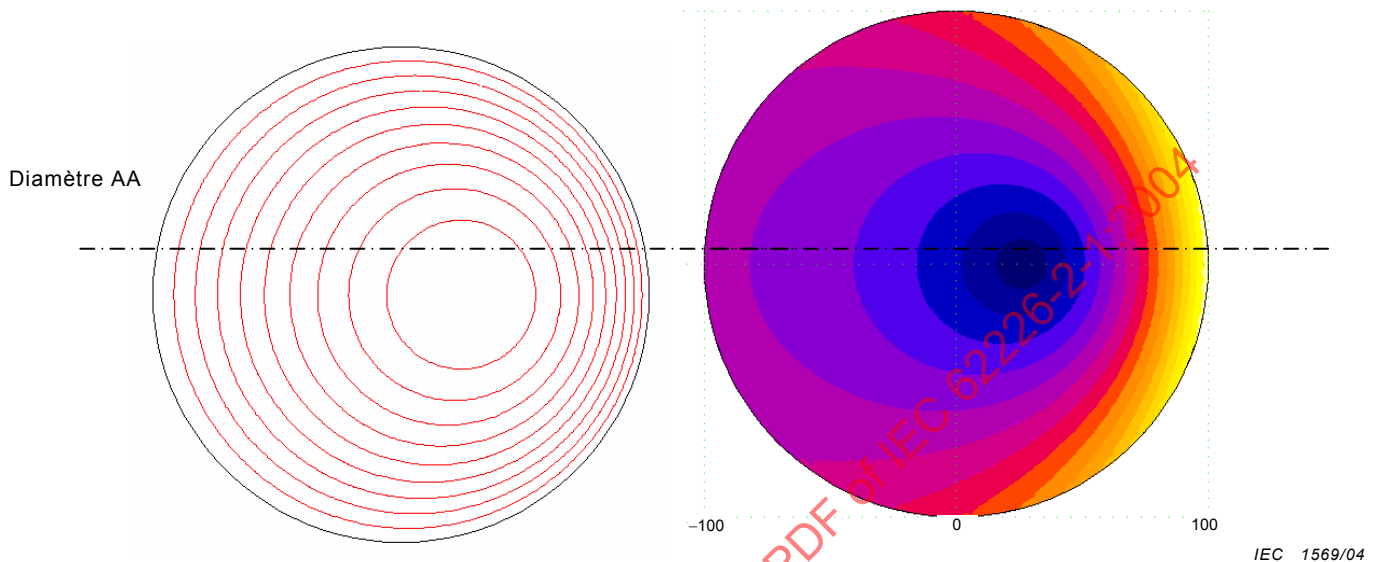


Figure C.4 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque
(source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, séparés par 5 mm, situés à $d = 97,5$ mm du bord du disque)

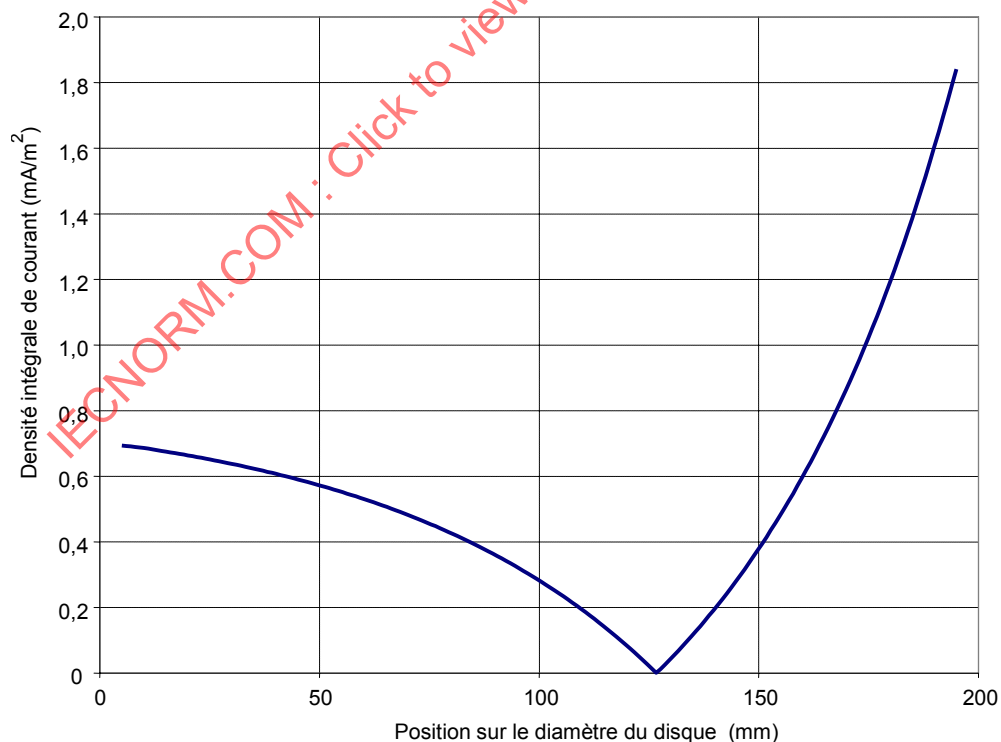
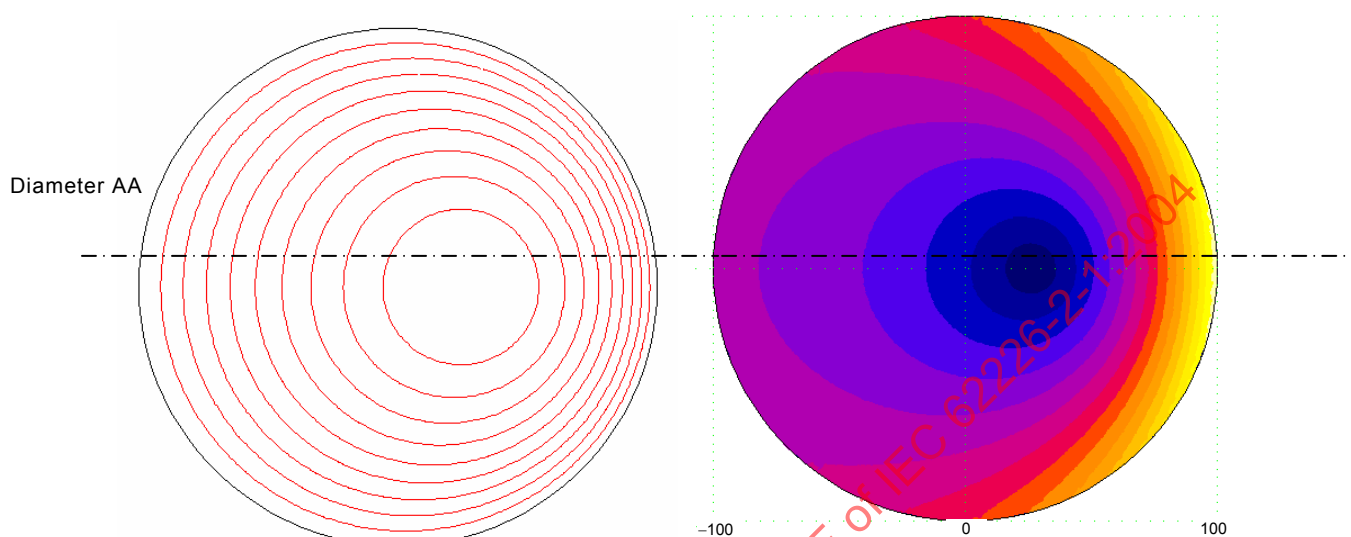


Figure C.5 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit calculée le long du diamètre AA du disque
(source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés, séparés par 5 mm, situés à $d = 97,5$ mm du bord du disque)

NOTE Le diamètre AA est situé comme illustré aux Figures C.1 et C.4.

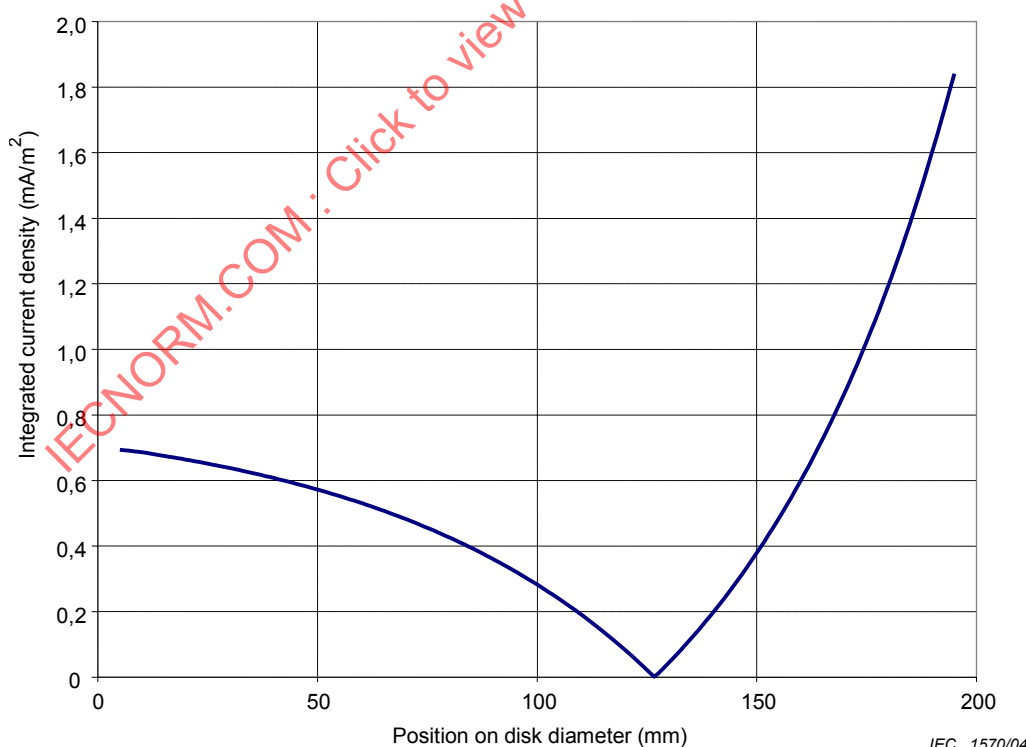
C.1.1.2 Distance to the source $d = 97,5$ mm

Results of the computation of local induced currents in the disk are given hereunder in form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure C.4). The curve in Figure C.5 gives the numerical values of distribution of the induced currents integrated over a surface of 1 cm^2 perpendicular to the induced current direction.



IEC 1569/04

Figure C.4– Current density lines J and distribution of J in the disk
(source: 2 parallel wires with balanced currents separated by 5 mm, located at $d = 97,5$ mm from the edge of the disk)



IEC 1570/04

Figure C.5 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk
(source: 2 parallel wires with balanced currents separated by 5 mm, located at $d = 97,5$ mm from the edge of the disk)

NOTE The diameter AA is located as illustrated in Figures C.1 and C.4.

C.1.1.3 Distance à la source $d = 900$ mm

Les résultats de calcul numérique sont similaires au cas donné en B.1.1.3 (configuration à un seul fil).

C.1.2 Valeurs calculées du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K

Les résultats du calcul du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K , en fonction de la distance d , sont donnés ci-dessous sous forme de courbes paramétriques, pour différentes valeurs de distances entre les 2 fils (paramètre e): voir Figures C.6 et C.7. Les valeurs numériques correspondantes sont données dans les Tableaux C.1 et C.2.

La distance d est la distance minimale entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source (c'est-à-dire le fil le plus proche).

C.1.2.1 Courtes distances à la source: $0 < d < 300$ mm

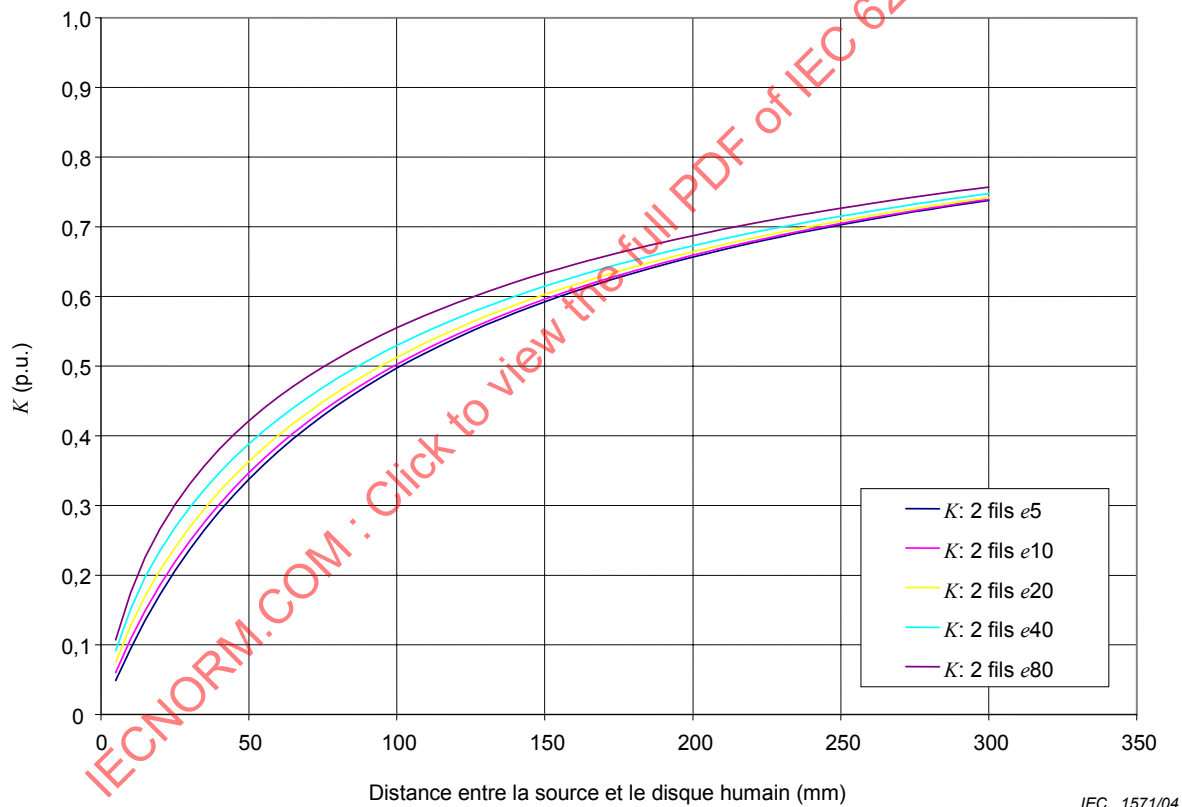


Figure C.6 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 100$ mm)

C.1.1.3 Distance to the source $d = 900$ mm

Computation results are similar to the case given in B.1.1.3 (one-wire configuration).

C.1.2 Calculated values of the coupling factor for non-uniform magnetic field K

Results of the computation of the coupling factor for non-uniform magnetic fields K , as a function of the distance d , are given hereunder in form of parametric curves, for different values of distances between the 2 wires (parameter e): see Figures C.6 and C.7. Corresponding numerical values are given in Tables C.1 and C.2.

The distance d is the minimum distance between the edge of the disk and the closest part of the source (i.e. the closest wire).

C.1.2.1 Short distances to the source: $0 < d < 300$ mm

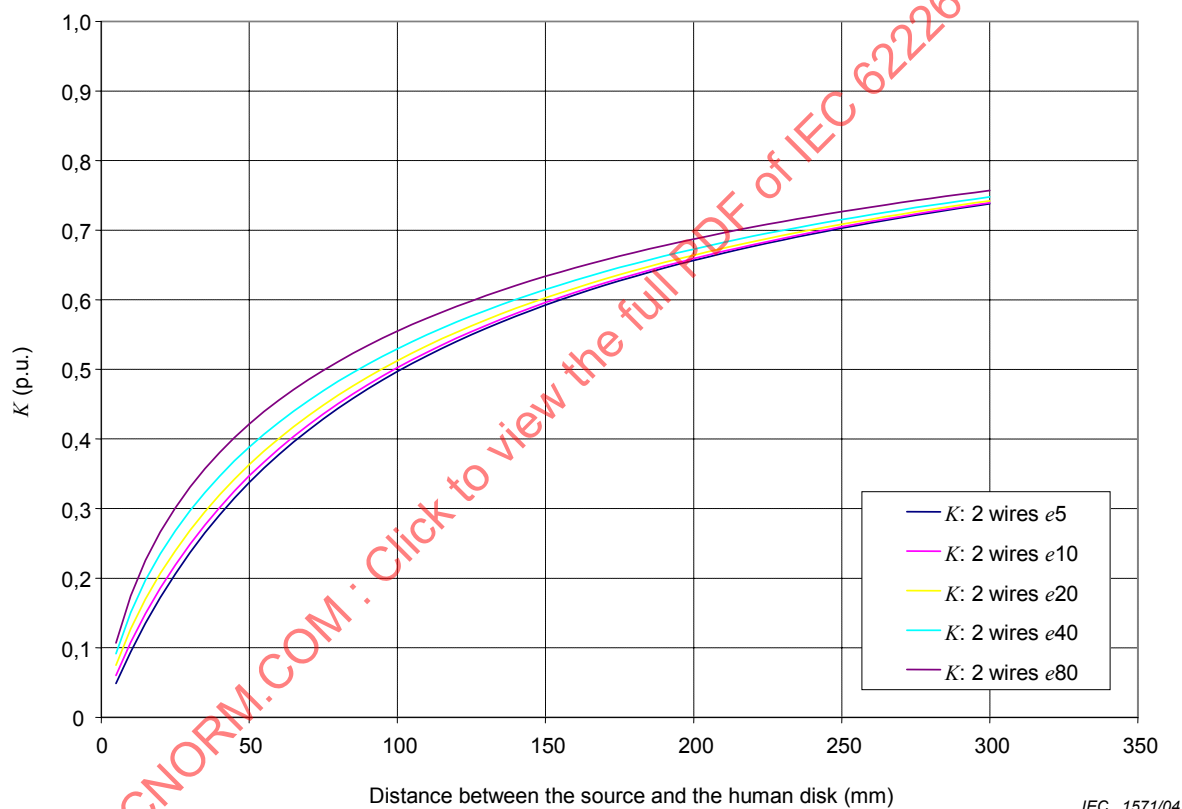


Figure C.6 – Parametric curves of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 100$ mm)

Tableau C.1 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 100$ mm)

Distance entre la source et le disque mm	Source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés séparés par une distance e				
	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
10	0,094	0,108	0,127	0,151	0,175
20	0,172	0,186	0,207	0,235	0,267
30	0,237	0,249	0,269	0,297	0,331
40	0,291	0,302	0,320	0,347	0,381
50	0,337	0,347	0,363	0,388	0,421
60	0,378	0,386	0,401	0,424	0,456
70	0,413	0,420	0,434	0,455	0,485
80	0,444	0,451	0,463	0,483	0,511
90	0,472	0,478	0,489	0,507	0,534
100	0,497	0,502	0,513	0,530	0,555
110	0,520	0,525	0,534	0,550	0,574
120	0,540	0,545	0,553	0,568	0,591
130	0,559	0,563	0,571	0,585	0,606
140	0,576	0,580	0,588	0,600	0,620
150	0,592	0,596	0,603	0,615	0,634
160	0,607	0,610	0,617	0,628	0,646
170	0,621	0,624	0,630	0,640	0,657
180	0,634	0,636	0,642	0,652	0,668
190	0,645	0,648	0,653	0,663	0,678
200	0,657	0,659	0,664	0,673	0,687
210	0,667	0,669	0,674	0,682	0,696
220	0,677	0,679	0,683	0,691	0,704
230	0,686	0,688	0,692	0,700	0,712
240	0,695	0,697	0,701	0,708	0,720
250	0,703	0,705	0,708	0,715	0,727
260	0,711	0,712	0,716	0,722	0,733
270	0,718	0,720	0,723	0,729	0,740
280	0,725	0,727	0,730	0,736	0,746
290	0,732	0,733	0,736	0,742	0,751
300	0,738	0,739	0,742	0,748	0,757

**Table C.1 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents
(homogeneous disk: $R = 100$ mm)**

Distance between the source and the disk mm	Source: 2 parallel wires with balanced currents separated by a distance e				
	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
10	0,094	0,108	0,127	0,151	0,175
20	0,172	0,186	0,207	0,235	0,267
30	0,237	0,249	0,269	0,297	0,331
40	0,291	0,302	0,320	0,347	0,381
50	0,337	0,347	0,363	0,388	0,421
60	0,378	0,386	0,401	0,424	0,456
70	0,413	0,420	0,434	0,455	0,485
80	0,444	0,451	0,463	0,483	0,511
90	0,472	0,478	0,489	0,507	0,534
100	0,497	0,502	0,513	0,530	0,555
110	0,520	0,525	0,534	0,550	0,574
120	0,540	0,545	0,553	0,568	0,591
130	0,559	0,563	0,571	0,585	0,606
140	0,576	0,580	0,588	0,600	0,620
150	0,592	0,596	0,603	0,615	0,634
160	0,607	0,610	0,617	0,628	0,646
170	0,621	0,624	0,630	0,640	0,657
180	0,634	0,636	0,642	0,652	0,668
190	0,645	0,648	0,653	0,663	0,678
200	0,657	0,659	0,664	0,673	0,687
210	0,667	0,669	0,674	0,682	0,696
220	0,677	0,679	0,683	0,691	0,704
230	0,686	0,688	0,692	0,700	0,712
240	0,695	0,697	0,701	0,708	0,720
250	0,703	0,705	0,708	0,715	0,727
260	0,711	0,712	0,716	0,722	0,733
270	0,718	0,720	0,723	0,729	0,740
280	0,725	0,727	0,730	0,736	0,746
290	0,732	0,733	0,736	0,742	0,751
300	0,738	0,739	0,742	0,748	0,757

C.1.2.2 Distances à la source: $0 < d < 1\,900$ mm

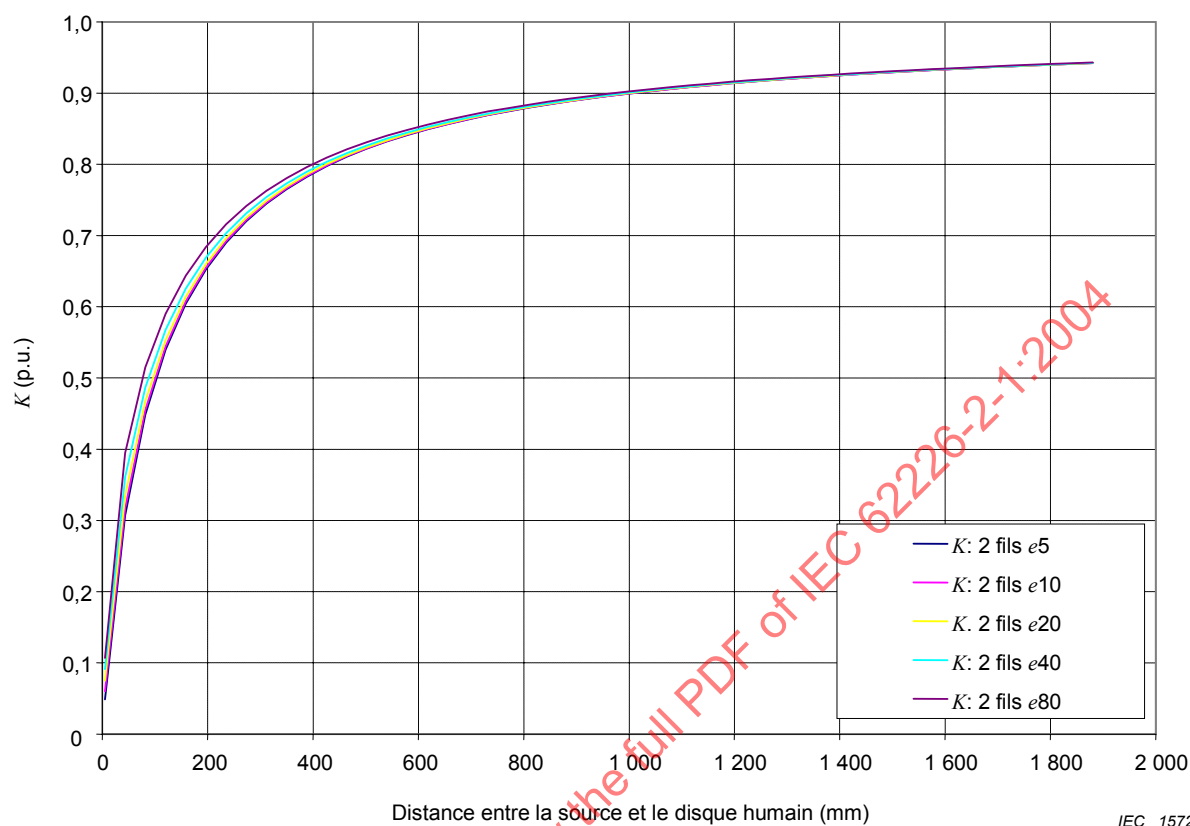


Figure C.7 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 100$ mm)

C.1.2.2 Distances to the source: $0 < d < 1\,900$ mm

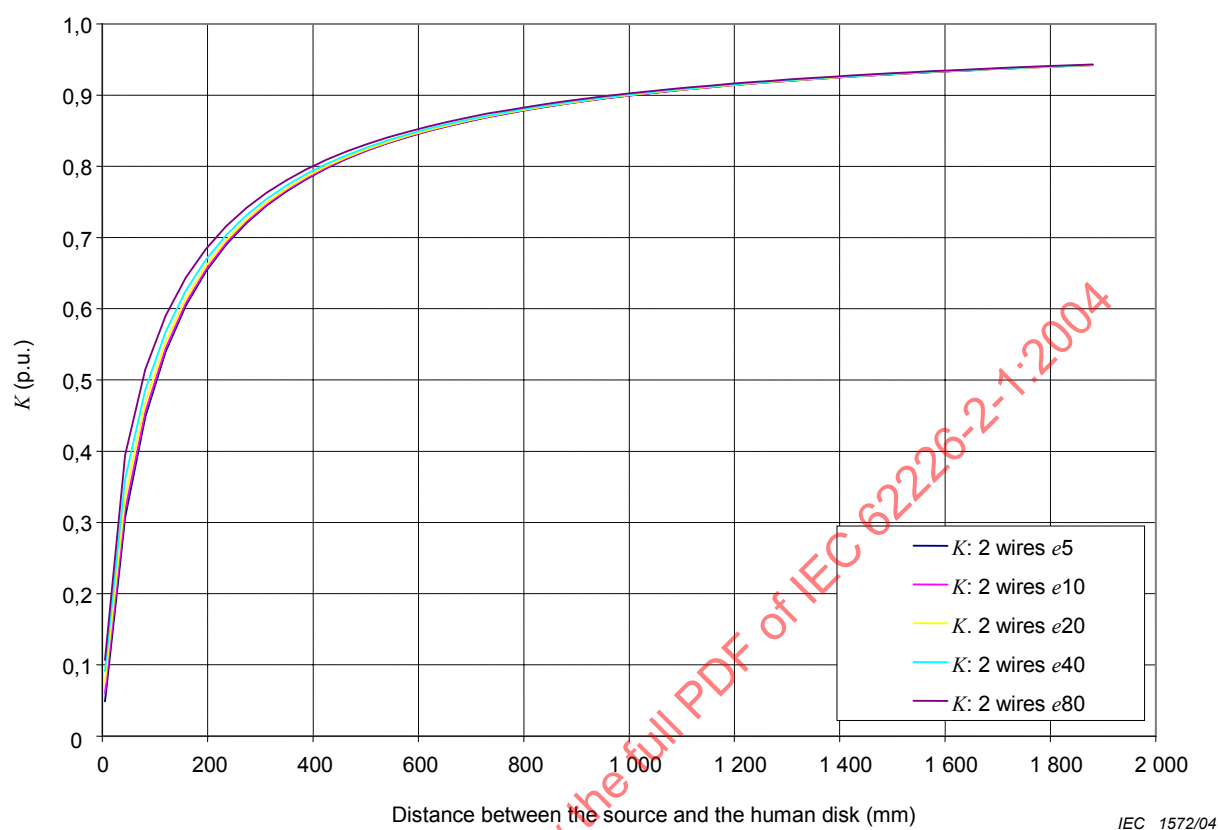


Figure C.7 – Parametric curves of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 100$ mm)

Tableau C.2 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 100$ mm)

Distance entre la source et le disque mm	Source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés séparés par une distance e				
	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
5	0,049	0,060	0,075	0,091	0,107
43	0,307	0,317	0,335	0,361	0,395
82	0,449	0,455	0,467	0,487	0,515
120	0,540	0,545	0,553	0,568	0,590
158	0,604	0,608	0,614	0,626	0,644
196	0,653	0,655	0,660	0,669	0,684
235	0,690	0,692	0,696	0,703	0,716
273	0,720	0,722	0,725	0,731	0,741
311	0,745	0,746	0,749	0,754	0,763
350	0,765	0,766	0,769	0,773	0,781
388	0,783	0,784	0,786	0,789	0,796
426	0,798	0,799	0,800	0,804	0,809
464	0,811	0,811	0,813	0,816	0,821
503	0,822	0,823	0,824	0,827	0,831
541	0,832	0,833	0,834	0,836	0,840
579	0,841	0,842	0,843	0,845	0,848
618	0,849	0,850	0,851	0,852	0,856
656	0,856	0,857	0,858	0,859	0,862
694	0,863	0,863	0,864	0,866	0,868
732	0,869	0,869	0,870	0,871	0,874
771	0,874	0,875	0,875	0,877	0,879
809	0,879	0,880	0,880	0,881	0,884
847	0,884	0,884	0,885	0,886	0,888
886	0,888	0,889	0,889	0,890	0,892
924	0,892	0,892	0,893	0,894	0,896
962	0,896	0,896	0,897	0,897	0,899
1 000	0,899	0,900	0,900	0,901	0,902
1 039	0,903	0,903	0,903	0,904	0,905
1 077	0,906	0,906	0,906	0,907	0,908
1 115	0,908	0,909	0,909	0,910	0,911
1 153	0,911	0,911	0,911	0,912	0,913
1 192	0,913	0,914	0,914	0,915	0,916
1 230	0,916	0,916	0,916	0,917	0,918
1 268	0,918	0,918	0,918	0,919	0,920
1 307	0,920	0,920	0,921	0,921	0,922
1 345	0,922	0,922	0,923	0,923	0,924
1 383	0,924	0,924	0,924	0,925	0,926
1 421	0,926	0,926	0,926	0,927	0,927
1 460	0,928	0,928	0,928	0,928	0,929
1 498	0,929	0,929	0,929	0,930	0,931
1 536	0,931	0,931	0,931	0,931	0,932
1 575	0,932	0,932	0,932	0,933	0,934
1 613	0,934	0,934	0,934	0,934	0,935
1 651	0,935	0,935	0,935	0,936	0,936
1 689	0,936	0,936	0,937	0,937	0,937
1 728	0,938	0,938	0,938	0,938	0,939
1 766	0,939	0,939	0,939	0,939	0,940
1 804	0,940	0,940	0,940	0,940	0,941
1 843	0,941	0,941	0,941	0,941	0,942
1 881	0,942	0,942	0,942	0,942	0,943

**Table C.2 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents
(homogeneous disk: $R = 100$ mm)**

Distance between the source and the disk mm	Source: 2 parallel wires with balanced currents separated by a distance e				
	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
5	0,049	0,060	0,075	0,091	0,107
43	0,307	0,317	0,335	0,361	0,395
82	0,449	0,455	0,467	0,487	0,515
120	0,540	0,545	0,553	0,568	0,590
158	0,604	0,608	0,614	0,626	0,644
196	0,653	0,655	0,660	0,669	0,684
235	0,690	0,692	0,696	0,703	0,716
273	0,720	0,722	0,725	0,731	0,741
311	0,745	0,746	0,749	0,754	0,763
350	0,765	0,766	0,769	0,773	0,781
388	0,783	0,784	0,786	0,789	0,796
426	0,798	0,799	0,800	0,804	0,809
464	0,811	0,811	0,813	0,816	0,821
503	0,822	0,823	0,824	0,827	0,831
541	0,832	0,833	0,834	0,836	0,840
579	0,841	0,842	0,843	0,845	0,848
618	0,849	0,850	0,851	0,852	0,856
656	0,856	0,857	0,858	0,859	0,862
694	0,863	0,863	0,864	0,866	0,868
732	0,869	0,869	0,870	0,871	0,874
771	0,874	0,875	0,875	0,877	0,879
809	0,879	0,880	0,880	0,881	0,884
847	0,884	0,884	0,885	0,886	0,888
886	0,888	0,889	0,889	0,890	0,892
924	0,892	0,892	0,893	0,894	0,896
962	0,896	0,896	0,897	0,897	0,899
1 000	0,899	0,900	0,900	0,901	0,902
1 039	0,903	0,903	0,903	0,904	0,905
1 077	0,906	0,906	0,906	0,907	0,908
1 115	0,908	0,909	0,909	0,910	0,911
1 153	0,911	0,911	0,911	0,912	0,913
1 192	0,913	0,914	0,914	0,915	0,916
1 230	0,916	0,916	0,916	0,917	0,918
1 268	0,918	0,918	0,918	0,919	0,920
1 307	0,920	0,920	0,921	0,921	0,922
1 345	0,922	0,922	0,923	0,923	0,924
1 383	0,924	0,924	0,924	0,925	0,926
1 421	0,926	0,926	0,926	0,927	0,927
1 460	0,928	0,928	0,928	0,928	0,929
1 498	0,929	0,929	0,929	0,930	0,931
1 536	0,931	0,931	0,931	0,931	0,932
1 575	0,932	0,932	0,932	0,933	0,934
1 613	0,934	0,934	0,934	0,934	0,935
1 651	0,935	0,935	0,935	0,936	0,936
1 689	0,936	0,936	0,937	0,937	0,937
1 728	0,938	0,938	0,938	0,938	0,939
1 766	0,939	0,939	0,939	0,939	0,940
1 804	0,940	0,940	0,940	0,940	0,941
1 843	0,941	0,941	0,941	0,941	0,942
1 881	0,942	0,942	0,942	0,942	0,943

C.2 Calculs pour un disque conducteur de rayon $R = 200$ mm

Les résultats du calcul du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K , en fonction de la distance d , sont donnés ci-dessous sous forme de courbes paramétriques, pour différentes valeurs de distances entre les 2 fils (paramètre e): voir Figures C.8 et C.9. Les valeurs numériques correspondantes sont données dans les Tableaux C.3 et C.4.

La distance d est la distance minimale entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source (c'est-à-dire le fil le plus proche).

C.2.1 Exposition proche de la source: $0 < d < 300$ mm

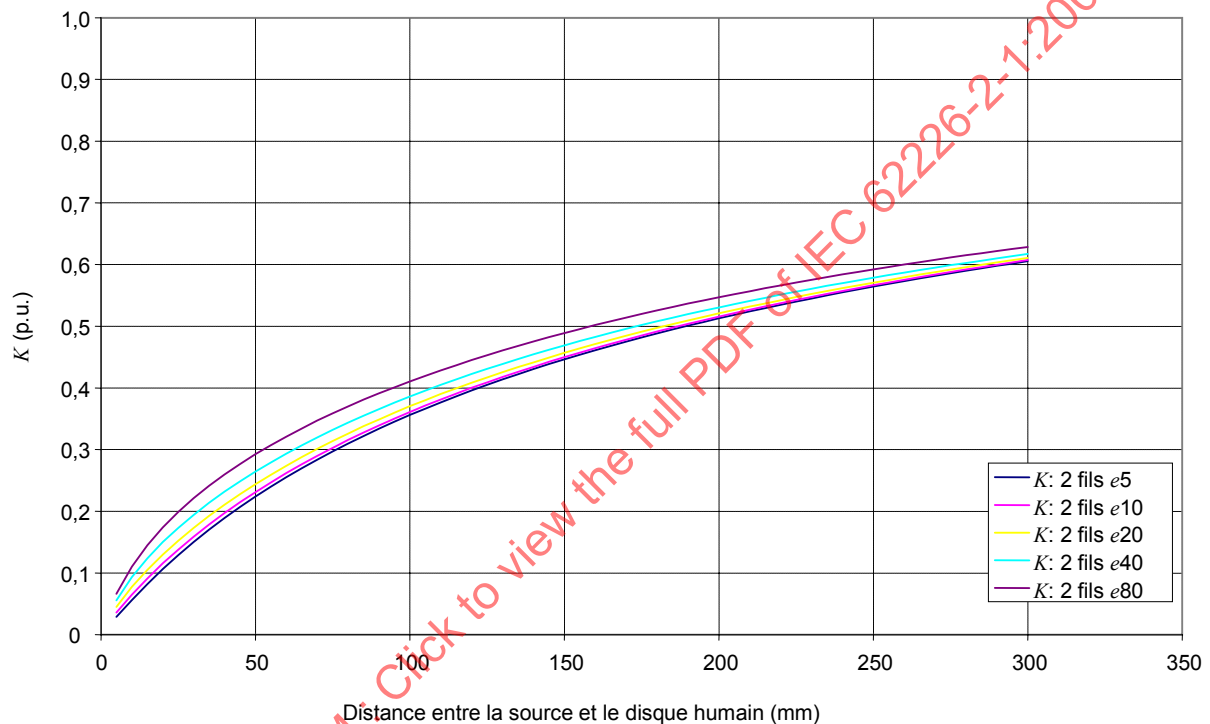


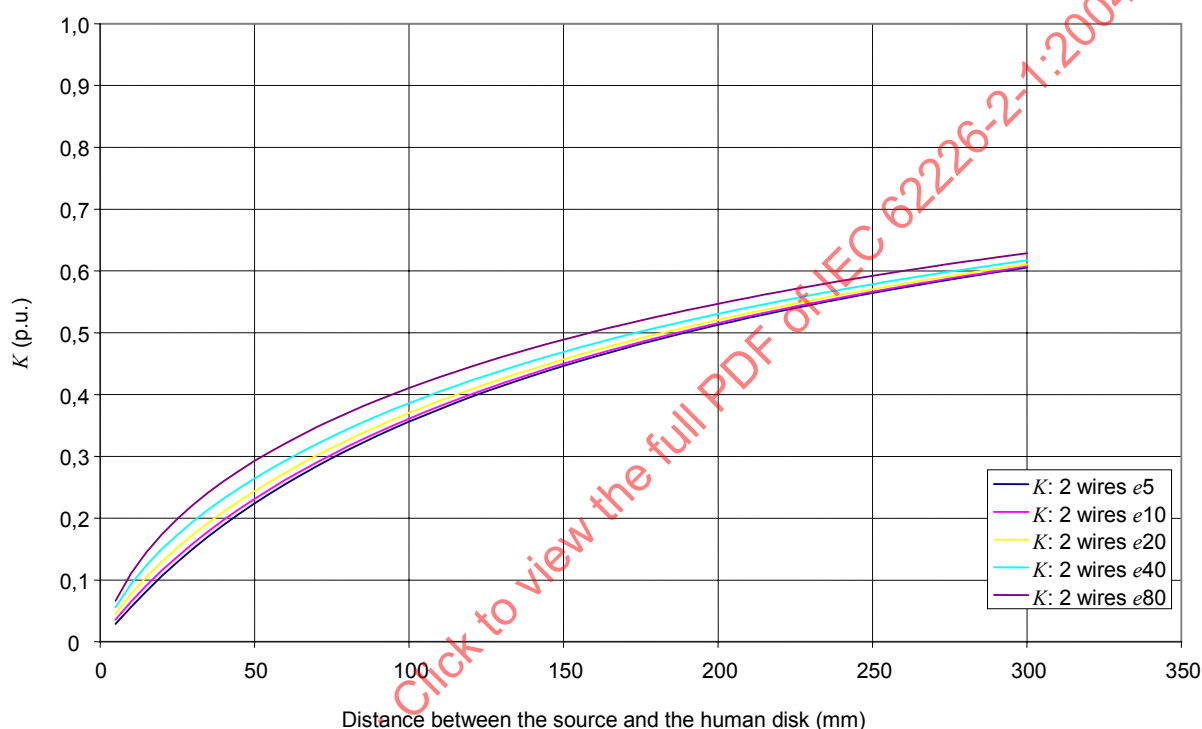
Figure C.8 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 200$ mm)

C.2 Calculations for a conductive disk with a radius $R = 200$ mm

Results of the computation of the coupling factor for non-uniform magnetic fields K , as a function of the distance d , are given hereunder in form of parametric curves, for different values of distances between the 2 wires (parameter e): see Figures C.8 and C.9. Corresponding numerical values are given in Tables C.3 and C.4.

The distance d is the minimum distance between the edge of the disk and the closest part of the source (i.e. the closest wire).

C.2.1 Calculations for short distances to the source: $0 < d < 300$ mm



IEC 1573/04

Figure C.8 – Parametric curves of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 200$ mm)

Tableau C.3 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 200$ mm)

Source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés séparés par une distance e					
Distance entre la source et le disque mm	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
10	0,056	0,065	0,078	0,093	0,111
20	0,106	0,115	0,130	0,150	0,174
30	0,150	0,159	0,173	0,194	0,221
40	0,189	0,197	0,211	0,232	0,260
50	0,224	0,231	0,244	0,264	0,293
60	0,255	0,262	0,274	0,294	0,321
70	0,284	0,290	0,301	0,320	0,347
80	0,310	0,316	0,326	0,344	0,370
90	0,334	0,339	0,349	0,366	0,391
100	0,356	0,361	0,370	0,386	0,411
110	0,377	0,381	0,390	0,405	0,428
120	0,396	0,400	0,408	0,423	0,445
130	0,414	0,418	0,425	0,439	0,461
140	0,430	0,434	0,442	0,454	0,475
150	0,446	0,450	0,457	0,469	0,489
160	0,461	0,465	0,471	0,483	0,502
170	0,475	0,478	0,485	0,496	0,514
180	0,488	0,491	0,497	0,508	0,526
190	0,501	0,504	0,509	0,520	0,537
200	0,513	0,516	0,521	0,531	0,547
210	0,524	0,527	0,532	0,541	0,557
220	0,535	0,537	0,542	0,551	0,566
230	0,545	0,548	0,552	0,561	0,575
240	0,555	0,557	0,562	0,570	0,584
250	0,564	0,566	0,571	0,579	0,592
260	0,573	0,575	0,579	0,587	0,600
270	0,582	0,584	0,588	0,595	0,608
280	0,590	0,592	0,596	0,603	0,615
290	0,598	0,600	0,603	0,610	0,622
300	0,605	0,607	0,611	0,617	0,629

**Table C.3 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents
(homogeneous disk: $R = 200$ mm)**

Source: 2 parallel wires with balanced currents separated by a distance e					
Distance between the source and the disk mm	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
10	0,056	0,065	0,078	0,093	0,111
20	0,106	0,115	0,130	0,150	0,174
30	0,150	0,159	0,173	0,194	0,221
40	0,189	0,197	0,211	0,232	0,260
50	0,224	0,231	0,244	0,264	0,293
60	0,255	0,262	0,274	0,294	0,321
70	0,284	0,290	0,301	0,320	0,347
80	0,310	0,316	0,326	0,344	0,370
90	0,334	0,339	0,349	0,366	0,391
100	0,356	0,361	0,370	0,386	0,411
110	0,377	0,381	0,390	0,405	0,428
120	0,396	0,400	0,408	0,423	0,445
130	0,414	0,418	0,425	0,439	0,461
140	0,430	0,434	0,442	0,454	0,475
150	0,446	0,450	0,457	0,469	0,489
160	0,461	0,465	0,471	0,483	0,502
170	0,475	0,478	0,485	0,496	0,514
180	0,488	0,491	0,497	0,508	0,526
190	0,501	0,504	0,509	0,520	0,537
200	0,513	0,516	0,521	0,531	0,547
210	0,524	0,527	0,532	0,541	0,557
220	0,535	0,537	0,542	0,551	0,566
230	0,545	0,548	0,552	0,561	0,575
240	0,555	0,557	0,562	0,570	0,584
250	0,564	0,566	0,571	0,579	0,592
260	0,573	0,575	0,579	0,587	0,600
270	0,582	0,584	0,588	0,595	0,608
280	0,590	0,592	0,596	0,603	0,615
290	0,598	0,600	0,603	0,610	0,622
300	0,605	0,607	0,611	0,617	0,629

C.2.2 Exposition à une distance plus grande $0 < d < 1\,900\text{ mm}$

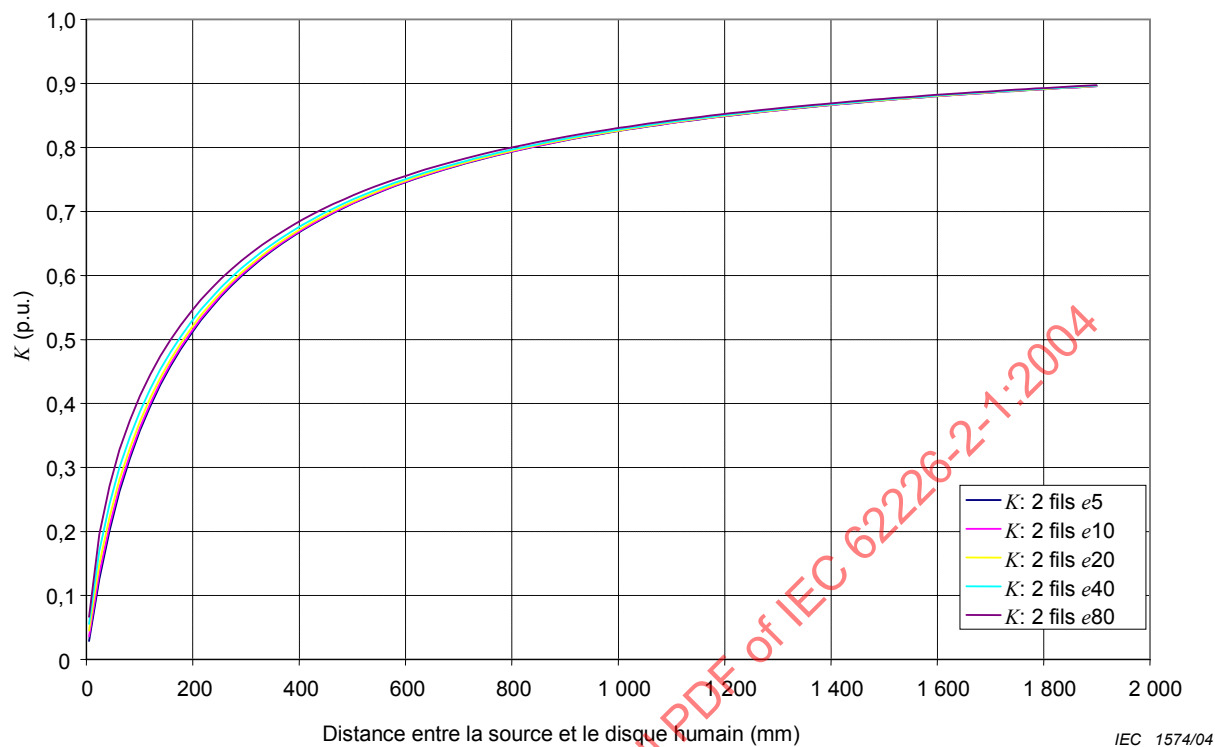


Figure C.9 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à $1\,900\text{ mm}$ d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés et pour différentes distances entre les 2 fils (disque homogène $R = 200\text{ mm}$)

C.2.2 Calculations for higher distances $0 < d < 1\,900$ mm

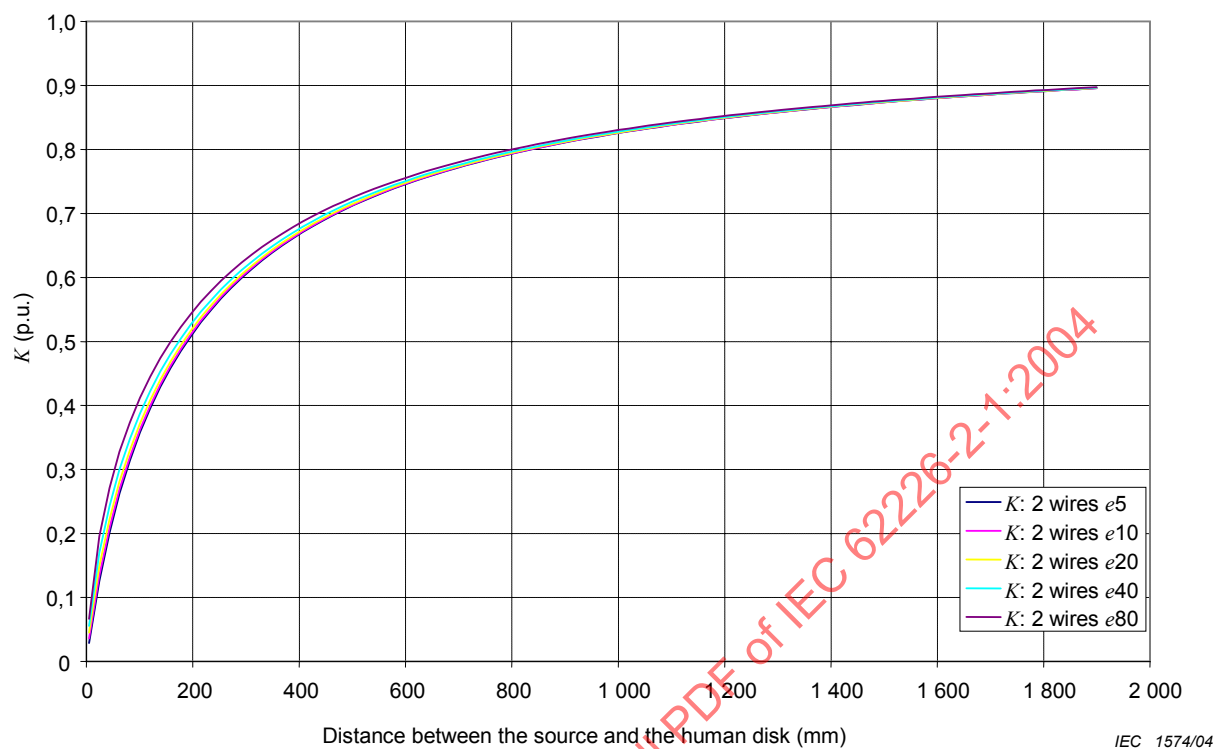


Figure C.9 – Parametric curves of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents and for different distances e between the 2 wires (homogeneous disk $R = 200$ mm)

Tableau C.4 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source constituée de 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés (disque homogène $R = 200$ mm)

Source: 2 fils parallèles parcourus par des courants équilibrés séparés par une distance e					
Distance entre la source et le disque mm	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
5	0,029	0,036	0,045	0,056	0,066
43	0,201	0,209	0,222	0,243	0,271
82	0,314	0,319	0,330	0,347	0,373
120	0,395	0,400	0,408	0,422	0,445
158	0,458	0,462	0,468	0,480	0,499
196	0,509	0,511	0,517	0,527	0,543
235	0,550	0,552	0,557	0,565	0,579
273	0,584	0,586	0,590	0,597	0,610
311	0,614	0,615	0,619	0,625	0,636
350	0,639	0,640	0,643	0,649	0,659
388	0,661	0,662	0,665	0,670	0,678
426	0,680	0,682	0,684	0,688	0,696
464	0,698	0,699	0,701	0,705	0,712
503	0,713	0,714	0,716	0,719	0,726
522	0,720	0,721	0,723	0,726	0,732
541	0,727	0,728	0,729	0,733	0,738
579	0,739	0,740	0,742	0,745	0,750
618	0,751	0,751	0,753	0,756	0,760
656	0,761	0,762	0,763	0,766	0,770
694	0,771	0,771	0,772	0,775	0,779
732	0,780	0,780	0,781	0,783	0,787
771	0,788	0,788	0,789	0,791	0,795
790	0,791	0,792	0,793	0,795	0,798
809	0,795	0,796	0,796	0,798	0,802
847	0,802	0,803	0,803	0,805	0,808
886	0,809	0,809	0,810	0,811	0,814
924	0,815	0,815	0,816	0,817	0,820
962	0,820	0,821	0,821	0,823	0,825
1 000	0,826	0,826	0,827	0,828	0,830
1 039	0,831	0,831	0,832	0,833	0,835
1 077	0,835	0,836	0,836	0,837	0,840
1 115	0,840	0,840	0,841	0,842	0,844
1 153	0,844	0,844	0,845	0,846	0,848
1 192	0,848	0,848	0,849	0,850	0,852
1 230	0,852	0,852	0,852	0,853	0,855
1 268	0,855	0,856	0,856	0,857	0,859
1 307	0,859	0,859	0,859	0,860	0,862
1 345	0,862	0,862	0,863	0,863	0,865
1 383	0,865	0,865	0,866	0,866	0,868
1 421	0,868	0,868	0,869	0,869	0,871
1 460	0,871	0,871	0,871	0,872	0,873
1 498	0,873	0,874	0,874	0,875	0,876
1 536	0,876	0,876	0,876	0,877	0,878
1 575	0,878	0,879	0,879	0,880	0,881
1 613	0,881	0,881	0,881	0,882	0,883
1 651	0,883	0,883	0,884	0,884	0,885
1 689	0,885	0,885	0,886	0,886	0,887
1 709	0,886	0,886	0,887	0,887	0,888
1 728	0,887	0,887	0,888	0,888	0,889
1 766	0,889	0,889	0,890	0,890	0,891
1 804	0,891	0,891	0,892	0,892	0,893
1 843	0,893	0,893	0,894	0,894	0,895
1 881	0,895	0,895	0,895	0,896	0,897

**Table C.4 – Numerical values of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of 2 parallel wires with balanced currents
(homogeneous disk: $R = 200$ mm)**

Source: 2 parallel wires with balanced currents separated by a distance e					
Distance between the source and the disk mm	$e = 5$ mm	$e = 10$ mm	$e = 20$ mm	$e = 40$ mm	$e = 80$ mm
5	0,029	0,036	0,045	0,056	0,066
43	0,201	0,209	0,222	0,243	0,271
82	0,314	0,319	0,330	0,347	0,373
120	0,395	0,400	0,408	0,422	0,445
158	0,458	0,462	0,468	0,480	0,499
196	0,509	0,511	0,517	0,527	0,543
235	0,550	0,552	0,557	0,565	0,579
273	0,584	0,586	0,590	0,597	0,610
311	0,614	0,615	0,619	0,625	0,636
350	0,639	0,640	0,643	0,649	0,659
388	0,661	0,662	0,665	0,670	0,678
426	0,680	0,682	0,684	0,688	0,696
464	0,698	0,699	0,701	0,705	0,712
503	0,713	0,714	0,716	0,719	0,726
522	0,720	0,721	0,723	0,726	0,732
541	0,727	0,728	0,729	0,733	0,738
579	0,739	0,740	0,742	0,745	0,750
618	0,751	0,751	0,753	0,756	0,760
656	0,761	0,762	0,763	0,766	0,770
694	0,771	0,771	0,772	0,775	0,779
732	0,780	0,780	0,781	0,783	0,787
771	0,788	0,788	0,789	0,791	0,795
790	0,791	0,792	0,793	0,795	0,798
809	0,795	0,796	0,796	0,798	0,802
847	0,802	0,803	0,803	0,805	0,808
886	0,809	0,809	0,810	0,811	0,814
924	0,815	0,815	0,816	0,817	0,820
962	0,820	0,821	0,821	0,823	0,825
1 000	0,826	0,826	0,827	0,828	0,830
1 039	0,831	0,831	0,832	0,833	0,835
1 077	0,835	0,836	0,836	0,837	0,840
1 115	0,840	0,840	0,841	0,842	0,844
1 153	0,844	0,844	0,845	0,846	0,848
1 192	0,848	0,848	0,849	0,850	0,852
1 230	0,852	0,852	0,852	0,853	0,855
1 268	0,855	0,856	0,856	0,857	0,859
1 307	0,859	0,859	0,859	0,860	0,862
1 345	0,862	0,862	0,863	0,863	0,865
1 383	0,865	0,865	0,866	0,866	0,868
1 421	0,868	0,868	0,869	0,869	0,871
1 460	0,871	0,871	0,871	0,872	0,873
1 498	0,873	0,874	0,874	0,875	0,876
1 536	0,876	0,876	0,876	0,877	0,878
1 575	0,878	0,879	0,879	0,880	0,881
1 613	0,881	0,881	0,881	0,882	0,883
1 651	0,883	0,883	0,884	0,884	0,885
1 689	0,885	0,885	0,886	0,886	0,887
1 709	0,886	0,886	0,887	0,887	0,888
1 728	0,887	0,887	0,888	0,888	0,889
1 766	0,889	0,889	0,890	0,890	0,891
1 804	0,891	0,891	0,892	0,892	0,893
1 843	0,893	0,893	0,894	0,894	0,895
1 881	0,895	0,895	0,895	0,896	0,897

Annexe D (normative)

Disque dans un champ magnétique créé par une spire circulaire

Les courants induits sont calculés dans un disque de conductivité homogène. Afin de permettre la comparaison entre les différentes configurations de sources de champ (en fonction de la géométrie de la source et de la distance au disque), les valeurs normalisées suivantes ont été choisies:

- f , fréquence = 50 Hz (voir Note 2 de 3.5);
- B , densité de flux magnétique = 1,25 μT , au bord du disque au plus proche de la source de champ;
- R , rayon du disque conducteur = 100 mm et 200 mm;
- σ , conductivité (homogène) = 0,2 S/m.

Dans cette annexe, le champ magnétique est créé par un courant alternatif circulant dans une spire circulaire (représentation simplifiée d'une source localisée). Le disque conducteur et la spire sont situés dans le même plan, à une distance d (voir Figure D.1).

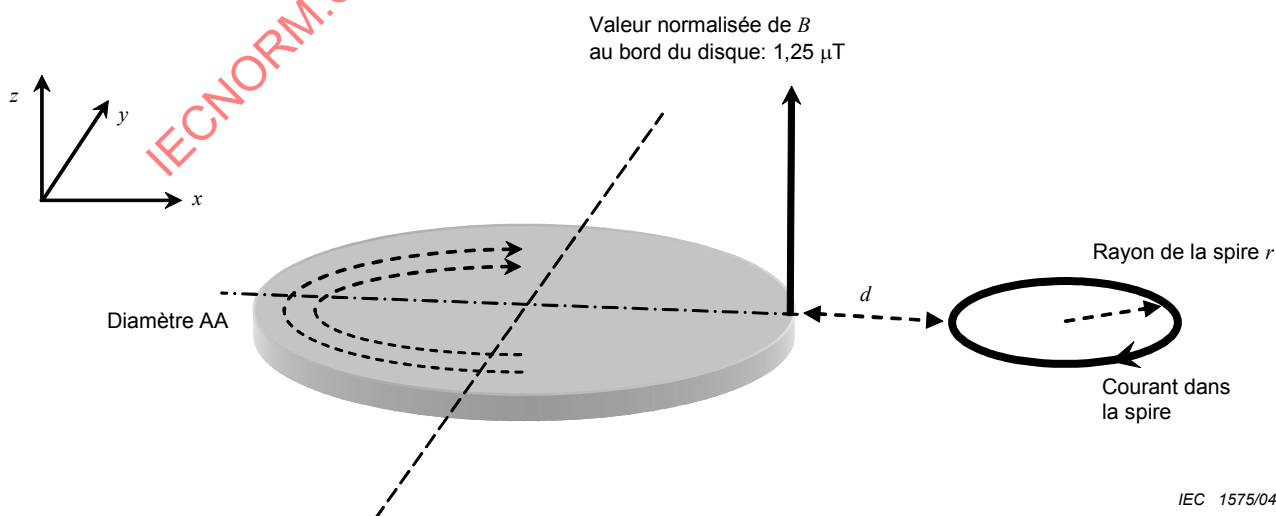
La distance d est la distance minimale entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source.

L'évolution du facteur de couplage pour champ magnétique non uniforme K est étudié par rapport à la distance d pour:

- une exposition proche de la source: $0 < d < 300$ mm;
- une exposition à une distance plus grande: $0 < d < 1\,900$ mm.

Pour chaque distance d , le facteur K est calculé pour différentes sources (c'est-à-dire différents rayons de spires: $r = 2,5$ mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 40 mm, 80 mm et 160 mm).

Pour l'illustration des calculs de courants induits, 2 distances sont étudiées ($d = 5$ mm et 850 mm) avec différentes valeurs de rayon de spire ($r = 10$ mm, 50 mm et 200 mm).



IEC 1575/04

Figure D.1 – Disque conducteur dans un champ magnétique créé par une spire

Annex D (normative)

Disk in a magnetic field created by a circular coil

The induced currents are calculated in a disk of homogeneous conductivity. In order to allow comparison between different field sources configurations (depending on geometry of the source and distance to the disk) the following standard values have been chosen:

- f , frequency = 50 Hz (see note 2 in 3.5);
- B , magnetic flux density = $1,25 \mu\text{T}$, at the edge of the disk closer to the field source;
- R , radius of the conductive disk = 100 mm and 200 mm;
- σ , conductivity (homogeneous) = $0,2 \text{ S/m}$.

In this annex, the magnetic field is generated by an alternating current flowing through a circular coil (simplified representation of a localized source). The conductive disk and the coil are located in the same plane, at a distance d (see Figure D.1).

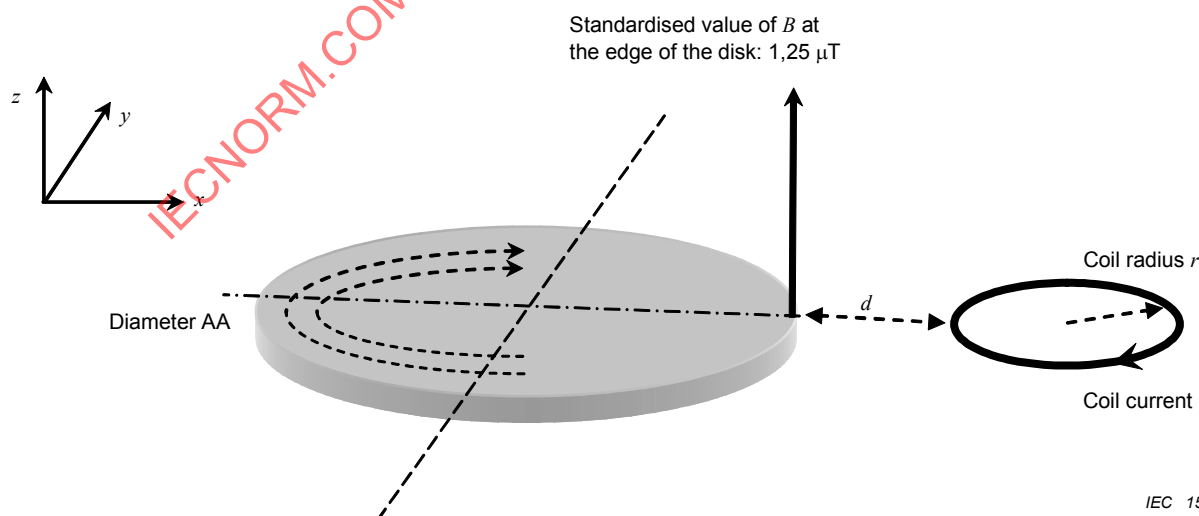
The distance d is the minimum distance between the edge of the disk and the closer part of the source.

The evolution of the coupling factor for non-uniform magnetic field K is studied with regard to the distance d for:

- exposure close to the source: $0 < d < 300 \text{ mm}$;
- exposure at higher distance: $0 < d < 1\,900 \text{ mm}$.

For each distance d , the factor K is calculated for different sources (i.e. different coil radius: $r = 2,5 \text{ mm}$, 5 mm , 10 mm , 20 mm , 40 mm , 80 mm and 160 mm).

For illustration of induced currents computations, 2 distances are studied ($d = 5 \text{ mm}$ and 850 mm) with different values of the coil radius ($r = 10 \text{ mm}$, 50 mm and 200 mm).



IEC 1575/04

Figure D.1 – Conductive disk in a magnetic field created by a coil

D.1 Calculs pour un disque conducteur de rayon $R = 100$ mm

D.1.1 Exemples de calculs de courants induits dans le disque

D.1.1.1 Rayon de spire $r = 50$ mm, $d = 5$ mm

Les résultats du calcul des courants induits locaux dans le disque sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure D.2). La courbe de la Figure D.3 donne les valeurs numériques de la distribution des courants induits intégrés sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant induit.

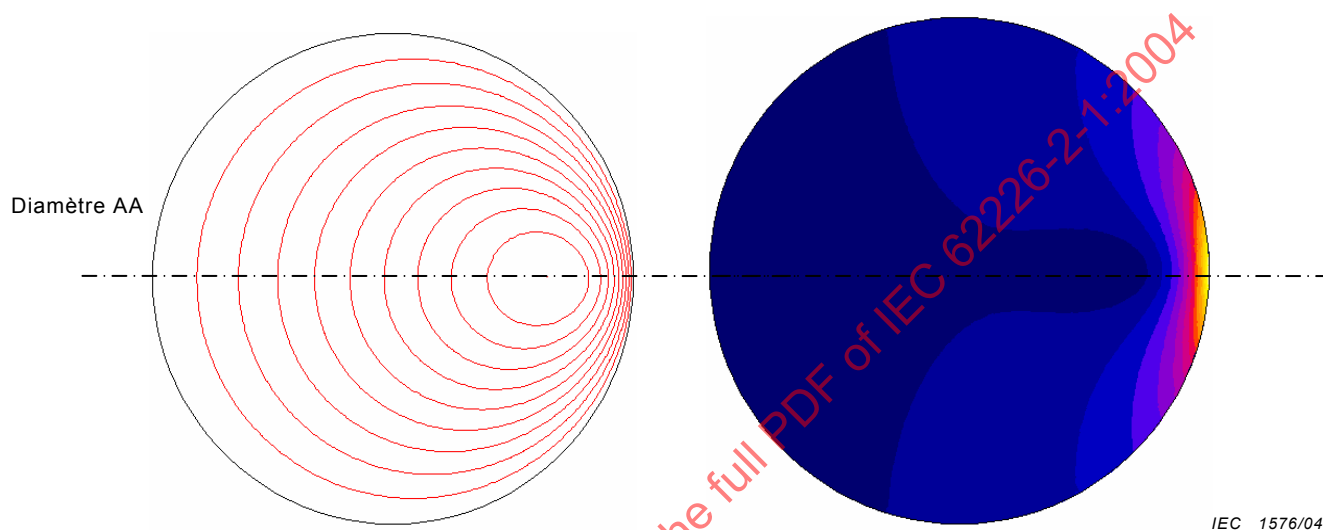


Figure D.2 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque
(source: spire de rayon $r = 50$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

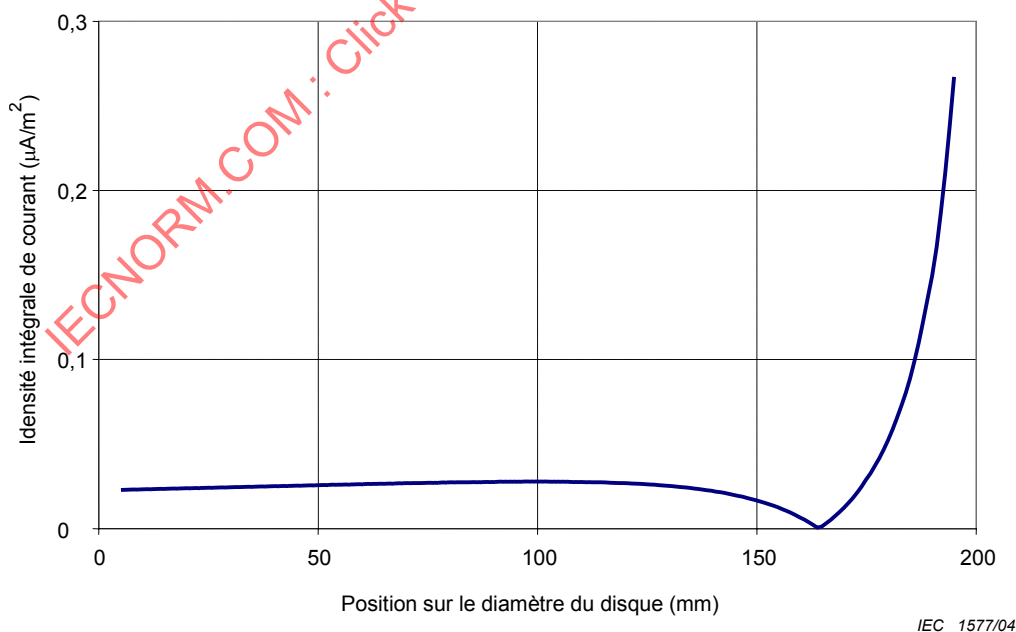


Figure D.3 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit
calculée le long du diamètre AA du disque
(source: spire de rayon $r = 50$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

NOTE Le diamètre AA est situé comme illustré aux Figures D.1 et D.2.

D.1 Calculations for a conductive disk with a radius $R = 100$ mm

D.1.1 Examples of calculation of induced currents in the disk

D.1.1.1 Coil radius $r = 50$ mm, $d = 5$ mm

Results of the computation of local induced currents in the disk are given hereunder in form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure D.2). The curve in Figure D.3 gives the numerical values of the distribution of the induced currents integrated over a surface of 1 cm^2 perpendicular to the induced current direction.

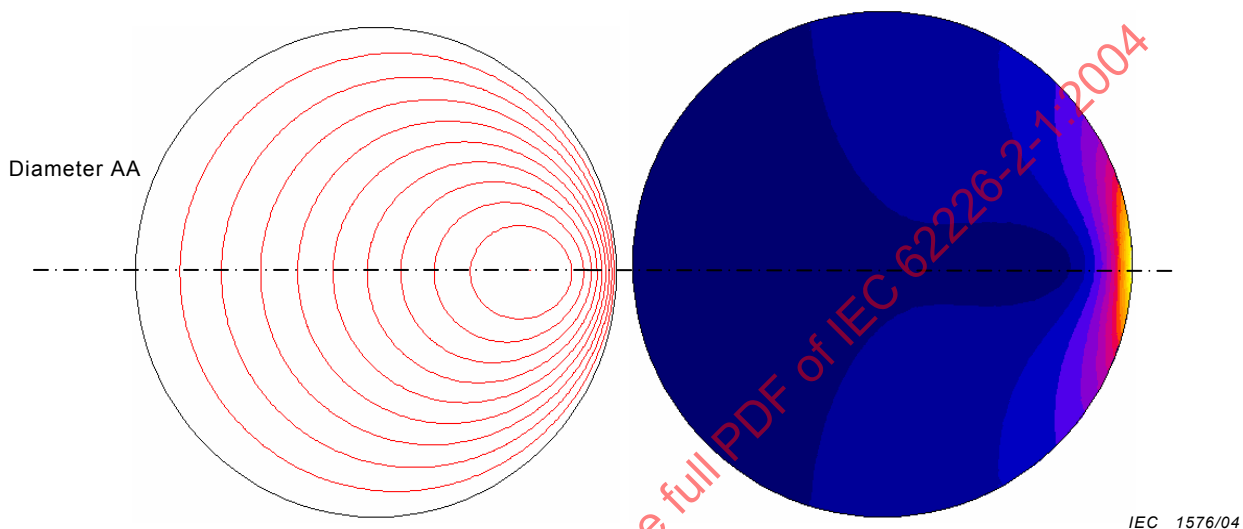


Figure D.2 – Current density lines J and distribution of J in the disk
(source: coil of radius $r = 50$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

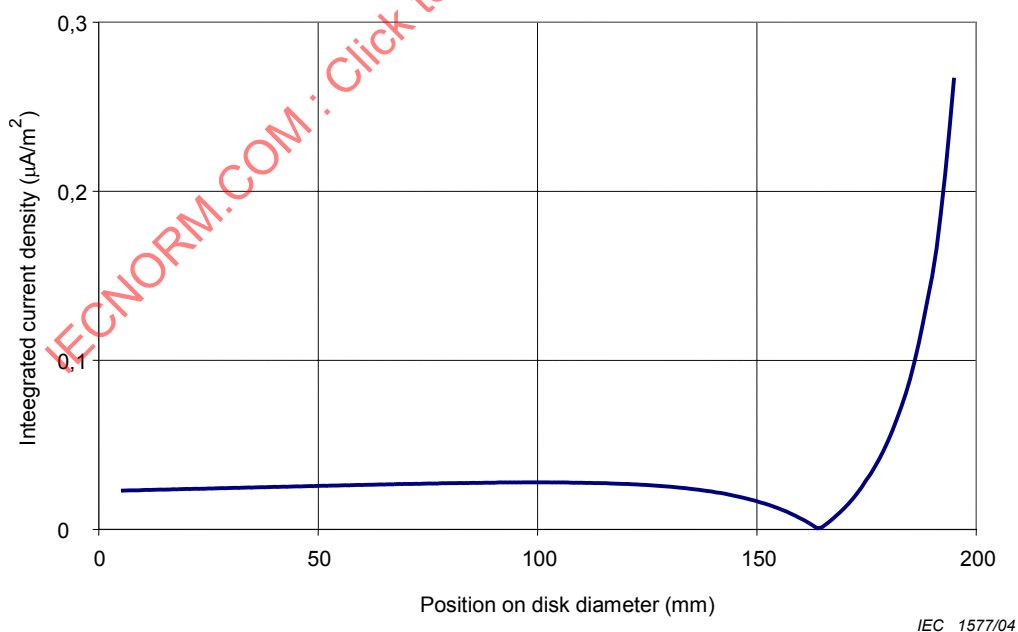


Figure D.3 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk
(source: coil of radius $r = 50$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

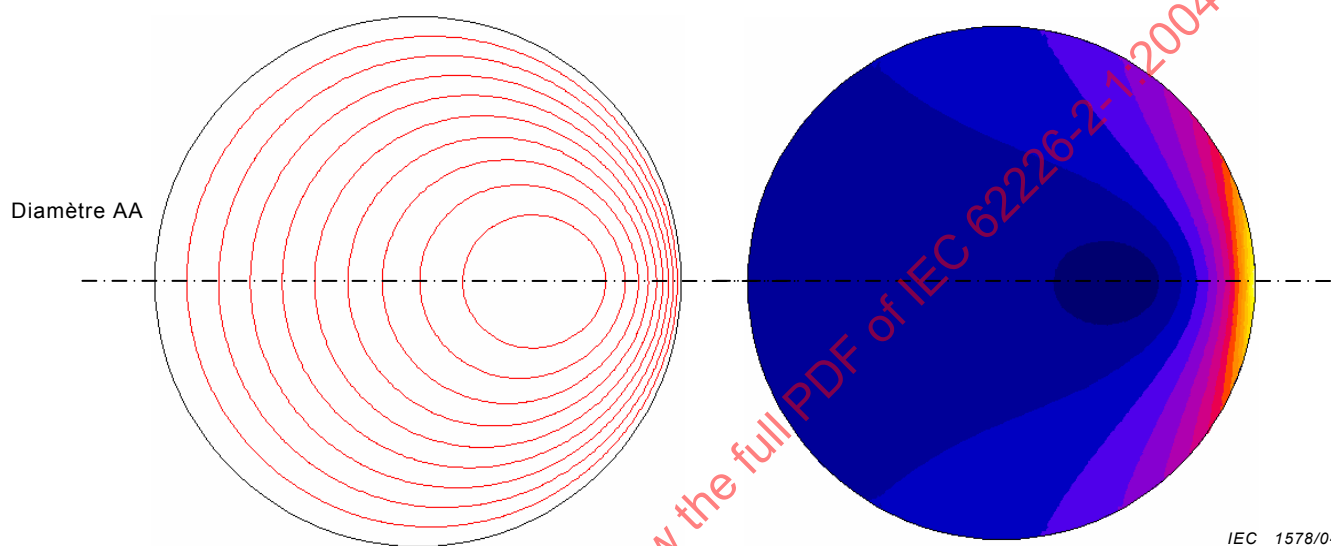
NOTE The diameter AA is located as illustrated in Figures D.1 and D.2.

D.1.1.2 Rayon de la spire = 50 mm, $d = 850$ mm

Résultats similaires à ceux donnés en Annexe B et C pour des valeurs élevées de d , donc similaires aussi au cas du champ uniforme (Annexe A).

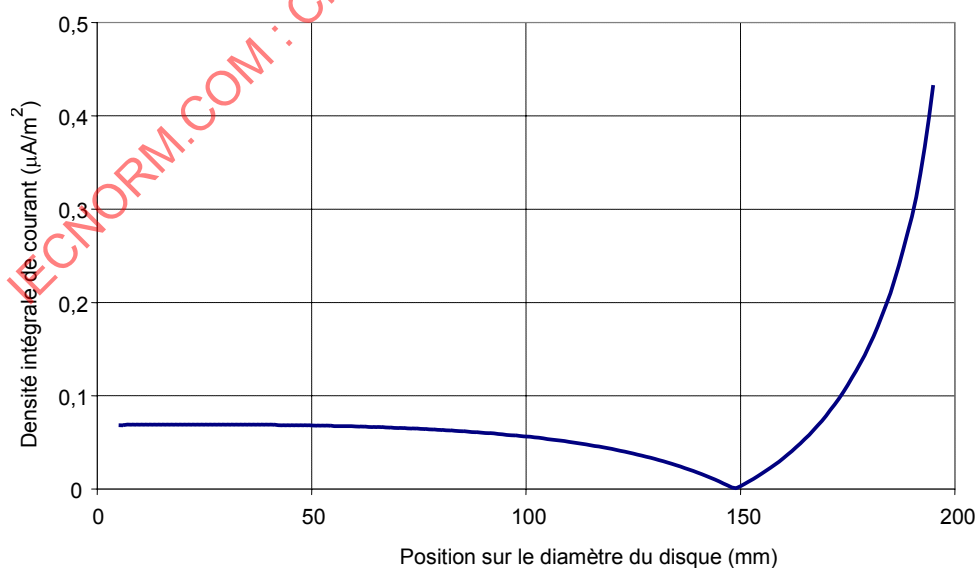
D.1.1.3 Rayon de la spire $r = 200$ mm, $d = 5$ mm

Les résultats du calcul des courants induits locaux dans le disque sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure D.4). La courbe de la Figure D.5 donne les valeurs numériques de la distribution des courants induits intégrés sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant induit.



IEC 1578/04

Figure D.4 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque
(source: spire de rayon $r = 200$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)



IEC 1579/04

Figure D.5– $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit
calculée le long du diamètre AA du disque
(source: spire de rayon $r = 200$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

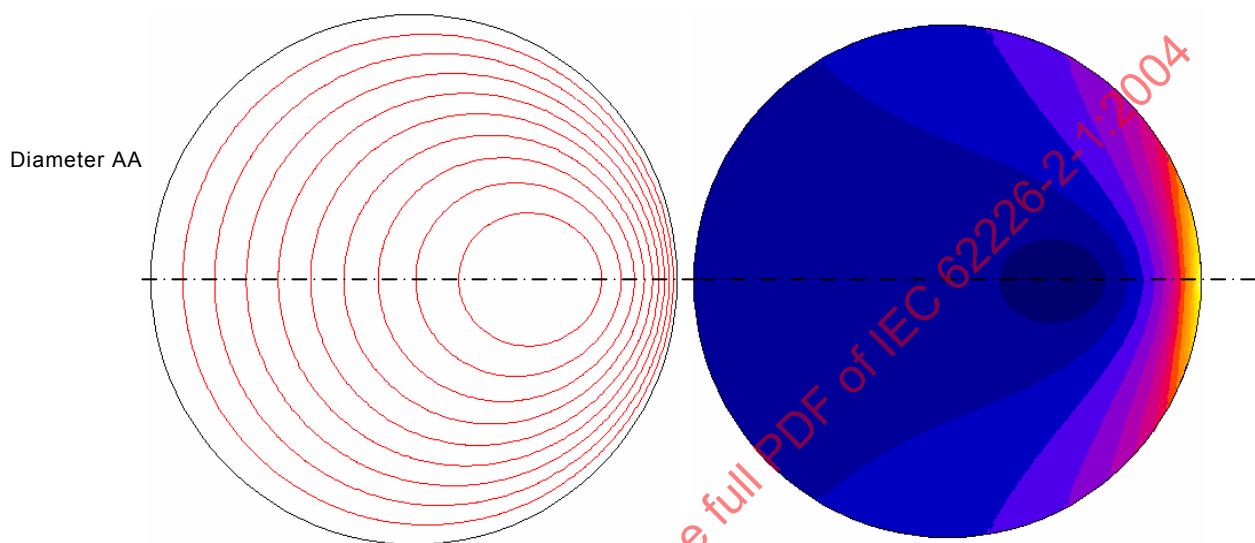
NOTE Le diamètre AA est situé comme illustré aux Figures D.1 et D.4.

D.1.1.2 Coil radius $r = 50$ mm, $d = 850$ mm

Results similar to those given in Annexes B and C for high values of d , and so, also similar to the case of the uniform field (Annex A).

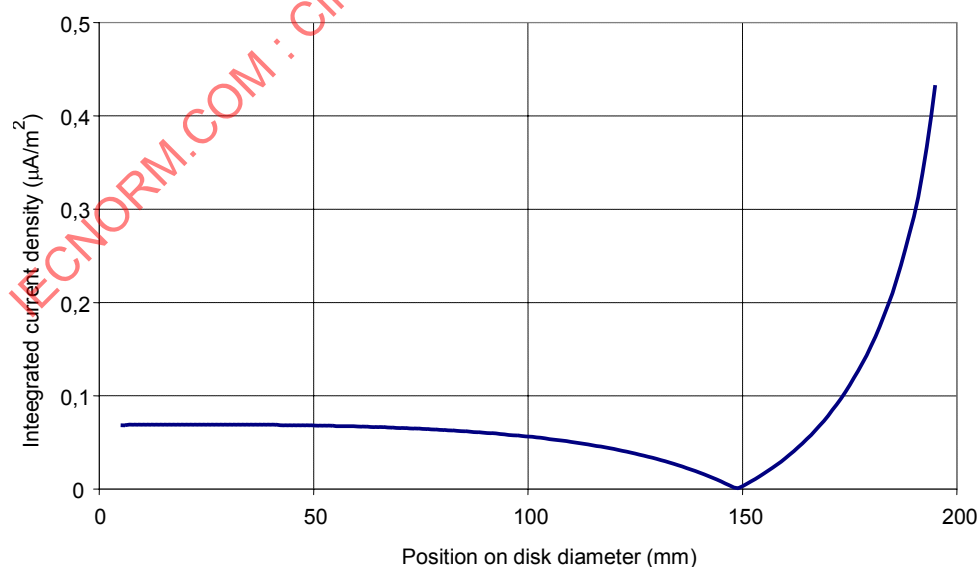
D.1.1.3 Coil radius $r = 200$ mm, $d = 5$ mm

Results of the computation of local induced currents in the disk are given hereunder in form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure D.4). The curve in Figure D.5 gives the numerical values of the distribution of the induced currents integrated over a surface of 1 cm^2 perpendicular to the induced current direction.



IEC 1578/04

Figure D.4 – Current density lines J and distribution of J in the disk
(source: coil of radius $r = 200$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)



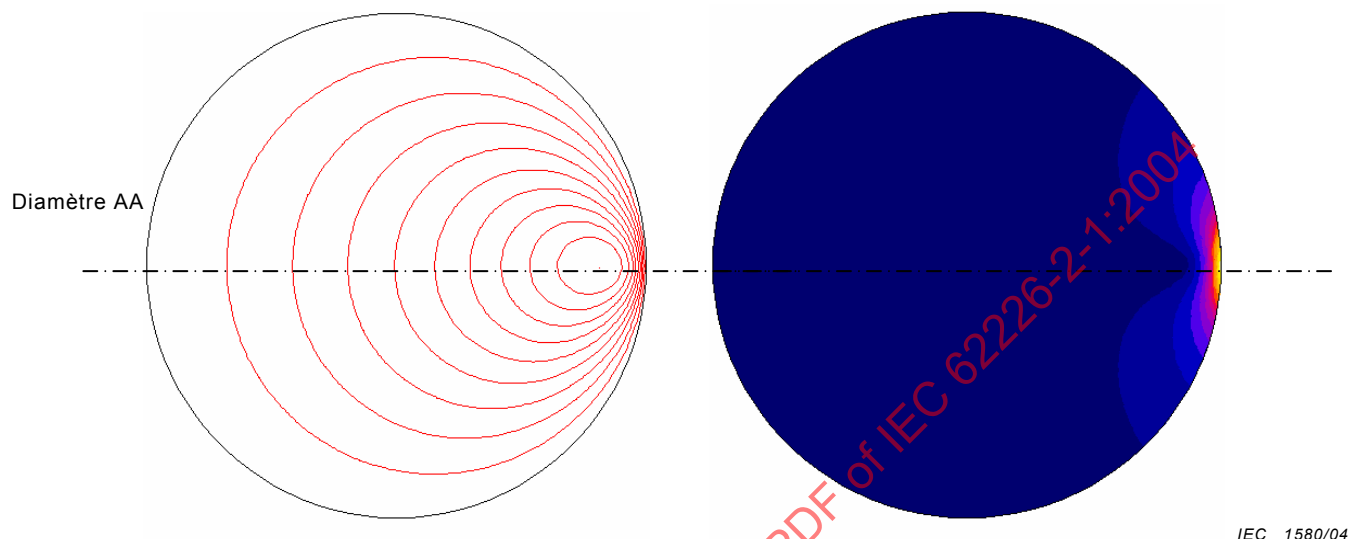
IEC 1579/04

Figure D.5 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density calculated along the diameter AA of the disk
(source: coil of radius $r = 200$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

NOTE The diameter AA is located as illustrated in Figures D.1 and D.4.

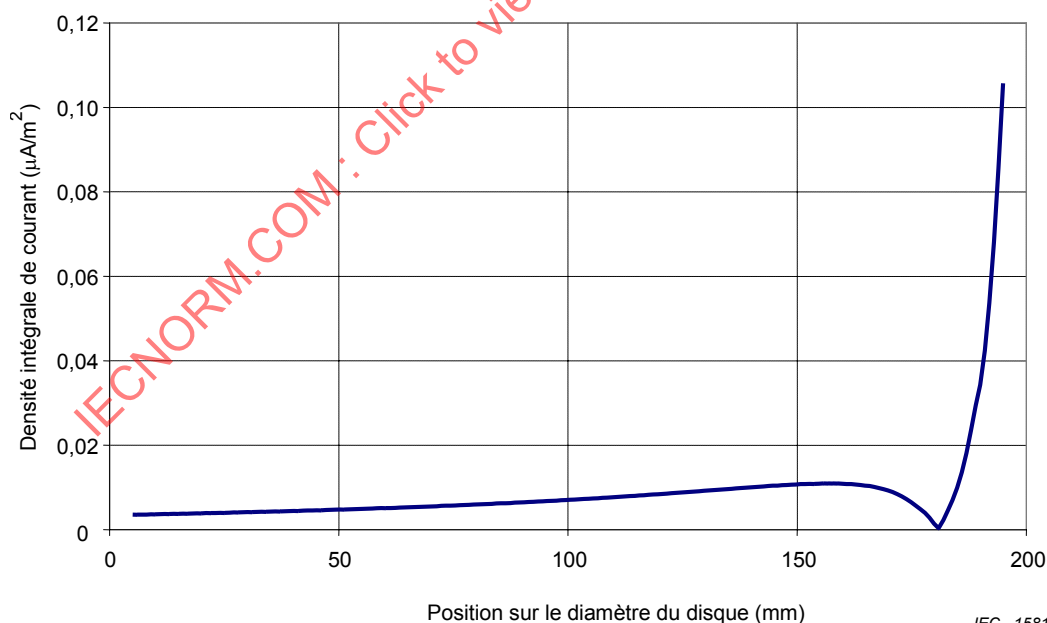
D.1.1.4 Rayon de la spire = 10 mm, $d = 5$ mm

Les résultats du calcul des courants induits locaux dans le disque sont donnés ci-dessous sous forme de graphiques donnant la forme de la distribution des courants induits dans le disque (Figure D.6). La courbe de la Figure D.7 donne les valeurs numériques de la distribution des courants induits intégrés sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant induit.



IEC 1580/04

Figure D.6 – Lignes de densité de courant J et distribution de J dans le disque
(source: spire de rayon $r = 10$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)



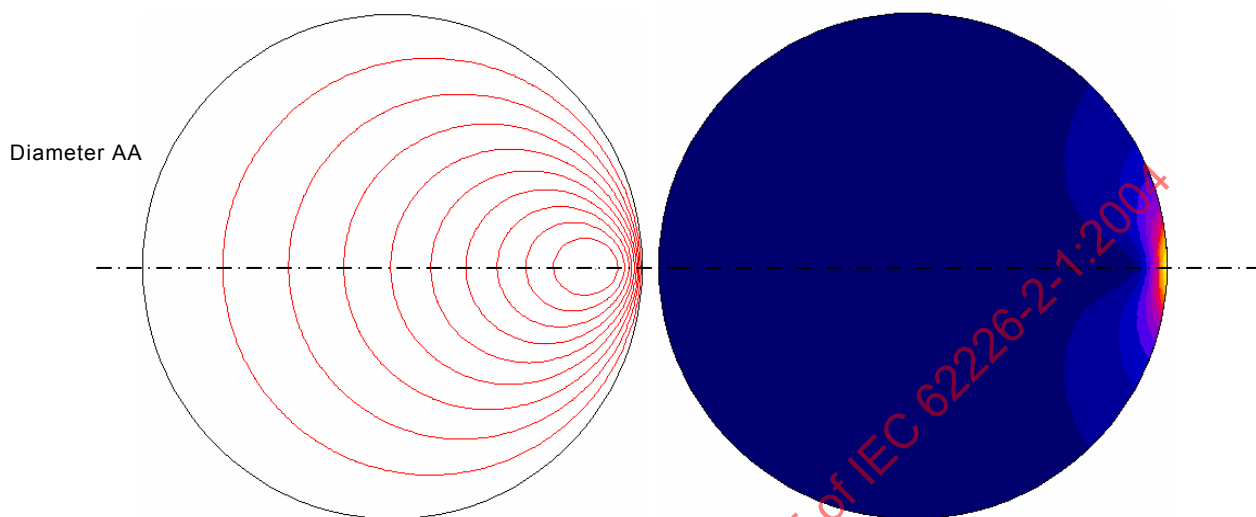
IEC 1581/04

Figure D.7 – $J_i = f[r]$: Distribution de la densité intégrée de courant induit
calculée le long du diamètre AA du disque
(source: spire de rayon $r = 10$ mm, disque conducteur $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

NOTE Le diamètre AA est situé comme illustré aux Figures D.1 et D.6.

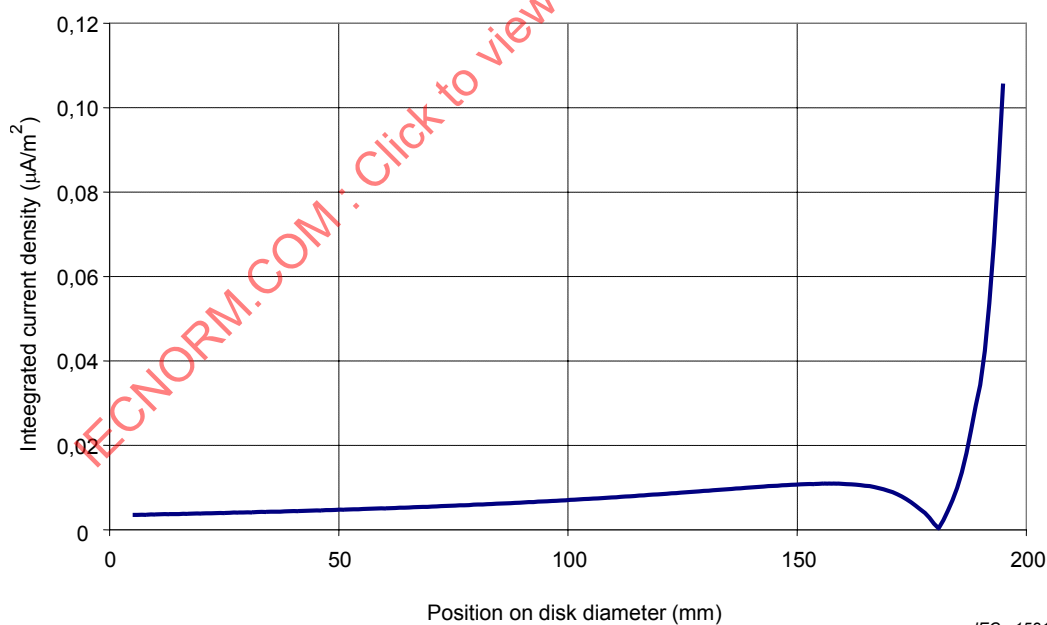
D.1.1.4 Coil radius = 10 mm, $d = 5$ mm

Results of the computation of local induced currents in the disk are given hereunder in form of graphs giving the shape of the distribution of induced currents in the disk (Figure D.6). The curve in Figure D.7 gives the numerical values of the distribution of the induced currents integrated over a surface of 1 cm^2 perpendicular to the induced current direction.



IEC 1580/04

Figure D.6 – Current density lines J and distribution of J in the disk
(source: coil of radius $r = 10$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)



IEC 1581/04

Figure D.7 – $J_i = f[r]$: Distribution of integrated induced current density
calculated along the diameter AA of the disk
(source: coil of radius $r = 10$ mm, conductive disk $R = 100$ mm, $d = 5$ mm)

NOTE The diameter AA is located as illustrated in Figures D.1 and D.6.

D.1.2 Valeurs calculées du facteur de couplage pour champ magnétique non uniforme K

Les résultats du calcul du facteur de couplage pour le champ magnétique non uniforme K , en fonction de la distance d , sont donnés ci-dessous sous forme de courbes paramétriques, pour différents rayons de spire (paramètre r , voir Figures D.8 et D.9). Les valeurs numériques correspondantes sont données dans les Tableaux D.1 et D.2.

La distance d est la distance minimale entre le bord du disque et la partie la plus proche de la source.

D.1.2.1 Exposition proche de la source: $0 < d < 300$ mm, $R = 100$ mm

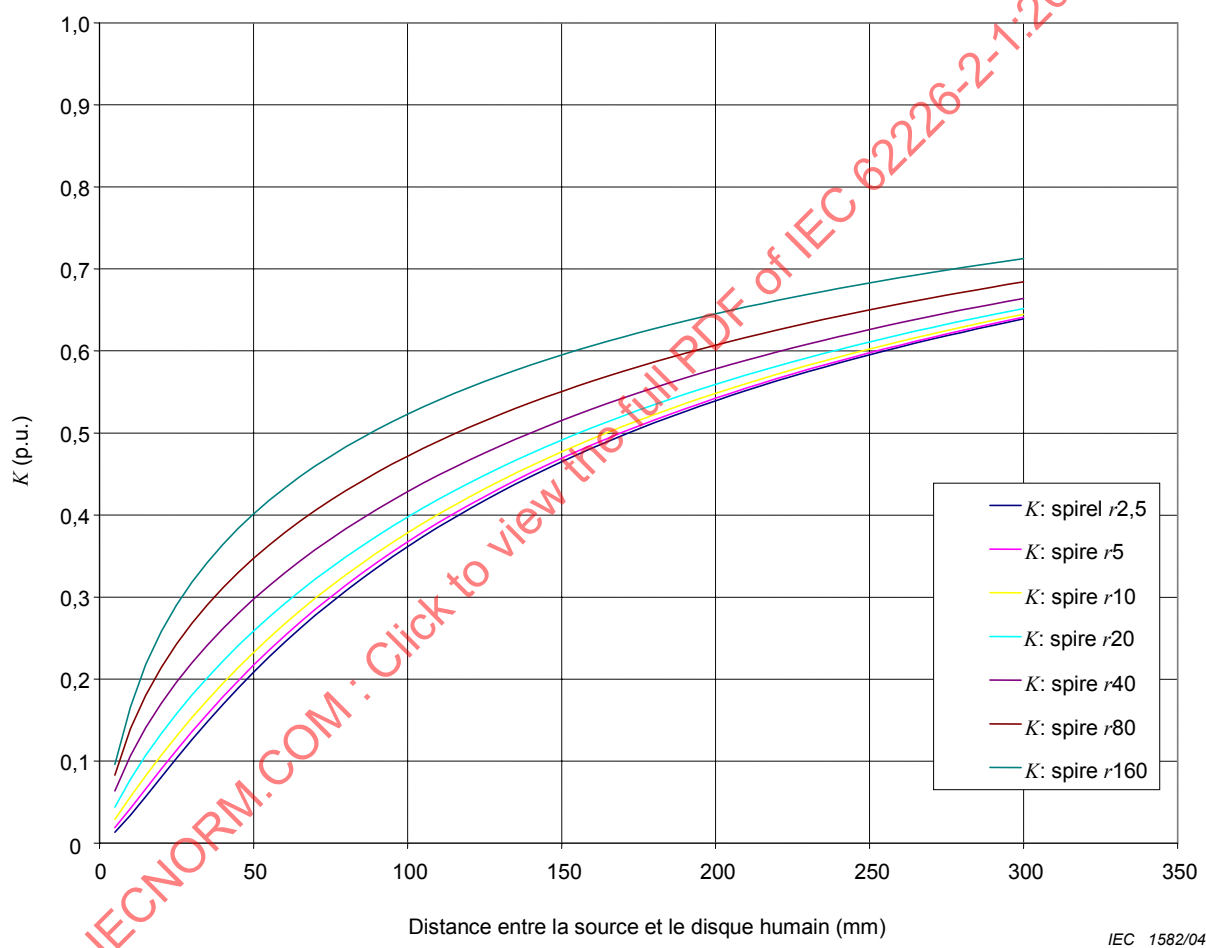


Figure D.8 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en une spire et pour différents rayons de spire r (disque homogène $R = 100$ mm)

D.1.2 Calculated values of the coupling factor for non-uniform magnetic field K

Results of the computation of the coupling factor for non-uniform magnetic fields K , as a function of the distance d , are given hereunder in the form of parametric curves, for different values of the radius of the source (parameter r , see Figures D.8 and D.9). Corresponding numerical values are given in Tables D.1 and D.2.

The distance d is the minimum distance between the edge of the disk and the closest part of the source.

D.1.2.1 Exposure close to the source: $0 < d < 300$ mm, $R = 100$ mm

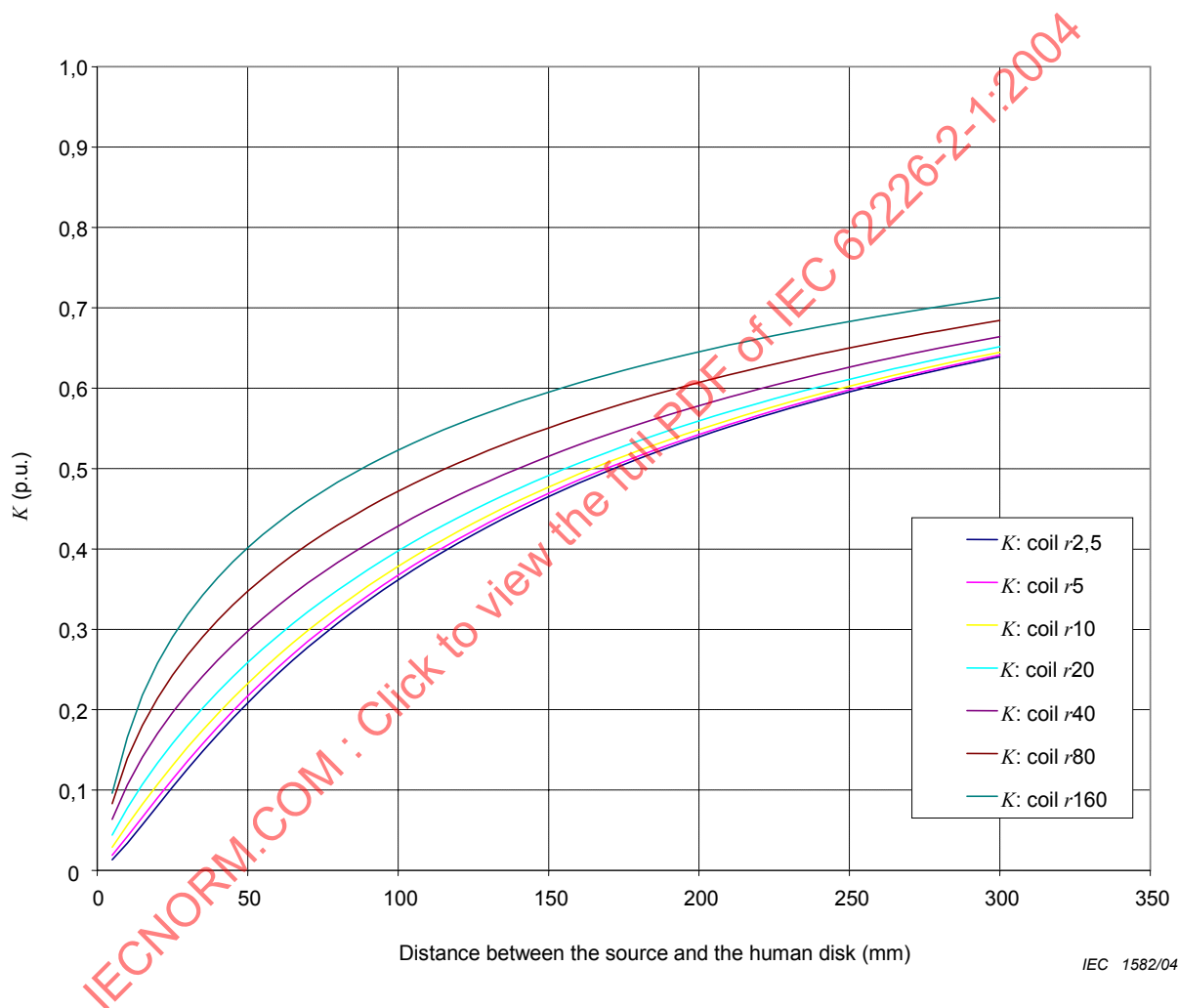


Figure D. 8 – Parametric curves of factor K for distances up to 300 mm to a source consisting of a coil and for different coil radius r (homogeneous disk $R = 100$ mm)

Tableau D.1 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 300 mm d'une source consistant en une spire (disque homogène $R = 100$ mm)

Distance entre la source et le disque mm	Valeur du rayon de la spire mm						
	2,5	5	10	20	40	80	160
10	0,034	0,042	0,056	0,078	0,106	0,139	0,166
20	0,080	0,090	0,107	0,134	0,170	0,214	0,258
30	0,126	0,136	0,153	0,181	0,220	0,268	0,318
40	0,169	0,178	0,195	0,222	0,261	0,311	0,364
50	0,208	0,217	0,233	0,259	0,297	0,347	0,401
60	0,244	0,252	0,267	0,292	0,329	0,378	0,433
70	0,277	0,285	0,298	0,322	0,358	0,405	0,460
80	0,308	0,315	0,327	0,349	0,383	0,430	0,483
90	0,336	0,342	0,354	0,374	0,407	0,452	0,504
100	0,361	0,367	0,378	0,397	0,428	0,472	0,523
110	0,385	0,391	0,401	0,419	0,448	0,490	0,540
120	0,407	0,412	0,422	0,439	0,467	0,507	0,555
130	0,428	0,433	0,442	0,458	0,484	0,523	0,570
140	0,447	0,451	0,460	0,475	0,500	0,537	0,583
150	0,465	0,469	0,477	0,491	0,515	0,551	0,595
160	0,482	0,486	0,493	0,507	0,529	0,563	0,606
170	0,497	0,501	0,508	0,521	0,543	0,575	0,617
180	0,512	0,516	0,522	0,534	0,555	0,586	0,627
190	0,526	0,529	0,536	0,547	0,567	0,597	0,636
200	0,539	0,542	0,548	0,559	0,578	0,607	0,645
210	0,552	0,555	0,560	0,571	0,589	0,617	0,654
220	0,563	0,566	0,572	0,582	0,599	0,626	0,662
230	0,575	0,577	0,582	0,592	0,608	0,634	0,669
240	0,585	0,588	0,593	0,602	0,617	0,642	0,676
250	0,595	0,598	0,602	0,611	0,626	0,650	0,683
260	0,605	0,607	0,612	0,620	0,634	0,658	0,689
270	0,614	0,616	0,620	0,628	0,642	0,665	0,696
280	0,623	0,625	0,629	0,636	0,650	0,671	0,702
290	0,631	0,633	0,637	0,644	0,657	0,678	0,707
300	0,639	0,641	0,645	0,652	0,664	0,684	0,713

**Table D.1 – Numerical values of factor K for distances up to 300 mm
to a source consisting of a coil
(homogeneous disk: $R = 100$ mm)**

Distance between the source and the disk mm	Value of the coil radius mm						
	2,5	5	10	20	40	80	160
10	0,034	0,042	0,056	0,078	0,106	0,139	0,166
20	0,080	0,090	0,107	0,134	0,170	0,214	0,258
30	0,126	0,136	0,153	0,181	0,220	0,268	0,318
40	0,169	0,178	0,195	0,222	0,261	0,311	0,364
50	0,208	0,217	0,233	0,259	0,297	0,347	0,401
60	0,244	0,252	0,267	0,292	0,329	0,378	0,433
70	0,277	0,285	0,298	0,322	0,358	0,405	0,460
80	0,308	0,315	0,327	0,349	0,383	0,430	0,483
90	0,336	0,342	0,354	0,374	0,407	0,452	0,504
100	0,361	0,367	0,378	0,397	0,428	0,472	0,523
110	0,385	0,391	0,401	0,419	0,448	0,490	0,540
120	0,407	0,412	0,422	0,439	0,467	0,507	0,555
130	0,428	0,433	0,442	0,458	0,484	0,523	0,570
140	0,447	0,451	0,460	0,475	0,500	0,537	0,583
150	0,465	0,469	0,477	0,491	0,515	0,551	0,595
160	0,482	0,486	0,493	0,507	0,529	0,563	0,606
170	0,497	0,501	0,508	0,521	0,543	0,575	0,617
180	0,512	0,516	0,522	0,534	0,555	0,586	0,627
190	0,526	0,529	0,536	0,547	0,567	0,597	0,636
200	0,539	0,542	0,548	0,559	0,578	0,607	0,645
210	0,552	0,555	0,560	0,571	0,589	0,617	0,654
220	0,563	0,566	0,572	0,582	0,599	0,626	0,662
230	0,575	0,577	0,582	0,592	0,608	0,634	0,669
240	0,585	0,588	0,593	0,602	0,617	0,642	0,676
250	0,595	0,598	0,602	0,611	0,626	0,650	0,683
260	0,605	0,607	0,612	0,620	0,634	0,658	0,689
270	0,614	0,616	0,620	0,628	0,642	0,665	0,696
280	0,623	0,625	0,629	0,636	0,650	0,671	0,702
290	0,631	0,633	0,637	0,644	0,657	0,678	0,707
300	0,639	0,641	0,645	0,652	0,664	0,684	0,713

D.1.2.2 Exposition à la distance: $0 < d < 1\,900\text{ mm}$, $R = 100\text{ mm}$

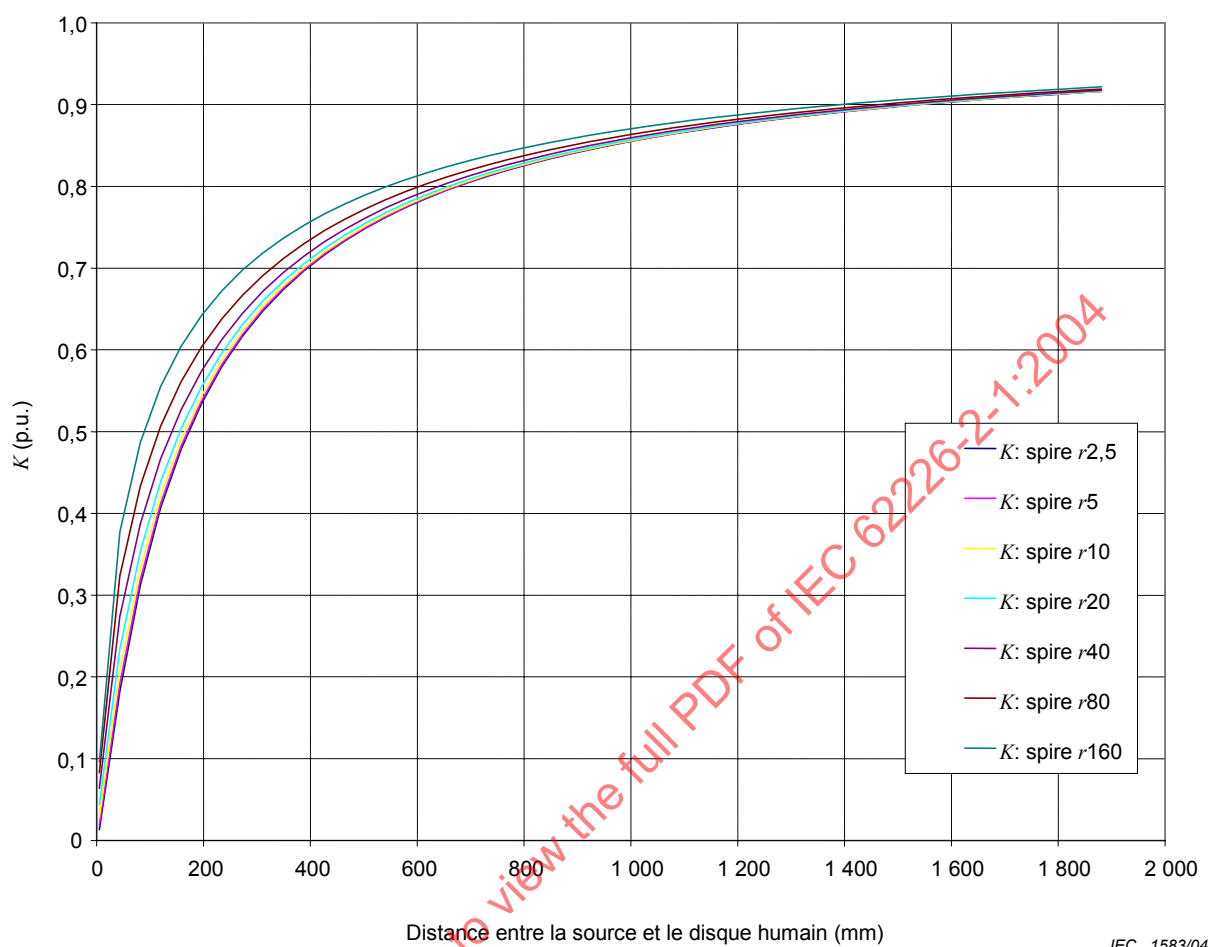


Figure D.9 – Courbes paramétriques du facteur K pour des distances jusqu'à $1\,900\text{ mm}$ d'une source consistant en une spire et pour différents rayons de spire r (disque homogène $R = 100\text{ mm}$)

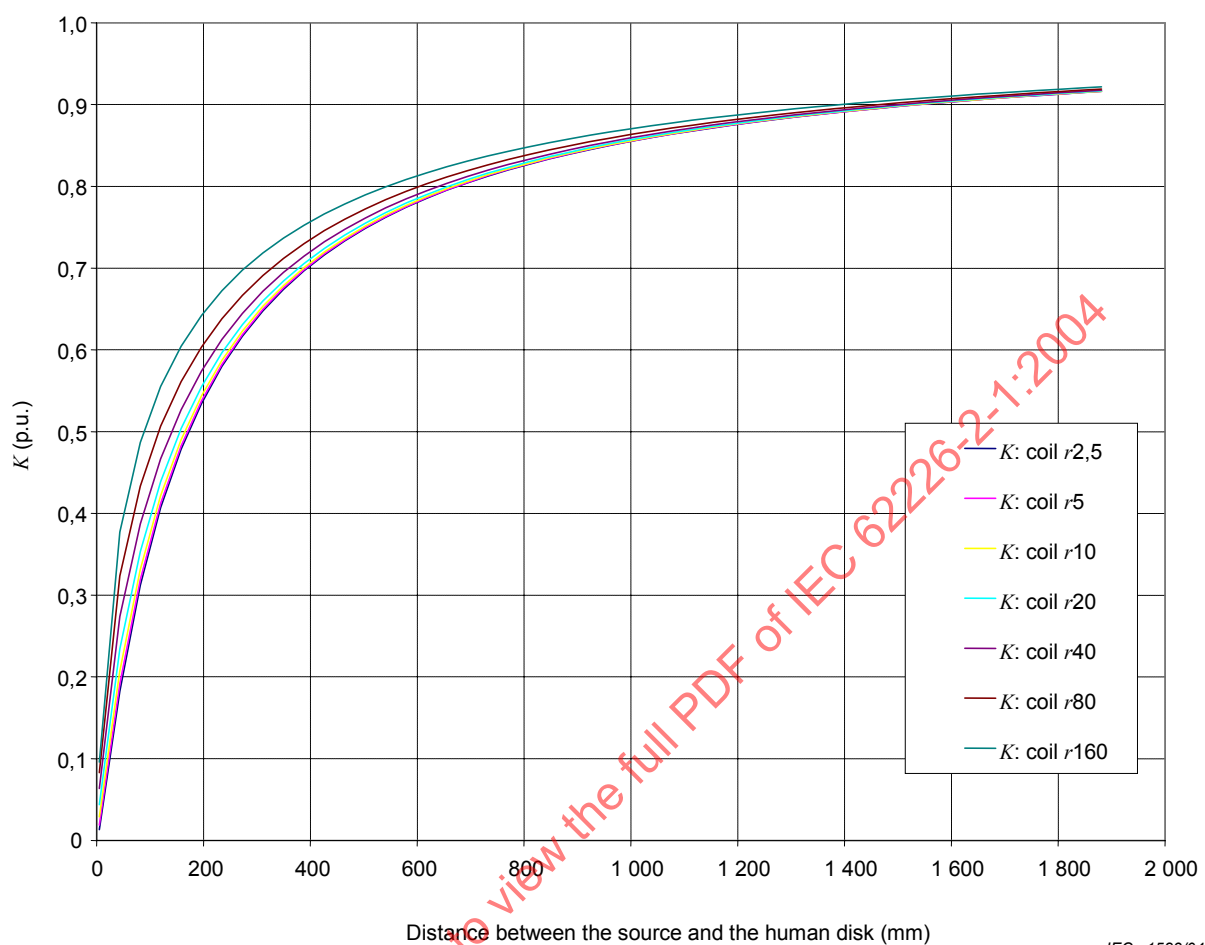
D.1.2.2 Exposure at distance: $0 < d < 1\,900$ mm, $R = 100$ mm

Figure D.9 – Parametric curves of factor K for distances up to 1 900 mm to a source consisting of a coil and for different coil radius r (homogeneous disk $R = 100$ mm)

Tableau D.2 – Valeurs numériques du facteur K pour des distances jusqu'à 1 900 mm d'une source consistant en une spire (disque homogène $R = 100$ mm)

Distance entre la source et le disque mm	Valeur du rayon de la spire mm						
	2,5	5	10	20	40	80	160
5	0,013	0,019	0,029	0,044	0,064	0,083	0,096
43	0,182	0,191	0,208	0,234	0,274	0,324	0,377
82	0,312	0,319	0,331	0,353	0,387	0,433	0,487
120	0,407	0,412	0,422	0,439	0,467	0,507	0,555
158	0,479	0,483	0,490	0,504	0,527	0,561	0,604
196	0,535	0,538	0,544	0,555	0,574	0,604	0,642
235	0,580	0,582	0,587	0,597	0,613	0,638	0,672
273	0,617	0,619	0,623	0,631	0,645	0,667	0,697
311	0,648	0,650	0,653	0,660	0,672	0,691	0,719
350	0,674	0,676	0,679	0,684	0,695	0,712	0,737
388	0,697	0,698	0,701	0,706	0,715	0,730	0,752
426	0,716	0,717	0,720	0,724	0,732	0,746	0,766
464	0,733	0,734	0,737	0,740	0,748	0,760	0,778
503	0,749	0,750	0,751	0,755	0,761	0,772	0,789
541	0,762	0,763	0,765	0,768	0,774	0,784	0,799
579	0,774	0,775	0,777	0,779	0,785	0,794	0,808
618	0,785	0,786	0,787	0,790	0,795	0,803	0,816
656	0,795	0,796	0,797	0,799	0,804	0,811	0,824
694	0,804	0,805	0,806	0,808	0,812	0,819	0,831
732	0,812	0,813	0,814	0,816	0,820	0,826	0,837
771	0,820	0,821	0,821	0,823	0,827	0,833	0,843
809	0,827	0,827	0,828	0,830	0,833	0,839	0,848
847	0,834	0,834	0,835	0,836	0,839	0,844	0,853
886	0,839	0,840	0,841	0,842	0,845	0,850	0,858
924	0,845	0,845	0,846	0,847	0,850	0,855	0,862
962	0,850	0,850	0,851	0,852	0,855	0,859	0,867
1 000	0,855	0,855	0,856	0,857	0,859	0,863	0,870
1 039	0,860	0,860	0,860	0,861	0,864	0,867	0,874
1 077	0,864	0,864	0,865	0,866	0,868	0,871	0,878
1 115	0,868	0,868	0,869	0,869	0,871	0,875	0,881
1 153	0,872	0,872	0,872	0,873	0,875	0,878	0,884
1 192	0,875	0,875	0,876	0,877	0,878	0,881	0,887
1 230	0,878	0,879	0,879	0,880	0,881	0,884	0,890
1 268	0,882	0,882	0,882	0,883	0,884	0,887	0,892
1 307	0,885	0,885	0,885	0,886	0,887	0,890	0,895
1 345	0,887	0,888	0,888	0,889	0,890	0,893	0,897
1 383	0,890	0,890	0,891	0,891	0,893	0,895	0,899
1 421	0,893	0,893	0,893	0,894	0,895	0,897	0,901
1 460	0,895	0,895	0,896	0,896	0,897	0,900	0,904
1 498	0,898	0,898	0,898	0,899	0,900	0,902	0,906
1 536	0,900	0,900	0,900	0,901	0,902	0,904	0,907
1 575	0,902	0,902	0,902	0,903	0,904	0,906	0,909
1 613	0,904	0,904	0,904	0,905	0,906	0,908	0,911
1 651	0,906	0,906	0,906	0,907	0,908	0,909	0,913
1 689	0,908	0,908	0,908	0,909	0,910	0,911	0,914
1 728	0,910	0,910	0,910	0,910	0,911	0,913	0,916
1 766	0,911	0,911	0,912	0,912	0,913	0,914	0,917
1 804	0,913	0,913	0,913	0,914	0,914	0,916	0,919
1 843	0,914	0,915	0,915	0,915	0,916	0,918	0,920
1 881	0,916	0,916	0,916	0,917	0,918	0,919	0,922