

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC  
404-5**

Deuxième édition  
Second edition  
1993-10

---

---

**Matériaux magnétiques –**

**Partie 5:**

**Aimants permanents (magnétiques durs) –  
Méthodes de mesure des  
propriétés magnétiques**

**Magnetic materials –**

**Part 5:**

**Permanent magnet (magnetically hard) materials –  
Methods of measurement of  
magnetic properties**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 404-5: 1993

## Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**  
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

## Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

## Validity of this publication

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 the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**  
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**  
Published yearly with regular updates

## Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC  
404-5**

Deuxième édition  
Second edition  
1993-10

---

---

**Matériaux magnétiques –**

**Partie 5:**

**Aimants permanents (magnétiques durs) –  
Méthodes de mesure des  
propriétés magnétiques**

**Magnetic materials –**

**Part 5:**

**Permanent magnet (magnetically hard) materials –  
Methods of measurement of  
magnetic properties**

© CEI 1993 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

**N**

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

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                             | Pages |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                                                                                          | 4     |
| Articles                                                                                                                                                                    |       |
| 1 Généralités .....                                                                                                                                                         | 8     |
| 1.1 Domaine d'application .....                                                                                                                                             | 8     |
| 1.2 Références normatives .....                                                                                                                                             | 8     |
| 2 Définitions .....                                                                                                                                                         | 8     |
| 3 Electro-aimant et conditions d'aimantation .....                                                                                                                          | 10    |
| 4 Epreuve .....                                                                                                                                                             | 14    |
| 5 Détermination de l'induction magnétique .....                                                                                                                             | 14    |
| 6 Détermination de la polarisation magnétique .....                                                                                                                         | 16    |
| 7 Mesure de l'intensité du champ magnétique .....                                                                                                                           | 18    |
| 8 Détermination de la courbe de désaimantation .....                                                                                                                        | 18    |
| 8.1 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, l'éprouvette<br>étant aimantée dans l'électro-aimant .....                                                    | 18    |
| 8.2 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, l'éprouvette<br>étant aimantée dans une bobine supraconductrice ou un banc<br>d'aimantation à impulsion ..... | 20    |
| 9 Détermination des caractéristiques principales .....                                                                                                                      | 20    |
| 9.1 Rémanence magnétique .....                                                                                                                                              | 20    |
| 9.2 Produit $(BH)_{\max}$ .....                                                                                                                                             | 20    |
| 9.3 Coercitivités $H_{cB}$ et $H_{cJ}$ .....                                                                                                                                | 22    |
| 9.4 Détermination de la droite de recul et de la perméabilité de recul .....                                                                                                | 22    |
| 10 Reproductibilité .....                                                                                                                                                   | 22    |
| 11 Procès-verbal d'essai .....                                                                                                                                              | 24    |
| Figures .....                                                                                                                                                               | 26    |
| Annexe A – Influence de l'entrefer entre l'éprouvette et les pièces polaires .....                                                                                          | 28    |

## CONTENTS

|                                                                                                                                           | Page |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD .....                                                                                                                            | 5    |
| Clause                                                                                                                                    |      |
| 1 General .....                                                                                                                           | 9    |
| 1.1 Scope .....                                                                                                                           | 9    |
| 1.2 Normative references .....                                                                                                            | 9    |
| 2 Definitions .....                                                                                                                       | 9    |
| 3 Electromagnet and conditions for magnetization .....                                                                                    | 11   |
| 4 Test specimen .....                                                                                                                     | 15   |
| 5 Determination of the magnetic flux density .....                                                                                        | 15   |
| 6 Determination of the magnetic polarization .....                                                                                        | 17   |
| 7 Measurement of the magnetic field strength .....                                                                                        | 19   |
| 8 Determination of the demagnetization curve .....                                                                                        | 19   |
| 8.1 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in the electromagnet .....                          | 19   |
| 8.2 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in a superconducting coil or pulse magnetizer ..... | 21   |
| 9 Determination of the principal characteristics .....                                                                                    | 21   |
| 9.1 Magnetic remanence .....                                                                                                              | 21   |
| 9.2 $(BH)_{\max}$ product .....                                                                                                           | 21   |
| 9.3 Coercivities $H_{cB}$ and $H_{cJ}$ .....                                                                                              | 23   |
| 9.4 Determination of the recoil line and the recoil permeability .....                                                                    | 23   |
| 10 Reproducibility .....                                                                                                                  | 23   |
| 11 Test report .....                                                                                                                      | 25   |
| Figures .....                                                                                                                             | 26   |
| Annex A – Influence of the air-gap between the test specimen and the pole pieces .....                                                    | 29   |

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

### Partie 5: Aimants permanents (magnétiques durs) – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques

#### AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La Norme internationale CEI 404-5 a été établie par le comité d'études 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1982 et constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

| DIS      | Rapport de vote |
|----------|-----------------|
| 68(BC)85 | 68(BC)88        |

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

L'annexe A fait partie intégrante de cette norme.

La CEI 404 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: *Matériaux magnétiques*.

- Première partie: 1979, Classification
- Deuxième partie: 1978, Méthodes de mesure des propriétés magnétiques, électriques et physiques des tôles et feuillets magnétiques

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## MAGNETIC MATERIALS -

**Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials -  
Methods of measurement  
of magnetic properties**

## FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 404-5 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1982 and constitutes a technical revision.

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

| DIS      | Report on voting |
|----------|------------------|
| 68(CO)85 | 68(CO)88         |

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

Annex A forms an integral part of this standard.

IEC 404 consists of the following parts, under the general title: *Magnetic materials*.

- Part 1: 1979, Classification
- Part 2: 1978, Methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip

- Partie 3: 1992, Méthodes de mesure des caractéristiques magnétiques des tôles et feuillets magnétiques à l'aide de l'essai sur tôle unique
- Quatrième partie: 1982, Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu des pièces massives en acier
- Partie 5: 1993, Aimants permanents (magnétiques durs) – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques
- Sixième partie: 1986, Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des alliages magnétiques doux fer-nickel isotropes, type E1, E3 et E4
- Septième partie: 1982, Méthode de mesure du champ coercitif des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert
- Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers
- Neuvième partie: 1987, Méthode de détermination des caractéristiques géométriques des tôles magnétiques en acier
- Dixième partie: 1988, Méthodes de mesure des propriétés magnétiques à fréquences moyennes des tôles et feuillets magnétiques en acier
- Partie 11: 1991, Méthode d'essai pour la détermination de la résistance d'isolement superficiel et feuillets magnétiques
- Partie 12: 1992, Guide aux méthodes de caractérisation de la tenue en température de l'isolation interlaminaire



- Part 3: 1992, Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester
- Part 4: 1982, Methods of measurement of the d.c. magnetic properties of solid steels
- Part 5: 1993, Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurements of magnetic properties
- Part 6: 1986, Methods of measurement of the magnetic properties of isotropic nickel-iron soft magnetic alloys, types E1, E3 and E4
- Part 7: 1982, Method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit
- Part 8: Specifications for individual materials
- Part 9: 1987, Methods of determination of the geometrical characteristics of magnetic steel sheet and strip
- Part 10: 1988, Methods of measurement of magnetic properties of magnetic steel sheet and strip at medium frequencies
- Part 11: 1991, Method of test for the determination of surface insulation resistance of magnetic sheet and strip
- Part 12: 1992, Guide to methods of assessment of temperature capability of interlaminar insulation coatings

## MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

### Partie 5: Aimants permanents (magnétiques durs) – Méthodes de mesure des propriétés magnétiques

#### 1 Généralités

##### 1.1 *Domaine d'application*

La présente partie de la CEI 404 a pour objet de spécifier les méthodes de mesure de l'induction magnétique, de la polarisation magnétique et de l'intensité du champ magnétique, ainsi que la détermination de la courbe de désaimantation et la droite de recul des matériaux pour aimants permanents, comme ceux qui sont spécifiés dans la CEI 404-8-1, leurs propriétés étant supposées homogènes dans tout leur volume.

Les caractéristiques d'un système magnétique ne dépendent pas seulement des propriétés du matériau pour aimant permanent mais aussi des dimensions du système, de l'entrefer et des autres éléments du circuit magnétique. Les méthodes décrites dans cette norme se rapportent aux mesures des propriétés magnétiques en circuit magnétique fermé, simulant un tore.

##### 1.2 *Références normatives*

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 404. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 404 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 50(121): 1978, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 121: Electromagnétisme*

CEI 50(221): 1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 221: Matériaux et composants magnétiques*

CEI 50(151): 1978, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 151: Dispositifs électroniques et magnétiques*

CEI 404-8-1: 1986, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section un: Spécifications normales des matériaux magnétiquement durs*

#### 2 Définitions

Les définitions relatives aux différents termes utilisés dans la présente partie de la CEI 404 sont précisées dans la CEI 50(121), la CEI 50(151) et la CEI 50(221).

## MAGNETIC MATERIALS –

### Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurement of magnetic properties

#### 1 General

##### 1.1 Scope

The purpose of this part of IEC 404 is to define the method of measurement of the magnetic flux density, magnetic polarization and the magnetic field strength and also the determination of the demagnetization curve and recoil line of permanent magnet materials, such as those specified in IEC 404-8-1, the properties of which are presumed homogeneous throughout their volume.

The performance of a magnetic system is not only dependent on the properties of the permanent magnet material but also on the dimensions of the system, the air-gap and other elements of the magnetic circuit. The methods described in this standard refer to the measurement of the magnetic properties in a closed magnetic circuit simulating a ring.

##### 1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 404. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 404 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 50(121): 1978, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 121: Electromagnetism*

IEC 50(151): 1978, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 151: Electrical and magnetic devices*

IEC 50(221): 1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 404-8-1: 1986, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section One: Standard specifications for magnetically hard materials*

#### 2 Definitions

The definitions relating to the various terms used in this part of IEC 404 are defined in IEC 50(121), IEC 50(151) and IEC 50(221).

Concernant les matériaux pour aimants permanents, cette norme distingue le champ coercitif  $H_{cB}$  (représentatif de la coercitivité de l'induction magnétique) et le champ coercitif intrinsèque  $H_{cJ}$  (représentatif de la coercitivité de la polarisation magnétique).

Les mesures spécifiées dans cette norme sont relatives à la fois à l'induction magnétique,  $B$ , et à la polarisation magnétique,  $J$ , en fonction de l'intensité du champ magnétique,  $H$ . Ces grandeurs sont reliées par l'équation suivante:

$$B = \mu_0 H + J \quad (1)$$

où

$B$  est l'induction magnétique, exprimée en teslas;

$\mu_0$  est la constante magnétique =  $4\pi \cdot 10^{-7}$ , en henry par mètre;

$H$  est l'intensité du champ magnétique, en ampères par mètre,

$J$  est la polarisation magnétique, en teslas.

Compte tenu de cette relation les valeurs de  $H_{cJ}$  peuvent être déduites du cycle d'hystérésis de l'induction  $B(H)$  et les valeurs de  $H_{cB}$  peuvent être déduites du cycle d'hystérésis de la polarisation magnétique  $J(H)$ . Le point pour lequel le module du produit  $BH$  atteint sa valeur maximale est appelé point de travail au  $(BH)_{\max}$  (voir figure 2).

### 3 Electro-aimant et conditions d'aimantation

Les mesures sont effectuées en circuit magnétique fermé, constitué de l'éprouvette et d'un électro-aimant réalisé lui-même en matériau magnétique doux. La culasse doit être de forme symétrique par construction, un des pôles au moins étant mobile afin de minimiser tout entrefer entre l'éprouvette et les pièces polaires (voir figure 1). A cet effet, les faces polaires planes en regard seront rectifiées aussi parallèles que possible l'une à l'autre et aussi perpendiculaires que possible à l'axe des pôles, afin de minimiser l'entrefer (voir figure A.1).

NOTE - Pour certaines mesures, la culasse et les pôles peuvent être feuilletés afin de minimiser les courants de Foucault. Il convient que la coercitivité du matériau ne dépasse pas normalement 100 A/m.

Pour obtenir un champ d'excitation suffisamment uniforme dans tout l'espace occupé par l'éprouvette, les conditions suivantes doivent être satisfaites simultanément:

#### 3.1 Conditions géométriques (figure 1)

$$d_1 \geq d_2 + 1,2 l' \quad (2)$$

$$d_1 \geq 2,0 l' \quad (3)$$

où

$d_1$  est le diamètre d'une pièce polaire circulaire, ou la dimension du plus petit côté d'une pièce polaire rectangulaire, en millimètres;

$l'$  est la distance entre les pièces polaires, en millimètres;

$d_2$  est le diamètre maximal du volume cylindrique où le champ est homogène, en millimètres.

For permanent magnet materials this standard deals with both the coercivity  $H_{cB}$  (the coercivity related to the magnetic flux density) and the intrinsic coercivity  $H_{cJ}$  (the coercivity related to the magnetic polarization).

The measurements specified in this standard are for both the magnetic flux density,  $B$ , and the magnetic polarization,  $J$ , as a function of the magnetic field strength,  $H$ . These quantities are related by the following equation:

$$B = \mu_0 H + J \quad (1)$$

where

- $B$  is the magnetic flux density, in teslas;
- $\mu_0$  is the magnetic constant  $= 4 \pi 10^{-7}$ , in henry per metre;
- $H$  is the magnetic field strength, in amperes per metre;
- $J$  is the magnetic polarization, in teslas.

Using this relationship  $H_{cJ}$  values can be obtained from the  $B(H)$  hysteresis loop and  $H_{cB}$  values can be obtained from the  $J(H)$  hysteresis loop. The point at which the modulus of the product  $BH$  has a maximum value is called the working point for  $(BH)_{max}$  (see figure 2).

### 3 Electromagnet and conditions for magnetization

The measurements are carried out in a closed magnetic circuit consisting of an electromagnet made of soft magnetic material and the test specimen. The construction of the yokes shall be symmetrical; at least one of the poles shall be movable to minimize the air-gap between the test specimen and the pole pieces (see figure 1). The end faces of both pole pieces shall be ground as nearly as possible parallel to each other and as nearly as possible perpendicular to the pole axis to minimize the air-gap (see figure A.1).

NOTE - For certain measurements, the yoke and the poles can be laminated to decrease eddy currents. The coercivity of the material should normally be not more than 100 A/m.

To obtain a sufficiently uniform magnetizing field in the space occupied by the test specimen, the following conditions shall be fulfilled simultaneously:

#### 3.1 Geometrical conditions (figure 1)

$$d_1 \geq d_2 + 1,2 l' \quad (2)$$

$$d_1 \geq 2,0 l' \quad (3)$$

where

- $d_1$  is the diameter of a circular pole piece or the dimension of the smallest side of a rectangular pole piece, in millimetres;
- $l'$  is the distance between the pole pieces, in millimetres;
- $d_2$  is the maximum diameter of the cylindrical volume with a homogeneous field, in millimetres.

Par rapport à la valeur du champ magnétique existant au centre de l'entrefer, la condition (2) garantit que la décroissance relative du champ magnétique atteint au plus 1 % sur une distance radiale égale à  $d_2/2$  et la condition (3) garantit que la croissance relative du champ atteint au plus 1 % au contact des faces polaires, le long de l'axe de l'électro-aimant.

### 3.2 Conditions électromagnétiques

Pendant la mesure de la courbe de désaimantation, l'induction dans les pièces polaires doit être maintenue à des valeurs notablement inférieures à la polarisation magnétique à saturation afin que les faces polaires soient assimilables autant que possible à des surfaces équipotentielles. En pratique, l'induction magnétique ne doit pas dépasser 1 T dans le fer et 1,2 T dans un alliage de fer contenant 35 % à 50 % de cobalt.

La culasse est pourvue de bobines d'excitation disposées symétriquement, aussi près que possible de l'éprouvette (voir figure 1). L'axe de l'éprouvette doit coïncider avec celui des bobines d'excitation.

Préalablement à la mesure, l'éprouvette doit être aimantée dans un champ magnétique  $H_{\max}$  pour l'amener dans un état proche de la saturation (voir la note suivante). La détermination de la courbe de désaimantation doit intervenir alors en appliquant un champ magnétique de direction opposée au champ utilisé pour l'aimantation initiale.

S'il n'est pas possible d'amener l'échantillon au voisinage de l'état saturé en le maintenant en place dans le circuit (par exemple si les conditions de la note suivante ne peuvent pas être satisfaites), alors l'échantillon doit être aimanté à l'extérieur de l'électro-aimant, dans une bobine supraconductrice ou un banc d'aimantation à impulsion.

NOTE - Si la norme de produit ou le fabricant ne spécifient pas la valeur de l'intensité du champ magnétique  $H_{\max}$ , il est recommandé d'aimanter l'éprouvette à saturation avant d'effectuer la mesure de la courbe de désaimantation. L'éprouvette sera considérée comme étant saturée si les relations suivantes sont satisfaites pour deux valeurs  $H_1$  et  $H_2$  de l'intensité du champ magnétique:

$$P_2 \leq P_1 e^{0,024\,54 \ln (H_2/H_1)} \quad (4)$$

$$\text{ou} \quad P_2 \leq P_1 10^{0,024\,54 \log (H_2/H_1)} \quad (5)$$

$$\text{et} \quad H_2 \geq 1,2 H_1 \quad (6)$$

où:

$P_2$  est la valeur maximale du produit  $(BH)_{\max}$ , en joules par mètre cube, ou celle du champ coercitif  $H_{CB}$  en ampères par mètre;

$P_1$  est la valeur moins élevée atteinte par le produit  $(BH)_{\max}$ , en joules par mètre cube, ou celle du champ coercitif  $H_{CB}$  en ampères par mètre;

$H_2$  est l'intensité du champ magnétique d'excitation, en ampères par mètre, utilisé pour l'obtention de  $P_2$ ;

$H_1$  est l'intensité du champ magnétique d'excitation, en ampères par mètre, utilisé pour l'obtention de  $P_1$ .

Dans le cas particulier où  $H_2/H_1 = 1,5$ , les relations (4) et (5) entraînent  $P_2 \leq 1,01 P_1$ .

En aucun cas, le processus d'aimantation utilisé ne doit entraîner un échauffement exagéré de l'éprouvette.



With reference to the magnetic field strength at the centre of the air-gap, condition (2) ensures that the maximum field decrease at a radial distance of  $d_2/2$  is 1 % and condition (3) ensures that the maximum field increase along the axis of the electromagnet at the pole faces is 1 %.

### 3.2 Electromagnetic conditions

During the measurement of the demagnetization curve, the flux density in the pole pieces shall be kept substantially lower than the saturation magnetic polarization so that the pole faces shall be brought as near as possible to be equipotential. In practice, the magnetic flux density shall be less than 1 T in iron and less than 1,2 T in iron alloy containing 35 % to 50 % cobalt.

The yoke is excited by magnetizing coils which are arranged symmetrically as near as possible to the test specimen (see figure 1). The axis of the test specimen shall be coincident with the axis of the magnetizing coils.

Before measurement, the test specimen shall be magnetized in a magnetic field  $H_{\max}$  intended to bring the test specimen close to saturation (see the following note). The determination of the demagnetization curve shall then be made in a magnetic field in the direction opposite to that used for the initial magnetization.

If it is not possible to magnetize the test specimen to near saturation within the yoke (for instance if the conditions in the following note cannot be met) the test specimen shall be magnetized outside the electromagnet in a superconducting coil or pulse magnetizer.

NOTE - Where the product standard or the manufacturer does not specify the value of the magnetizing field strength,  $H_{\max}$ , it is recommended that before the measurement of the demagnetization curve, the test specimen should be magnetized to saturation. The test specimen will be considered to be saturated if the following relationships hold for two values of magnetic field strength  $H_1$  and  $H_2$ :

$$P_2 \leq P_1 e^{0,024\,54 \ln (H_2/H_1)} \quad (4)$$

$$\text{or } P_2 \leq P_1 10^{0,024\,54 \log (H_2/H_1)} \quad (5)$$

$$\text{and } H_2 \geq 1,2 H_1 \quad (6)$$

where

$P_2$  is the maximum attainable value of  $(BH)_{\max}$ , in joules per cubic metre, or of coercivity  $H_{CB}$ , in amperes per metre;

$P_1$  is the lower value of  $(BH)_{\max}$ , in joules per cubic metre or of coercivity  $H_{CB}$ , in amperes per metre;

$H_2$  is the magnetic field strength corresponding to  $P_2$ , in amperes per metre;

$H_1$  is the magnetic field strength corresponding to  $P_1$ , in amperes per metre.

In the special case of  $H_2/H_1 = 1,5$ , relationships (4) and (5) become  $P_2 \leq 1,01 P_1$ .

In all cases, the magnetization process shall not cause the test specimen to be heated excessively.

#### 4 Epreuve

L'épreuve doit être de forme simple (par exemple un cylindre ou un parallélépipède droits). La longueur  $l$  de l'épreuve ne doit pas être inférieure à 5 mm et ses autres dimensions doivent être aussi d'au moins 5 mm et telles que l'épreuve et le système de détection soient inclus dans le diamètre  $d_2$  défini à l'article 3.

Les faces terminales de l'épreuve doivent être usinées aussi parallèles que possible et perpendiculaires à l'axe de l'épreuve afin de réduire l'entrefer (voir annexe A).

La section de l'épreuve doit avoir une surface aussi constante que possible sur toute sa longueur; toute variation doit être inférieure à 1 % de sa section minimale. La section moyenne doit être déterminée à mieux de 1 %.

La direction d'aimantation doit être indiquée sur l'épreuve.

#### 5 Détermination de l'induction magnétique

Les variations de l'induction magnétique dans l'épreuve sont déterminées par intégration des tensions induites dans une bobine de mesure.

Les enroulements de la bobine de mesure doivent être placés aussi près que possible de l'épreuve et symétriquement par rapport aux faces polaires. Les fils de connexion doivent être étroitement torsadés afin d'éviter toute erreur due aux tensions induites dans les boucles de ces fils.

L'erreur totale de mesure de l'induction magnétique ne doit pas dépasser  $\pm 2$  %.

La variation de l'induction magnétique apparente  $\Delta B_{ap}$ , non corrigée du flux dans l'air, entre les deux instants  $t_1$  et  $t_2$  est donnée par la relation:

$$\Delta B_{ap} = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (7)$$

où

$B_2$  est l'induction magnétique à l'instant  $t_2$ , en teslas;

$B_1$  est l'induction magnétique à l'instant  $t_1$ , en teslas;

$A$  est l'aire de la section de l'épreuve, en mètres carrés;

$N$  est le nombre de spires de la bobine de mesure;

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$  est l'intégrale de la tension induite, en webers, étendue à l'intervalle de temps  $(t_2 - t_1)$  exprimé en secondes.

Cette variation de l'induction magnétique apparente  $\Delta B_{ap}$  doit être corrigée pour tenir compte du flux dans l'air, embrassé par la bobine de mesure. Ainsi, la variation d'induction magnétique corrigée dans l'épreuve  $\Delta B$  est donnée par la relation:



#### 4 Test specimen

The test specimen shall have a simple shape (for example a right cylinder or parallelepiped). The length  $l$  of the test specimen shall be not less than 5 mm and its other dimensions shall be a minimum of 5 mm and shall be such that the test specimen and the sensing devices shall be within the diameter  $d_2$  as defined in clause 3.

The end faces of the test specimen shall be made as nearly as possible parallel to each other and perpendicular to the test specimen axis to reduce the air-gap (see annex A).

The cross-sectional area of the test specimen shall be as uniform as possible throughout its length; any variation shall be less than 1 % of its minimum cross-sectional area. The mean cross-sectional area shall be determined to within 1 %.

The test specimen shall be marked with the direction of magnetization.

#### 5 Determination of the magnetic flux density

The changes in magnetic flux density in the test specimen are determined by integrating the voltages induced in a search coil.

The search coil shall be wound as closely as possible to the test specimen and symmetrical with respect to the pole faces. The leads shall be tightly twisted to avoid errors caused by voltages induced in loops in the leads.

The total error of measuring the magnetic flux density shall be not greater than  $\pm 2$  %.

The variation of the apparent magnetic flux density  $\Delta B_{ap}$ , uncorrected for air flux, between the two instants  $t_1$  and  $t_2$  is given by:

$$\Delta B_{ap} = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (7)$$

where

$B_2$  is the magnetic flux density at the instant  $t_2$ , in teslas;

$B_1$  is the magnetic flux density at the instant  $t_1$ , in teslas;

$A$  is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;

$N$  is the number of turns on the search coil;

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$  is the integrated induced voltage, in webers, for the time interval of integration  $(t_2 - t_1)$ , in seconds.

This change in the apparent magnetic flux density  $\Delta B_{ap}$  shall be corrected to take into account the air flux included in the search coil. Thus, the change in magnetic flux density  $\Delta B$  in the test specimen is given by:

$$\Delta B = \Delta B_{ap} - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \quad (8)$$

où

$\mu_0$  est la constante magnétique =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  henry par mètre;

$\Delta H$  est la variation de l'intensité du champ magnétique, en ampères par mètre;

$A_t$  est l'aire moyenne d'une spire de la bobine de mesure, en mètres carrés.

## 6 Détermination de la polarisation magnétique

Les variations de la polarisation magnétique dans l'éprouvette sont obtenues en intégrant les tensions induites aux bornes d'un système constitué de deux bobines de mesure, l'éprouvette n'étant contenue que dans une seule de ces bobines. Si chacune de ces bobines est caractérisée par le même produit surface d'une spire par son nombre de tours, et si ces deux bobines sont branchées en série opposition, la variation de polarisation magnétique  $\Delta J$  dans l'éprouvette est donnée par la relation:

$$\Delta J = J_2 - J_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (9)$$

où

$J_2$  est la polarisation magnétique à l'instant  $t_2$ , en teslas;

$J_1$  est la polarisation magnétique à l'instant  $t_1$ , en teslas;

$A$  est l'aire de la section de l'éprouvette, en mètres carrés;

$N$  est le nombre de spires de la bobine de mesure;

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$  est l'intégrale de la tension induite, en webers, étendue à l'intervalle de temps  $(t_2 - t_1)$  exprimé en secondes.

Ainsi, la tension de sortie de la bobine 1 compense celle de la bobine 2 sauf pour la partie relative au flux de  $J$  dans l'éprouvette.

Comme la mesure n'impose aucune correction de flux dans l'air, différentes éprouvettes ayant des sections du même ordre de grandeur peuvent être mesurées à partir du même système de deux bobines de mesure.

Le système des deux bobines de mesure doit être entièrement contenu dans la zone de champ homogène définie par les conditions (2) et (3).

L'erreur totale de mesure ne doit pas dépasser  $\pm 2 \%$ .

$$\Delta B = \Delta B_{ap} - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \quad (8)$$

where

$\mu_0$  is the magnetic constant =  $4 \pi 10^{-7}$ , in henry per metre;

$\Delta H$  is the change in the measured magnetic field strength, in amperes per metre;

$A_t$  is the average cross-sectional area of the search coil, in square metres.

## 6 Determination of the magnetic polarization

The changes in magnetic polarization in the test specimen are determined by integrating the induced voltages at the terminals of a 2-search-coil device where the test specimen is contained in only one of these coils. If each of the individual coils has the same product of cross-sectional area and the number of turns, and if both are connected electrically in opposition, the change of magnetic polarization  $\Delta J$  in the test specimen is given by:

$$\Delta J = J_2 - J_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (9)$$

where

$J_2$  is the magnetic polarization at the instant  $t_2$ , in teslas;

$J_1$  is the magnetic polarization at the instant  $t_1$ , in teslas;

$A$  is the cross-sectional area of the test specimen, in square metres;

$N$  is the number of turns on the search coil;

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$  is the integrated induced voltage, in webers, for the time interval of integration ( $t_2 - t_1$ ) in seconds.

Thus, the output of coil 1 compensates for the output of coil 2 except for  $J$  within the test specimen.

Because no individual air flux correction is needed, test specimens having a range of cross-sectional areas may be measured with the same two-search-coil device.

The two-search-coil device shall lie totally within the homogeneous field defined by conditions (2) and (3).

The total measuring error shall not be greater than  $\pm 2 \%$ .

## 7 Mesure de l'intensité du champ magnétique

L'intensité du champ magnétique à la surface de l'éprouvette n'est égale à l'intensité du champ magnétique dans l'éprouvette que dans la partie de l'espace où le vecteur champ magnétique est parallèle à la surface latérale de l'éprouvette. Il faut donc placer un capteur sensible au champ magnétique dans la zone de champ homogène, aussi près que possible de l'éprouvette et symétriquement par rapport à ses faces terminales (voir figure 1).

Pour déterminer l'intensité du champ magnétique on peut utiliser une bobine de détection plate, un potentiomètre magnétique, ou une sonde de Hall, avec l'appareillage approprié. Les dimensions du capteur de champ magnétique et son positionnement doivent être tels qu'il soit contenu à l'intérieur de la surface limitée par le diamètre  $d_2$  (voir les conditions (2) et (3)).

Afin de diminuer les erreurs de mesure, l'entrefer entre l'échantillon et les pièces polaires doit être faible. L'influence de l'entrefer est traitée à l'annexe A.

Le système utilisé pour la mesure de l'intensité du champ magnétique d'excitation doit être étalonné. L'erreur totale de mesure ne doit pas dépasser  $\pm 2\%$ .

NOTE - Il convient que les faces polaires des pôles de l'électro-aimant soient des surfaces magnétiquement équipotentiellles (voir l'article 3). Dans le cas de matériaux pour aimants permanents avec une aimantation rémanente importante, ou une grande coercitivité, ou ces deux caractéristiques simultanées, on peut être conduit à utiliser des inductions supérieures à 1,0 T ou 1,2 T. De telles conditions génèrent des valeurs de l'induction magnétique inacceptables dans les régions des pièces polaires situées au voisinage de l'éprouvette. Dans cette éventualité les surfaces polaires cessent d'être des surfaces équipotentiellles et des erreurs plus grandes peuvent en résulter.

## 8 Détermination de la courbe de désaimantation

On obtient et on représente la courbe de désaimantation par un graphe  $B(H)$  ou  $J(H)$ . Le passage d'une valeur originale  $B$  à une valeur  $J$  (et vice versa) peut être réalisé par une méthode électrique ou numérique en soustrayant (ou en additionnant)  $\mu_0 H$  conformément à l'équation (1).

La méthode utilisée pour la détermination des courbes  $B(H)$  est décrite dans les paragraphes 8.1 et 8.2 qui suivent. Un raisonnement analogue peut être fait à propos des courbes  $J(H)$ , la polarisation magnétique  $J$  se substituant alors à l'induction  $B$  dans toutes les formules et les courbes.

Les mesures doivent être réalisées à la température ambiante de  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ . La température de l'éprouvette doit être mesurée à l'aide d'un capteur de température non magnétique fixé aux pièces polaires de l'électro-aimant. Toutes les variations thermiques des instruments de mesure (par exemple les sondes à effet Hall) doivent être prises en compte.

### 8.1 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, l'éprouvette étant aimantée dans l'électro-aimant

Le système de bobines utilisé pour mesurer  $B$  ou  $J$  est relié à un fluxmètre intégrateur dont on règle le zéro. L'éprouvette, insérée dans la bobine de mesure, est mise en place dans l'électro-aimant et aimantée à saturation. Le courant d'excitation est ensuite réduit à un niveau très bas, annulé ou inversé si nécessaire, pour annuler l'intensité du champ magnétique. La valeur correspondante de l'induction magnétique ou de la polarisation magnétique est enregistrée.

## 7 Measurement of the magnetic field strength

The magnetic field strength at the surface of the test specimen is equal to the magnetic field strength inside the test specimen only in that part of the space where the magnetic field strength vector is parallel to the side surface of the test specimen. Therefore, a magnetic field strength sensor is placed in the homogeneous field zone as near as possible to the test specimen and symmetrical with respect to the end faces (see figure 1).

To determine the magnetic field strength, a flat search coil, a magnetic potentiometer or a Hall probe is used together with suitable instruments. The dimensions of the magnetic field sensor and its location shall be such that it shall be within the area limited by the diameter  $d_2$  (see conditions (2) and (3)).

To reduce the measurement error, the air-gap between the test specimen and the pole pieces shall be small. The influence of the air-gap is considered in annex A.

The magnetic field strength measuring system shall be calibrated. The total measuring error shall be not greater than  $\pm 2\%$ .

NOTE - The pole faces of the poles of the electromagnet should be magnetically equipotential surfaces (see clause 3). In some permanent magnet materials with high remanence, high coercivity, or both, magnetic flux densities higher than 1,0 T or 1,2 T can occur. These can then generate unacceptably high magnetic flux densities in parts of the pole pieces adjacent to the test specimen. In such cases the pole faces are no longer equipotential surfaces and greater errors can occur.

## 8 Determination of the demagnetization curve

The demagnetization curve can be obtained or plotted as a  $B(H)$  or a  $J(H)$  graph. Conversion of an originally obtained  $B$ -signal into a  $J$ -signal and vice versa can be performed electrically or numerically by subtracting or adding, respectively,  $\mu_0 H$  according to equation (1).

The determination of  $B(H)$  curves is described in the following subclauses 8.1 and 8.2. In the case of  $J(H)$  curves an analogous reasoning holds if the magnetic flux density  $B$  is replaced by the magnetic polarization  $J$  in the relevant formulae and curves.

The measurements shall be carried out at an ambient temperature of  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ . The temperature of the test specimen shall be measured by a non-magnetic temperature sensor affixed to the pole pieces of the electromagnet. Any temperature dependence of the measuring instruments (e.g. Hall probe) shall be taken into account.

### 8.1 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in the electromagnet

The search coil device to be used for measuring  $B$  or  $J$  is connected to a calibrated flux integrator which is adjusted to zero. The test specimen is inserted into the search coil and assembled into the electromagnet and magnetized to saturation. The magnetizing current is then reduced to a very low level, zero, or reversed if necessary, to produce zero magnetic field strength. The corresponding value of magnetic flux density or polarization is recorded.

Le courant étant appliqué ensuite dans la direction opposée à celle utilisée pour aimanter l'éprouvette, on augmente progressivement l'intensité du courant jusqu'à ce que le champ d'excitation atteigne le champ coercitif  $H_{CB}$  ou  $H_{CJ}$ . La vitesse de variation du champ d'excitation magnétique doit rester suffisamment faible pour éviter tout déphasage entre  $H$  et  $B$  ou la production de courants induits dans l'éprouvette. Pour certains matériaux, il existe un délai non négligeable entre la variation d'induction magnétique et la variation du champ qui la provoque. Dans ce cas, la constante de temps d'intégration du fluxmètre doit être suffisante, et sa dérive suffisamment faible, pour permettre une intégration précise.

Les valeurs correspondantes de  $H$  et  $B$ , ou de  $H$  et  $J$ , sur la courbe de désaimantation seront déduites soit de la courbe tracée en continu à l'aide d'un enregistreur relié aux sorties du système utilisé pour la mesure du champ magnétique et pour la mesure du champ d'induction, soit de mesures point par point du champ magnétique et du champ d'induction ou de la polarisation magnétique.

## 8.2 Principe de détermination de la courbe de désaimantation, l'éprouvette étant aimantée dans une bobine supraconductrice ou un banc d'aimantation à impulsion

L'éprouvette est aimantée à saturation, soit dans une bobine supraconductrice, soit en utilisant un banc d'aimantation à impulsion, conformément à l'article 3.

Le système de bobines utilisé pour la mesure de  $B$  ou  $J$  est relié à un fluxmètre intégrateur calibré dont on règle le zéro. L'éprouvette est insérée dans la bobine de mesure, puis elle est mise en place dans l'électro-aimant et aimantée à saturation dans la même direction que précédemment quand on a utilisé la bobine supraconductrice ou le banc d'aimantation à impulsion.

Le courant dans l'électro-aimant est ensuite réduit à un niveau très bas, annulé ou inversé si nécessaire, pour annuler l'intensité du champ magnétique appliqué à l'éprouvette. La valeur correspondante de l'induction magnétique, ou celle de la polarisation magnétique est enregistrée.

Le courant dans l'électro-aimant, appliqué en direction tendant à désaimanter l'éprouvette, est alors lentement augmenté en accord avec la procédure décrite en 8.1 jusqu'à ce que le champ magnétique dépasse le champ coercitif  $H_{CB}$  ou  $H_{CJ}$ .

Les couples de valeurs correspondantes  $H$  et  $B$ , ou  $H$  et  $J$ , sur la courbe de désaimantation sont obtenus conformément à la procédure décrite en 8.1.

## 9 Détermination des caractéristiques principales

### 9.1 Rémanence magnétique

La rémanence magnétique est donnée par l'intersection de la courbe de désaimantation avec l'axe des  $B$  ou des  $J$ .

### 9.2 Produit $(BH)_{\max}$

Le produit  $(BH)_{\max}$  est la valeur maximale du module du produit des valeurs correspondantes  $B$  et  $H$  sur la courbe de désaimantation.



With the current in the reverse direction to that used for magnetization, the current level is increased until the magnetic field strength has passed the coercivity  $H_{cB}$  or  $H_{cJ}$ . The speed of variation of the magnetic field strength shall be sufficiently slow to avoid the production of a phase difference between  $H$  and  $B$  or of eddy currents in the test specimen. With some materials there is a significant delay between the change in the magnetic flux density and the change in magnetic field strength. In this case, the time constant of the flux integrator shall be long enough and the zero drift sufficiently low to ensure accurate integration.

Corresponding values of  $H$  and  $B$  or  $H$  and  $J$  on the demagnetization curve shall be obtained either from a continuous curve produced by a recorder connected to the outputs of the magnetic field strength measurement device and the magnetic flux integrator or from point-by-point measurements of the magnetic field strength and the magnetic flux density or magnetic polarization.

## 8.2 Principle of determination of the demagnetization curve, test specimen magnetized in a superconducting coil or pulse magnetizer

The test specimen is magnetized to saturation in either a superconducting coil or by using a pulse magnetizer in accordance with clause 3.

The search coil device to be used for measuring  $B$  or  $J$  is connected to a calibrated flux integrator which is adjusted to zero. The test specimen is inserted into the search coil and assembled into the electromagnet and magnetized towards saturation in the same direction as previously magnetized in the superconducting coil or pulse magnetizer.

The magnetizing current is then reduced to a very low level, zero or reversed if necessary, to produce zero magnetic field strength. The corresponding value of magnetic flux density or magnetic polarization is recorded.

The current in the electromagnet is then slowly increased further in the reverse direction in accordance with 8.1 until the magnetic field strength has passed the coercivity  $H_{cB}$  or  $H_{cJ}$ .

Corresponding values of  $H$  and  $B$  or  $H$  and  $J$  on the demagnetization curve shall be obtained in accordance with 8.1.

## 9 Determination of the principal characteristics

### 9.1 Magnetic remanence

The magnetic remanence is given by the intercept of the demagnetization curve with the  $B$  or  $J$  axis.

### 9.2 $(BH)_{max}$ product

The  $(BH)_{max}$  product is the maximum value of the modulus of the product of corresponding values of  $B$  and  $H$  for the demagnetization curve.



Les méthodes suivantes constituent des exemples de procédures de détermination:

- évaluation par lecture directe ou par interpolation, à partir d'une famille de courbes  $B \cdot H = \text{constante}$  (voir figure 2);
- calcul du produit  $B \cdot H$  pour un certain nombre de points de la courbe de désaimantation, en s'assurant que la valeur maximale du produit a bien été obtenue;
- évaluation du produit  $B \cdot H$  par une multiplication électronique et report du produit en fonction de  $H$  ou de  $B$ .

### 9.3 Coercitivités $H_{cB}$ et $H_{cJ}$

Le champ coercitif  $H_{cB}$  est donné par la valeur du champ à l'intersection de la courbe de désaimantation avec l'axe  $B = 0$ . Le champ coercitif  $H_{cJ}$  est donné par la valeur du champ à l'intersection de la courbe de désaimantation avec l'axe  $J = 0$ .

### 9.4 Détermination de la droite de recul et de la perméabilité de recul

Pour réaliser l'état initial  $B_{rec}$ ,  $H_{rec}$  de la droite de recul (figure 3), l'éprouvette doit avoir été aimantée au préalable par un champ magnétique d'intensité  $H_{max}$ . On revient ensuite dans le second quadrant du cycle d'hystérésis et on augmente le courant de désaimantation jusqu'à atteindre la valeur  $H_{rec}$ . L'intensité du champ magnétique est ensuite diminuée à nouveau de la valeur  $\Delta H$  et la variation d'induction magnétique correspondante  $\Delta B$  est mesurée. La perméabilité de recul  $\mu_{rec}$  est calculée à partir de la formule:

$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (10)$$

où

$\mu_{rec}$  est la perméabilité de recul;

$\Delta B$  est la variation d'induction magnétique correspondant à la variation  $\Delta H$ , en teslas;

$\Delta H$  est la variation de champ magnétique à partir de  $H_{rec}$ , en ampères par mètre;

$\mu_0$  est la constante magnétique =  $4\pi \cdot 10^{-7}$ , en henry par mètre.

Comme habituellement la perméabilité de recul n'est pas constante tout au long de la courbe de désaimantation, les valeurs  $H_{rec}$ ,  $B_{rec}$  et  $\Delta H$  doivent être indiquées.

## 10 Reproductibilité

La reproductibilité de ces mesures est caractérisée par un écart type indiqué dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 – Reproductibilité dans les mesures des caractéristiques magnétiques des matériaux pour aimants permanents

| Grandeur     | AlNiCo | Ferrites, aimants terres rares |
|--------------|--------|--------------------------------|
| $B_r$        | 1 %    | 2 %                            |
| $H_{cB}$     | 1 %    | 2 %                            |
| $(BH)_{max}$ | 1,5 %  | 3 %                            |

The following are examples of methods by which it can be determined:

- evaluation by direct reading or interpolation from a family of curves of  $B \cdot H = \text{constant}$  (see figure 2);
- calculation of the product  $B \cdot H$  for a number of points of the demagnetization curve and ensuring that the maximum value has been covered;
- evaluation by multiplying  $B$  and  $H$  electronically and plotting the product as a function of  $H$  or  $B$ .

### 9.3 Coercivities $H_{cB}$ and $H_{cJ}$

The coercivity  $H_{cB}$  is given by the intercept of the demagnetization curve with the straight line  $B = 0$ . The coercivity  $H_{cJ}$  is given by the intercept of the demagnetization curve with the line  $J = 0$ .

### 9.4 Determination of the recoil line and the recoil permeability

For the starting-point  $B_{\text{rec}}$ ,  $H_{\text{rec}}$  of the recoil line (figure 3), the test specimen shall be previously magnetized by a magnetic field strength  $H_{\text{max}}$ . Operating in the second quadrant of the hysteresis loop, the demagnetizing current is increased to the value corresponding to  $H_{\text{rec}}$ . Then, the magnetic field strength is reduced by a value  $\Delta H$  and the corresponding change in magnetic flux density  $\Delta B$  is measured. The relative recoil permeability  $\mu_{\text{rec}}$  is calculated from the equation:

$$\mu_{\text{rec}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (10)$$

where

- $\mu_{\text{rec}}$  is the recoil permeability;
- $\Delta B$  is the change in magnetic flux density corresponding to the change  $\Delta H$ , in teslas;
- $\Delta H$  is the change in magnetic field strength from  $H_{\text{rec}}$ , in amperes per metre;
- $\mu_0$  is the magnetic constant =  $4\pi \cdot 10^{-7}$ , in henry per metre.

Since the recoil permeability is not usually constant along the demagnetization curve, the values  $H_{\text{rec}}$ ,  $B_{\text{rec}}$ , and  $\Delta H$  shall be indicated.

## 10 Reproducibility

The reproducibility of the measurements is characterized by a standard deviation given in the following table 1.

Table 1 – Reproducibility of the measurement of the magnetic characteristics of permanent magnetic materials

| Quantity            | AlNiCo | Ferrites, RE magnets |
|---------------------|--------|----------------------|
| $B_r$               | 1 %    | 2 %                  |
| $H_{cB}$            | 1 %    | 2 %                  |
| $(BH)_{\text{max}}$ | 1,5 %  | 3 %                  |