

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 404-5

Première édition – First edition

1982

Matériaux magnétiques

Cinquième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques
des matériaux durs (aimants permanents)

Magnetic materials

Part 5: Methods of measurement of the magnetic properties
of magnetically hard (permanent magnet) materials



© CEI 1982

Droits de reproduction réservés – Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembe

Genève, Suisse

Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la Commission afin d'assurer qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du V.E.I., soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

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

- la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 117 de la CEI: Symboles graphiques recommandés.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 117 de la CEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture, qui énumère les publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

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

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the I.E.V. 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:

- IEC Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- IEC Publication 117: Recommended graphical symbols.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 117, 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 inside of the back cover, which lists IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 404-5

Première édition – First edition
1982

Matériaux magnétiques

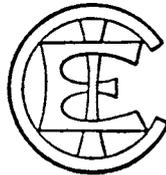
**Cinquième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques
des matériaux durs (aimants permanents)**

Magnetic materials

**Part 5: Methods of measurement of the magnetic properties
of magnetically hard (permanent magnet) materials**

Mots clés: matériaux magnétiques durs;
essais; propriétés magnétiques
des matériaux; mesure.

Key words: magnetically hard materials;
testing; magnetic properties
of materials; measurement.



© CEI 1982

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4

INTRODUCTION

Articles

1. Domaine d'application	6
2. Précision et reproductibilité	6
3. Définitions	6

CHAPITRE I: MATÉRIAUX DE COERCITIVITÉ H_{cJ} INFÉRIEURE OU ÉGALE À 600 kA/m

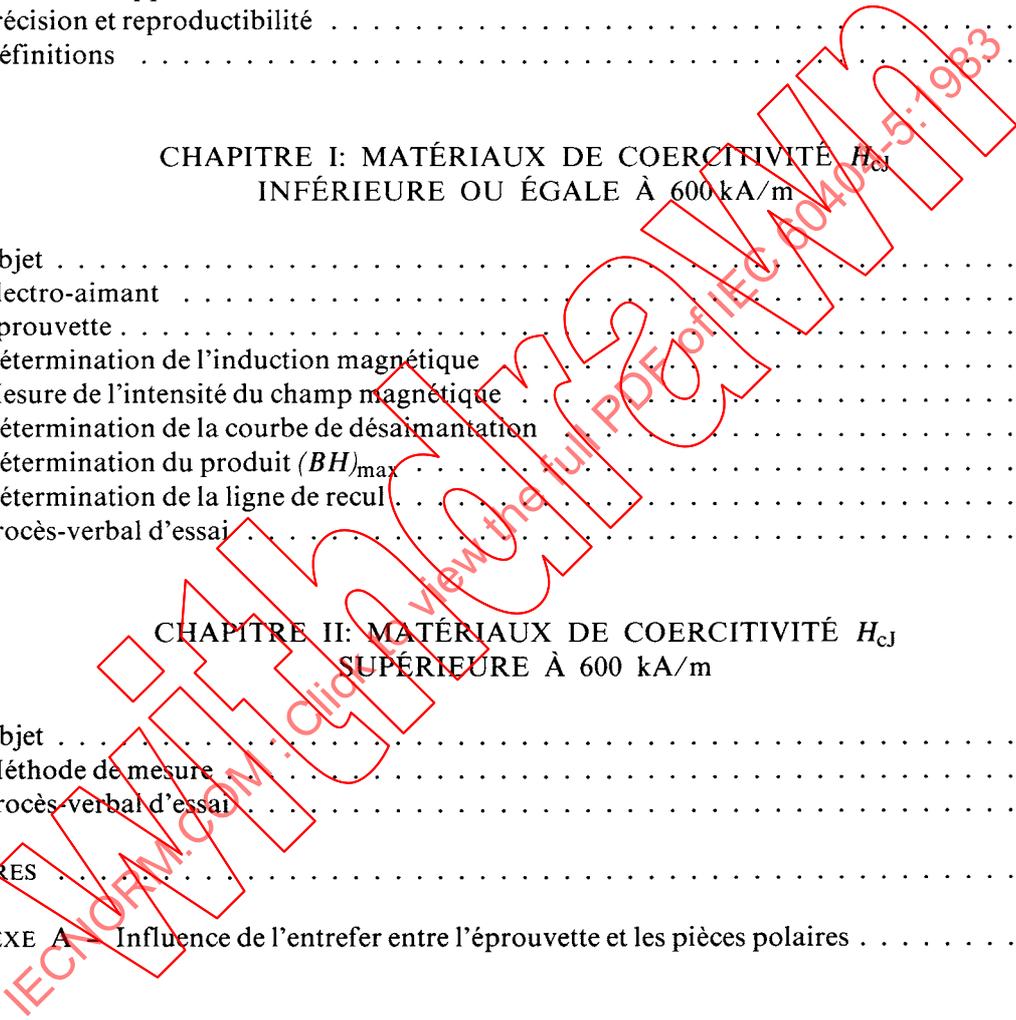
4. Objet	8
5. Electro-aimant	8
6. Eprouvette	10
7. Détermination de l'induction magnétique	10
8. Mesure de l'intensité du champ magnétique	12
9. Détermination de la courbe de désaimantation	12
10. Détermination du produit $(BH)_{max}$	16
11. Détermination de la ligne de recul	16
12. Procès-verbal d'essai	16

CHAPITRE II: MATÉRIAUX DE COERCITIVITÉ H_{cJ} SUPÉRIEURE À 600 kA/m

13. Objet	18
14. Méthode de mesure	18
15. Procès-verbal d'essai	20

FIGURES	22
-------------------	----

ANNEXE A - Influence de l'entrefer entre l'éprouvette et les pièces polaires	26
--	----



CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	
Clause	
1. Scope	7
2. Accuracy and reproducibility	7
3. Definitions	7
CHAPTER I: MATERIALS HAVING AN INTRINSIC COERCIVITY H_{cJ} LESS THAN OR EQUAL TO 600 kA/m	
4. Object	9
5. Electromagnet	9
6. Test specimen	11
7. Determination of the magnetic flux density	11
8. Measurement of the magnetic field strength	13
9. Determination of the demagnetization curve	13
10. Determination of the $(BH)_{\max}$ product	17
11. Determination of the recoil line	17
12. Test report	17
CHAPTER II: MATERIALS HAVING AN INTRINSIC COERCIVITY H_{cJ} GREATER THAN 600 kA/m	
13. Object	19
14. Method of measurement	19
15. Test report	21
FIGURES	22
APPENDIX A - Influence of the air-gap between the test specimen and the pole pieces	27

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

**Cinquième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques
des matériaux durs (aimants permanents)**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes 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.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Comité d'Etudes N° 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Le premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Budapest en 1977. A la suite de cette réunion, un projet, document 68(Bureau Central)12, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en janvier 1978.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de ce projet:

Australie	Egypte	Royaume-Uni
Autriche	Etats-Unis d'Amérique	Suède
Belgique	France	Suisse
Brésil	Italie	Turquie
Canada	Japon	Union des Républiques Socialistes soviétiques
Chine	Pologne	
Danemark	Roumanie	

Des modifications, document 68(Bureau Central)20, furent soumises à l'approbation des Comités nationaux selon la Procédure des Deux Mois en mars 1980.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de ces modifications:

Afrique du Sud (République d')	Espagne	Royaume-Uni
Allemagne	Etats-Unis d'Amérique	Suède
Autriche	France	Tchécoslovaquie
Belgique	Irlande	Turquie
Canada	Pologne	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
Danemark	Roumanie	
Egypte		

Autre publication de la CEI citée dans la présente norme:

Publication n° 50(901): Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), chapitre 901: Magnétisme.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS**Part 5: Methods of measurement of the magnetic properties
of magnetically hard (permanent magnet) materials**

FOREWORD

- 1) 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.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 68: Magnetic Alloys and Steels.

The first draft was discussed at the meeting held in Budapest in 1977. As a result of this meeting, a draft, Document 68(Central Office)12, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in January 1978.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of this draft:

Australia	Egypt	Switzerland
Austria	France	Turkey
Belgium	Italy	Union of Soviet
Brazil	Japan	Socialist Republics
Canada	Poland	United Kingdom
China	Romania	United States of America
Denmark	Sweden	

Amendments, Document 68(Central Office)20, were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in March 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of these amendments.

Austria	Germany	Sweden
Belgium	Ireland	Turkey
Canada	Poland	Union of Soviet
Czechoslovakia	Romania	Socialist Republics
Denmark	South Africa (Republic of)	United Kingdom
Egypt	Spain	United States of America
France		

Other IEC publication quoted in this standard:

Publication No. 50(901): International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), Chapter 901: Magnetism.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

Cinquième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des matériaux durs (aimants permanents)

INTRODUCTION

1. Domaine d'application

La présente norme est applicable uniquement aux matériaux magnétiquement durs, de propriétés supposées homogènes dans tout leur volume. Il a pour objet de spécifier les méthodes normales de mesure des propriétés magnétiques des matériaux magnétiquement durs dans un circuit magnétique fermé.

Les caractéristiques d'un système magnétique ne dépendent pas uniquement des propriétés du matériau magnétiquement dur, mais aussi des dimensions du système, de l'entrefer et des autres éléments du circuit magnétique.

En principe, la méthode de mesure s'emploie à réaliser au mieux un circuit fermé simulant le tore. Comme les propriétés magnétiques peuvent dépendre sensiblement de la valeur du champ magnétique appliqué, deux méthodes ont été retenues en fonction du domaine de coercitivité de l'aimant permanent:

- l'une pour les matériaux magnétiquement durs, de coercitivité inférieure ou égale à 600 kA/m (chapitre I);
- l'autre pour les matériaux magnétiquement durs, de coercitivité supérieure à 600 kA/m (cas des alliages de cobalt-terres rares) (chapitre II).

2. Précision et reproductibilité

Dans le cas des méthodes d'essai décrites dans cette norme, il n'est pas toujours possible de se référer aux principes fondamentaux. La précision finale de l'appareillage d'essai est une fonction complexe dépendant des instruments de mesure et autres caractéristiques des conditions de mesure et des composants de l'équipement; il n'est pas toujours possible d'indiquer la précision absolue qui peut être atteinte. Cependant, pour une méthode donnée, l'expérience indique la reproductibilité qui peut être prévue.

3. Définitions

Les définitions relatives aux différents termes employés dans la présente norme sont définies dans la Publication 50(901) de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), chapitre 901: Magnétisme.

Pour les matériaux durs cette norme traite de la coercitivité H_{CB} et de la coercitivité H_{cJ} qui est une caractéristique fondamentale et d'intérêt croissant, particulièrement dans les applications dynamiques.

Les mesures spécifiées dans cette norme sont l'induction magnétique B en fonction de l'intensité de champ magnétique H , et la polarisation magnétique J est reliée à ces grandeurs par la relation suivante:

$$B = \mu_0 H + J$$

En utilisant cette relation, les valeurs de H_{cJ} peuvent être obtenues à partir du cycle d'hystérésis BH .

MAGNETIC MATERIALS

Part 5: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically hard (permanent magnet) materials

INTRODUCTION

1. Scope

This standard is applicable only to magnetically hard materials, the properties of which are presumed homogeneous throughout their volume. Its object is to specify standard methods of measurement of the magnetic properties of magnetically hard materials in a closed magnetic circuit.

The performance of a magnetic system is not only dependent on the properties of the magnetically hard material but also on the dimensions of the system, the air-gap and other elements of the magnetic circuit.

The measuring method, in principle, makes use of a closed loop simulating a ring. As the magnetic characteristics may substantially depend on the value of the applied magnetic field, two methods have been included for two coercivity ranges of magnetically hard materials:

- one for magnetically hard materials having an intrinsic coercivity less than or equal to 600 kA/m (Chapter I);
- the other for magnetically hard materials having an intrinsic coercivity greater than 600 kA/m (e.g. rare earth cobalt alloys) (Chapter II).

2. Accuracy and reproducibility

In the case of the test methods described in this standard it is not always possible to refer to fundamental principles. The final accuracy of the test apparatus is a complex function dependent on the measuring instruments and other features of the measuring environment and equipment components, therefore it is not always possible to state the absolute accuracy which can be attained. However, experience in the use of a given method indicates the reproducibility which can be expected.

3. Definitions

The definitions relating to the various terms used in this standard are defined in IEC Publication 50(901): International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), Chapter 901: Magnetism.

For magnetically hard materials this standard deals with both the coercivity H_{CB} and the intrinsic coercivity H_{CJ} which is a fundamental quantity and of increasing importance particularly in dynamic applications.

The measurements specified in this standard are of the magnetic flux density B against the magnetic field strength H and the magnetic polarization J is related to these quantities by the following equation:

$$B = \mu_0 H + J$$

Using this relationship H_{CJ} values can be obtained from the BH hysteresis loop.

CHAPITRE I: MATÉRIAUX DE COERCITIVITÉ H_{cJ} INFÉRIEURE OU ÉGALE À 600 kA/m

4. Objet

Ce chapitre a pour objet la définition de la méthode de mesure de l'induction magnétique et de l'intensité de champ magnétique ainsi que la détermination de la courbe de désaimantation et de la ligne de recul des matériaux magnétiquement durs d'une coercitivité H_{cJ} inférieure ou égale à 600 kA/m.

5. Electro-aimant

L'essai est effectué à l'aide d'un circuit ferromagnétique fermé, constitué par un électro-aimant en matériau magnétique doux et par l'éprouvette. La culasse est en principe de forme symétrique, un des pôles au moins étant mobile afin de minimiser tout entrefer entre l'éprouvette et les pièces polaires.

Pour certaines mesures, la culasse et les pôles peuvent être feuilletés pour diminuer les courants de Foucault. La coercitivité du matériau constituant les pôles ne doit normalement pas dépasser 100 A/m.

Pour obtenir une aimantation suffisamment homogène dans l'espace occupé par l'éprouvette, les conditions suivantes doivent être satisfaites simultanément:

Conditions géométriques (figure 1, page 22)

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

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

où:

d_1 = diamètre d'une pièce polaire circulaire ou largeur d'une pièce polaire rectangulaire, en mètres

l = distance entre les pièces polaires, en mètres

d_2 = diamètre maximal du volume cylindrique à champ homogène, en mètres

Conditions électromagnétiques

Il faut maintenir l'induction dans les pièces polaires très faible par rapport à l'induction de saturation de façon que les faces polaires soient aussi voisines que possible des surfaces équipotentielles. En pratique, l'induction est inférieure à 1 T dans le fer et à 1,2 T dans un alliage ferreux contenant de 35% à 50% de cobalt.

L'erreur due à un champ magnétique non homogène dans l'éprouvette est particulièrement significative dans le premier quadrant pour des champs élevés.

Dans les conditions ci-dessus, le champ dans le volume spécifié présente des différences d'homogénéité inférieures à:

2% dans le sens radial

2% dans le sens axial

La culasse est pourvue de bobines d'aimantation disposées symétriquement et le plus près possible de l'éprouvette. L'axe de l'éprouvette doit être placé dans l'alignement des axes des bobines d'aimantation. L'électro-aimant doit pouvoir fournir la valeur minimale de l'intensité de champ magnétique nécessaire pour l'aimantation de l'éprouvette. Cette valeur de l'intensité de champ magnétique est différente selon la nature du matériau magnétique dur et

CHAPTER I: MATERIALS HAVING AN INTRINSIC COERCIVITY H_{cJ} LESS THAN OR EQUAL TO 600 kA/m

4. Object

The object of this chapter is to define the method of measurement of the magnetic flux density and the magnetic field strength and also the determination of the demagnetization curve and recoil line of magnetically hard materials having an intrinsic coercivity H_{cJ} of less than or equal to 600 kA/m.

5. Electromagnet

The test is carried out in a closed ferromagnetic circuit consisting of an electromagnet made of soft magnetic material and the test specimen. The construction of the yokes should be symmetrical; at least one of the poles should be movable to minimize the air-gap between the specimen and the pole pieces.

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

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

Geometrical conditions (Figure 1, page 22)

$$d_1 \geq d_2 + 1.2 l \quad (1)$$

$$d_1 \geq 2.0 l \quad (2)$$

where:

d_1 = diameter of a circular pole piece or the shortest dimension of a rectangular pole piece, in metres

l = distance between the pole pieces, in metres

d_2 = maximum diameter of the cylindrical volume with a homogeneous field, in metres

Electromagnetic conditions

The flux density in the pole pieces shall be maintained very low compared with the saturation flux density so that the pole faces shall be brought as near as possible to be equipotential. In practice, the 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 error due to an inhomogeneous magnetic field in the test specimen is particularly significant in the first quadrant at high magnetic field strengths.

Under the above conditions, the field in the specified volume gives variations in homogeneity less than:

2% radially

2% axially

The yoke is excited by magnetizing coils which are arranged symmetrically as near as possible to the test specimen. The axis of the test specimen shall be congruent with the axis of the magnetizing coils. For magnetizing the test specimen in the electromagnet, the minimum necessary value of magnetic field strength shall be provided. This value of magnetic field strength varies according to the nature of the magnetically hard materials and depends parti-

dépend, en particulier, de son degré d'anisotropie. Il existe une relation approximative entre l'intensité maximale du champ magnétique (H_{\max}) et le champ coercitif (H_{cJ}). Cette relation approximative est la suivante:

$$H_{\max} = k H_{cJ} \quad (3)$$

Le coefficient k , variable selon la nature du matériau magnétiquement dur, est généralement compris entre 3 et 5.

Pour les champs élevés, une force mécanique peut comprimer l'éprouvette. Il faut donc bloquer les pôles.

6. Eprouvette

L'éprouvette doit être de forme simple (par exemple cylindrique ou parallélépipédique) et ses dimensions doivent être choisies en accord avec les relations 1 et 2. La longueur l de l'éprouvette doit être supérieure à 5 mm.

Les faces des extrémités de l'éprouvette doivent être rectifiées parallèlement entre elles et aussi perpendiculairement que possible à l'axe de l'éprouvette, afin de réduire l'entrefer (voir annexe A).

La section de l'éprouvette doit avoir une aire aussi constante que possible sur toute la longueur; toute variation doit être inférieure à 1% de sa section minimale.

Dans le cas de matériaux anisotropes, marquer la direction d'aimantation sur les éprouvettes.

7. Détermination de l'induction magnétique

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

L'enroulement de la bobine de mesure doit être placé aussi près que possible de l'éprouvette, symétriquement par rapport aux faces polaires. Les fils de connexion doivent être torsadés étroitement afin d'éviter les erreurs dues 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 ΔB dans l'éprouvette entre deux instants t_1 et t_2 est donnée par la relation:

$$\Delta B = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (4)$$

où:

B_2 = induction magnétique à l'instant t_2 , en teslas

B_1 = induction magnétique à l'instant t_1 , en teslas

A = aire de la section de l'éprouvette, en mètres carrés

N = nombre de spires de la bobine de mesure

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ = tension induite intégrée, en webers

cularly on its degree of anisotropy. An approximate relationship exists between the value of the maximum field strength (H_{\max}) and the intrinsic coercivity (H_{cJ}). This approximate relationship is as follows:

$$H_{\max} = k H_{cJ} \quad (3)$$

The coefficient k varies according to the nature of the magnetically hard material and is generally between 3 and 5.

At high field strengths, a mechanical force may compress the test specimen. It is therefore necessary to lock the poles.

6. Test specimen

The test specimen shall have a simple shape (for example cylinder or parallelepiped) and its dimensions shall be chosen in accordance with equations 1 and 2. The length l of the test specimen shall be greater than 5 mm.

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

In the case of anisotropic material the direction of magnetization should be marked on the test specimens.

7. Determination of the magnetic flux density

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

The search coil shall be wound as closely as possible to the 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 flux density ΔB in the test specimen between the two instants t_1 and t_2 is given by:

$$\Delta B = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (4)$$

where:

B_2 = flux density at the instant t_2 , in teslas

B_1 = flux density at the instant t_1 , in teslas

A = cross-sectional area of the test specimen, in square metres

N = number of turns on the search coil

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ = integrated induced voltage, in webers

Cette variation d'induction magnétique doit être corrigée pour tenir compte du flux dans l'air inclus dans la bobine de mesure. La variation corrigée de l'induction magnétique dans l'éprouvette est donnée par la relation:

$$\Delta B_{\text{corr}} = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \quad (5)$$

où:

μ_0 = constante magnétique = $4 \pi 10^{-7}$, en henrys par mètre

ΔH = variation de l'intensité de champ magnétique, mesurée en ampères par mètre

A_t = aire moyenne de la section de la bobine de mesure, en mètres carrés

8. 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 intensité du 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 aux extrémités (voir figure 1, page 22).

Pour la détermination de l'intensité du champ magnétique, utiliser une bobine plate, un potentiomètre magnétique ou une sonde de Hall avec l'appareillage approprié. Les dimensions du capteur et sa position doivent être telles qu'il ne sorte pas de l'aire limitée par le diamètre d_2 (voir équations 1 et 2).

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 transducteur de champ magnétique doit être étalonné. L'erreur totale de mesure ne doit pas dépasser $\pm 2\%$.

9. Détermination de la courbe de désaimantation

9.1 Première méthode - Principe de mesure à l'aide d'un galvanomètre balistique

Dans les mesures ci-dessous, on utilise un galvanomètre balistique pour mesurer

$$\int_{t_1}^{t_2} U dt$$

On peut aussi utiliser un fluxmètre à faible dérive.

L'éprouvette est mise en place dans l'électro-aimant, puis est saturée avec le champ magnétique élevé H_{max} : pour cette intensité du champ magnétique, l'induction magnétique dans l'éprouvette est égale à B_{max} (figure 2a, page 23). Ensuite, le courant est annulé et la variation de l'induction $\Delta B_1 = B_{\text{max}} - B'_r$ peut être mesurée.

L'intensité du champ magnétique en l'absence du courant d'aimantation n'est pas nulle ($H'_r \neq 0$), cela en raison de l'aimantation rémanente des pôles et de la culasse. La conséquence est que $B'_r \neq B_r$. La valeur H'_r , comme toute autre valeur d'intensité du champ magnétique, peut être mesurée à l'aide du capteur inséré dans l'espace entre les pièces polaires, parallèlement à ces dernières (voir article 8).

Ensuite, par accroissement du courant d'aimantation inverse jusqu'à obtenir la valeur $-H_{\text{max}}$, la variation de l'induction $\Delta B_2 = B'_r + B_{\text{max}}$ peut être mesurée. La valeur de l'induction magnétique B'_r est calculée selon l'équation:

$$B'_r = \frac{\Delta B_2 - \Delta B_1}{2} \quad (6)$$

This change in magnetic flux density shall be corrected to take into account the air flux included in the search coil. The corrected change in magnetic flux density in the test specimen is given by:

$$\Delta B_{\text{corr}} = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \quad (5)$$

where:

μ_0 = magnetic constant = $4\pi \cdot 10^{-7}$, in henrys per metre

ΔH = change in the measured magnetic field strength, in amperes per metre

A_t = average cross-sectional area of the search coil, in square metres

8. Measurement of the magnetic field strength

The field strength at the surface of the specimen is equal to the field strength inside the specimen only in that part of the space where the field strength vector is parallel to the side surface of the specimen. Therefore, a magnetic field strength sensor is placed in the homogeneous field zone as near as possible to the specimen and symmetrical with respect to the end faces (see Figure 1, page 22).

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 equations 1 and 2).

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

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

9. Determination of the demagnetization curve

9.1 First method - Principle of measurement with a ballistic galvanometer

For the measurements described below, a ballistic galvanometer is used to measure

$$\int_{t_1}^{t_2} U dt$$

A low-drift fluxmeter may also be used.

The test specimen is assembled in the electromagnet and saturated at a high magnetic field strength H_{max} . At this field strength, the induction in the specimen is equal to B_{max} (Figure 2a, page 23). Then the current is switched off and the change of magnetic flux density $\Delta B_1 = B_{\text{max}} - B'_r$ can be measured.

The magnetic field strength in the absence of the magnetizing current is not zero ($H'_r \neq 0$) due to the remanent magnetization of the poles and yoke. Consequently, $B'_r \neq B_r$. The value H'_r , like any other value of magnetic field strength, may be measured with the magnetic field strength sensor inserted into the space between the pole pieces, parallel to the latter (see Clause 8).

Then, by increasing the reversed magnetizing current to obtain the value $-H_{\text{max}}$, the change of flux density $\Delta B_2 = B'_r + B_{\text{max}}$ can be measured. The value of the magnetic flux density B'_r is calculated from:

$$B'_r = \frac{\Delta B_2 - \Delta B_1}{2} \quad (6)$$

L'éprouvette est de nouveau aimantée jusqu'au point B_{\max} , H_{\max} . Après avoir annulé le courant d'aimantation, l'induction revient au point B_r , H_r . Après avoir appliqué un champ magnétique inverse, la valeur de l'induction magnétique au point B , H peut être calculée à partir de la variation d'induction ΔB selon la formule:

$$B = B_r - \Delta B \quad (7)$$

La détermination des couples de valeurs associées B et H sur la courbe de désaimantation débute au point B_r , H_r et exige une aimantation de l'éprouvette jusqu'au point B_{\max} , H_{\max} . La valeur effective de l'induction rémanente B_r peut être obtenue soit en changeant le courant d'aimantation, de sorte que l'intensité du champ magnétique passe de H_r à zéro et, en conséquence, que l'induction change de la valeur $\Delta B'$, soit par une interpolation linéaire des points les plus proches.

Pour éviter la répétition de l'aimantation jusqu'au point B_{\max} , H_{\max} plusieurs points B , H peuvent être déterminés par accroissements successifs ΔB , ΔH entre ces points; mais cette méthode augmente l'erreur de mesure.

En complément à la méthode décrite ci-dessus, on peut aussi appliquer une autre méthode pour laquelle l'ordre suivant des mesures est recommandé:

- la valeur B_{\max} correspondant au courant d'aimantation maximal est déterminée en inversant le courant d'aimantation maximal sans en changer la valeur absolue:

$$B_{\max} = \frac{\Delta B_3}{2} \quad (\text{figure 2b, page 23}) \quad (8)$$

- pour déterminer la valeur de l'induction magnétique B en tout point de la courbe de désaimantation, la valeur du courant de désaimantation doit être telle que l'on obtienne l'intensité du champ magnétique H correspondant à ce point de la courbe. Après quoi, la variation de l'induction magnétique ΔB est déterminée à partir de la variation du courant d'aimantation depuis la valeur correspondant à la valeur requise jusqu'à sa valeur maximale.

L'induction magnétique est calculée par la relation:

$$B = B_{\max} - \Delta B$$

Avant de mesurer en d'autres points, la réaimantation cyclique de l'éprouvette est répétée.

9.2 Seconde méthode - Principe de mesure à l'aide d'un intégrateur électronique

Relier l'intégrateur à la bobine de mesure et régler le zéro. Ensuite l'éprouvette désaimantée est placée dans la bobine de mesure et l'ensemble est monté dans l'électro-aimant. Après avoir effectué une aimantation avec l'intensité de champ requise, le courant d'aimantation est ramené à zéro. Cependant, les valeurs de l'induction magnétique B_r et de l'intensité du champ magnétique H_r peuvent rester dans le premier quadrant en raison de l'aimantation rémanente des pôles et de la culasse.

Le courant est ensuite inversé et augmenté jusqu'à ce que le champ magnétique dépasse la coercitivité H_{CB} ou H_{CJ} , et on note, au fur et à mesure, pour chaque valeur de champ inverse, la valeur de l'induction magnétique. La vitesse de variation du champ doit être suffisamment lente pour éviter qu'il apparaisse un déphasage entre H et B . Avec certains matériaux, il y a un retard considérable entre les variations de l'intensité du champ magnétique et de l'induction magnétique. Dans ce cas, la constante de temps de l'intégrateur de flux doit être assez longue et la dérive du zéro assez faible pour assurer une intégration précise.

The test specimen is again magnetized to the point B_{\max} , H_{\max} and after switching off the magnetizing current the magnetic flux density returns to the point B_r , H_r . After a reversed magnetic field has been applied, the magnetic flux density at the point B , H can be calculated from the flux density change ΔB according to the equation:

$$B = B_r - \Delta B \quad (7)$$

The determination of any pair of associated values B and H on the demagnetization curve shall start from the point B_r , H_r and necessitates magnetizing the specimen to the point B_{\max} , H_{\max} . The actual value of the remanent flux density B_r may be obtained by changing the magnetizing current such that the magnetic field strength changes from H_r to zero and, consequently, the magnetic flux density changes by the value ΔB_r , or it may be obtained by the linear interpolation of the nearest points.

To avoid the repetition of magnetizing to B_{\max} , H_{\max} several points B , H can be determined by successive changes ΔB , ΔH between the points, but this method increases the measuring error.

As a supplement to the above-mentioned procedure, another procedure can also be applied, for which the following measurement order is recommended:

- the value of B_{\max} , corresponding to the maximum magnetizing current, is determined by reversing the maximum magnetizing current without changing its value:

$$B_{\max} = \frac{\Delta B_3}{2} \quad (\text{Figure 2b, page 23}) \quad (8)$$

- to determine the value of the magnetic flux density B at one point on the demagnetization curve, the value of the demagnetizing current shall be such as to produce the field strength H corresponding to this point on the curve. After that, the change of the magnetic flux density ΔB is determined by changing the magnetizing current from the value corresponding to the required value up to its maximum value.

The magnetic flux density is calculated from the equation:

$$B = B_{\max} - \Delta B$$

Before measuring other points, the cyclic remagnetization of the specimen is repeated.

9.2 Second method – Principle of measurement by means of an electronic flux integrator

The integrator is connected to the search coil and is adjusted to zero. Then the demagnetized test specimen is put into the search coil and the assembly mounted in the electromagnet. After magnetizing to the required magnetic field strength the magnetizing current is reduced to zero. However, the values of the magnetic flux density B_r and the magnetic field strength H_r may still be in the first quadrant because of the remanent magnetization of the poles and the yoke.

The current is then reversed and increased until the magnetic field has passed the coercivity H_{CB} or H_{cJ} , and the value of magnetic flux density is noted progressively for each value of the reverse field. The speed of the variation of the magnetic field strength shall be sufficiently slow to avoid the production of a phase difference between H and B . With some materials there is a considerable delay between the change in the magnetic flux density and the 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.

10. Détermination du produit $(BH)_{\max}$

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

11. Détermination de la ligne de recul

Pour être au point de départ $B_{\text{rec}}, H_{\text{rec}}$ de la ligne de recul (figure 3, page 24), l'éprouvette doit être au préalable aimantée par un champ H_{\max} . Puis le courant d'aimantation est diminué jusqu'à zéro, inversé et augmenté jusqu'à la valeur correspondant à H_{rec} . Ensuite, H_{rec} est diminué de la valeur ΔH et la variation d'induction ΔB peut être mesurée. La perméabilité de recul μ_{rec} est calculée selon la formule:

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

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

12. Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai comporte, selon les cas:

- la valeur H_{\max} appliquée pour l'aimantation;
- le type et la marque d'identification du matériau;
- la courbe de désaimantation;
- la rémanence B_r ;
- les coercitivités H_{cB} et H_{cJ} ;
- la valeur $(BH)_{\max}$;
- le point de fonctionnement pour $(BH)_{\max}$;
- la perméabilité de recul μ_{rec} et les valeurs $B_{\text{rec}}, H_{\text{rec}}$ et ΔH ;
- la température ambiante;
- dans le cas des matériaux anisotropes: la direction d'aimantation par rapport à l'axe principal du matériau;
- la précision des mesures.

10. Determination of the $(BH)_{\max}$ product

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

11. Determination of the recoil line

For the starting point $B_{\text{rec}}, H_{\text{rec}}$ of the recoil line (Figure 3, page 24), the test specimen shall be previously magnetized by a magnetic field strength H_{max} . Then the magnetizing current is reduced to zero, reversed and increased to the value corresponding to H_{rec} . Then, H_{rec} is reduced by value ΔH and the change in flux density ΔB can be measured. The recoil permeability μ_{rec} is calculated from the equation:

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

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

12. Test report

The test report shall contain, as necessary:

- the value H_{max} applied for magnetization;
- type and identification mark of the material;
- demagnetization curve;
- remanence B_r ;
- coercivity H_{cB} and H_{cJ} ;
- $(BH)_{\max}$ value;
- working point for $(BH)_{\max}$;
- recoil permeability μ_{rec} and the values $B_{\text{rec}}, H_{\text{rec}}$ and ΔH ;
- ambient temperature;
- in the case of anisotropic material: the direction of magnetization with respect to the preferred axis of the material;
- accuracy of the measurements.

CHAPITRE II: MATÉRIAUX DE COERCITIVITÉ H_{cJ} SUPÉRIEURE À 600 kA/m

13. Objet

Ce chapitre décrit des dispositions particulières à prendre pour la détermination des caractéristiques magnétiques des matériaux magnétiquement durs possédant une coercitivité supérieure à 600 kA/m, ce qui est le cas des alliages de cobalt-terres rares.

Pour caractériser ces matériaux magnétiquement durs, trois valeurs d'intensité de champ d'aimantation doivent être prises en considération.

Un aimant vierge (désaimanté thermiquement sans aucune exposition antérieure à un champ) peut être aimanté presque à saturation pour une intensité de champ H_1 (figure 4, page 25) et cette intensité de champ est habituellement suffisante pour l'utilisation d'un aimant. Cette valeur, pour des éprouvettes parfaitement orientées, est de 1 600 kA/m dans un circuit magnétique fermé. Pour obtenir complètement le second quadrant et pour réaimanter avec la polarité de départ, il faut appliquer un champ H_2 ($H_2 = H_{cJ}$). Pour obtenir un cycle d'hystérésis complet, il faut appliquer un champ H_3 qui peut être de l'ordre de 8 000 kA/m. Cela est dû au besoin d'inverser l'aimantation de tous les domaines magnétiques, même les plus difficiles.

Le niveau H_3 et les problèmes de mesures à ce niveau sont considérés comme exclus du domaine d'application de cette norme.

14. Méthode de mesure

La méthode de mesure décrite dans le chapitre I reste en général valable à l'exclusion des points suivants:

14.1 Aimantation de l'éprouvette

En raison des intensités de champ élevées nécessaires à l'aimantation des éprouvettes, on peut adopter deux variantes:

- L'aimantation peut être effectuée avec l'éprouvette placée dans un électro-aimant à pôles tronconiques. Les pôles peuvent être en alliage à teneur en cobalt de 35% à 50% et doivent pouvoir être bloqués afin d'éviter la destruction de l'éprouvette par écrasement. L'éprouvette sera considérée comme saturée lorsqu'un accroissement de 50% de l'intensité du champ appliqué donne une variation de la valeur d'aimantation inférieure à 1%.
- L'aimantation peut être effectuée à l'extérieur du circuit fermé de l'électro-aimant. Le sens d'aimantation doit être repéré sur l'éprouvette. L'aimantation de l'éprouvette est réalisée soit à l'aide d'une bobine supraconductrice, soit par décharge unidirectionnelle de condensateurs dans une bobine, avec une durée d'impulsion suffisamment longue pour obtenir une aimantation uniforme. Prendre de préférence des éprouvettes de longueur supérieure à deux fois le diamètre, car la désaimantation propre irréversible d'une éprouvette courte peut influencer sur la précision des résultats.

CHAPTER II: MATERIALS HAVING AN INTRINSIC COERCIVITY H_{cJ} GREATER THAN 600 kA/m

13. Object

This chapter describes the particular arrangements for the determination of the magnetic characteristics of magnetically hard materials having a coercivity greater than 600 kA/m, as is the case for rare earth cobalt alloys.

To characterize these magnetically hard materials, three levels of magnetizing field strength shall be considered.

A virgin magnet (thermally demagnetized with no prior exposure to fields) can be magnetized to near saturation in field H_1 (Figure 4, page 25) and this field is usually enough for magnetization of a magnet in use. This value for well-oriented specimens is 1 600 kA/m in a closed magnetic circuit. For obtaining complete second quadrant data and for remagnetization with initial polarity a value H_2 is required ($H_2 \geq H_{cJ}$). To fully characterize and obtain true symmetrically magnetized conditions requires level H_3 which can be of the order of 8 000 kA/m. This is due to the need to reverse even the most difficult magnetization sites.

The level H_3 and the problems of measurement at this level are considered to be outside the scope of this standard.

14. Method of measurement

The method of measurement described in Chapter I is in general valid with the exception of the following points:

14.1 Magnetization of the test specimen

Because of the high fields required to magnetize the test specimen, two options are appropriate to consider:

- Magnetization may be carried out in an electromagnet with tapered poles. The poles may be of an alloy containing 35% to 50% cobalt and shall be capable of being locked to avoid crushing the test specimen. The sample will be considered to be saturated if an increase of the field strength by 50% has an influence on the value of magnetization of less than 1%.
- Magnetization may be carried out outside the closed circuit of the electromagnet. The direction of magnetization shall be marked on the specimen. The magnetization of the test specimen is carried out by means of a superconducting coil or by unidirectional discharge of capacitors through a coil, with an impulse time sufficiently long to obtain uniform magnetization. Specimens with length to diameter ratios of greater than two are preferred since irreversible self demagnetization of a short specimen can influence the accuracy of the results.

14.2 *Méthode à utiliser*

La méthode décrite au paragraphe 9.2 doit être utilisée. Avec l'aimantation de l'éprouvette dans l'électro-aimant, il est possible de déterminer dynamiquement les premier et second quadrants à l'aide d'un fluxmètre électronique intégrateur.

15. **Procès-verbal d'essai**

Le procès-verbal d'essai doit s'inspirer des indications de l'article 12 et peut comporter les caractéristiques spécifiques aux alliages de cobalt-terres rares.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-5:1983
WithoutAM

14.2 *Method to be utilized*

The method described in Sub-clause 9.2 shall be used. With magnetization of the test specimen in the electromagnet it is possible to draw the first and second quadrants dynamically using the electronic flux integrator.

15. **Test report**

The test report shall be based on the test report given in Clause 12 and may contain the specific parameters used to characterize rare earth cobalt alloys.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60404-5:1983
Without a watermark

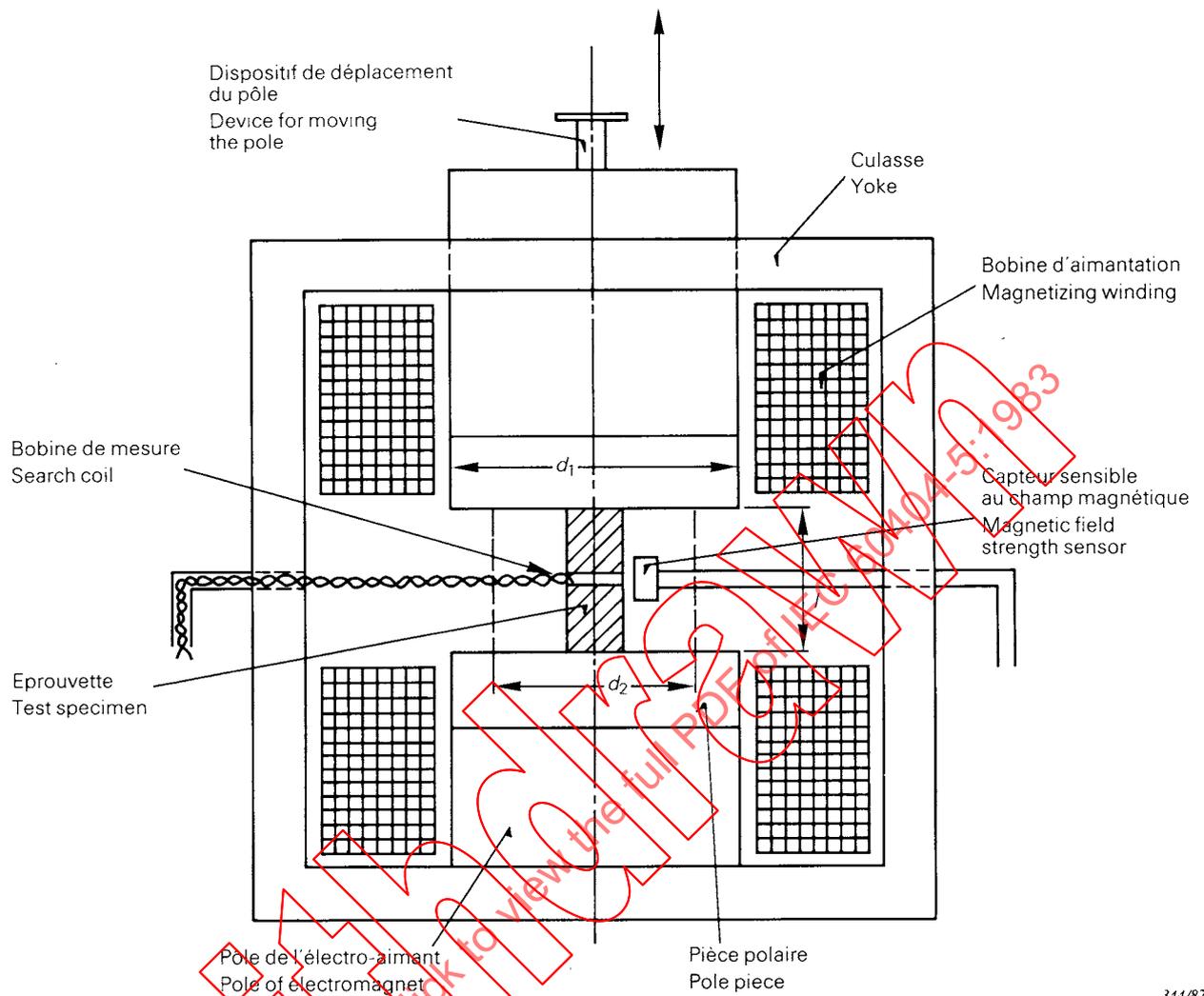


FIG. 1. - Schéma de l'électro-aimant.
Diagram of electromagnet.

