

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
68-3-1**

Première édition
First edition
1974

**Essais fondamentaux climatiques et
de robustesse mécanique**

Troisième partie:

Informations de base

Section un: Essais de froid et
de chaleur sèche

Basic environmental testing procedures

Part 3:

Background information

Section one: Cold and dry heat tests



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 68-3-1: 1974

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

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

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 dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (IEV).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

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 in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
68-3-1**

Première édition
First edition
1974

**Essais fondamentaux climatiques et
de robustesse mécanique**

Troisième partie:

Informations de base

Section un: Essais de froid et
de chaleur sèche

Basic environmental testing procedures

Part 3:

Background information

Section one: Cold and dry heat tests

© CEI 1974 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

U

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Introduction	6
1.1 Conditions ambiantes de référence	6
1.2 Matériels ne dissipant pas d'énergie	6
1.3 Matériels dissipant de l'énergie	6
1.4 Température ambiante	8
1.5 Températures de surface	8
2. Justification de l'existence de différentes méthodes d'essais	8
2.1 Mécanismes du transfert de chaleur	8
3. Chambres d'essais	14
3.1 Généralités	14
3.2 Méthodes permettant de réaliser les conditions requises dans la chambre d'essai	16
4. Mesures	18
4.1 Température	18
4.2 Vitesse de l'air	18
4.3 Pouvoir émissif	18
ANNEXE A — Effets des dimensions de la chambre sur la température de surface d'un spécimen en l'absence de circulation forcée de l'air	20
FIGURE 1 Dissipation de chaleur par unité de surface du spécimen en essai pour laquelle l'écart entre la température de surface du spécimen dans une grande chambre et dans une chambre plus petite atteint 5 deg C	21
ANNEXE B — Effet de la circulation de l'air sur les conditions dans la chambre et sur les températures de surface des spécimens en essai	22
FIGURE 2 Données expérimentales sur l'effet de la circulation d'air sur la température de surface d'une résistance bobinée — Circulation d'air selon une direction radiale	24
FIGURE 3 Données expérimentales sur l'effet de la circulation d'air sur la température de surface d'une résistance bobinée — Circulation d'air selon une direction axiale	25
FIGURE 4 Distribution de la température sur un cylindre avec une dissipation homogène pour des vitesses de circulation d'air de 0,5, 1 et 2 m.s ⁻¹	26
ANNEXE C — Effet du pouvoir émissif du spécimen sur l'élévation de température	27
FIGURE 5 Comparaison de l'élévation de température en fonction de la dissipation pour des spécimens thermiquement blancs ou noirs soumis à une température ambiante de 70 °C dans une chambre dont les parois sont thermiquement noires (données expérimentales)	27
ANNEXE D — Effet des dimensions du fil de sortie et du matériau sur la température de surface d'un composant	28
FIGURE 6	28
ANNEXE E — Calculs et abaques sur le transfert de chaleur	30
FIGURE 7 Relation entre la température de surface T_s du spécimen et la chaleur dissipée P par unité de temps à la température ambiante T_a	34
FIGURE 8 Abaque pour l'évaluation des températures de surface du spécimen T_s à différentes températures ambiantes T_a . Dimension moyenne du spécimen $a = 0,2$ m, pouvoir émissif du spécimen $\epsilon_2 = 0,7$	35
FIGURE 9 Abaque pour l'évaluation des températures de surface du spécimen T_s à différentes températures ambiantes T_a . Dimension moyenne du spécimen $a = 0,05$ m, pouvoir émissif du spécimen $\epsilon_2 = 0,7$	36
FIGURE 10 Relation entre l'écart de température et le pouvoir émissif ϵ_2 du spécimen	37
ANNEXE F — Conductivités thermiques des matériaux usuels	38
ANNEXE G — Mesure de la température	40
ANNEXE H — Mesure de la vitesse de l'air	44
ANNEXE J — Mesure du pouvoir émissif	46
FIGURE 11 Loi du déplacement de Wien	56
FIGURE 12 Relation entre $\frac{M_{0... \lambda}}{M_s}$ et $\lambda \cdot T$	57
ANNEXE K — Diagramme complet des essais de froid et de chaleur sèche	58
FIGURE 13	58

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Introduction	7
1.1 Reference ambient conditions	7
1.2 Devices without heat-dissipation	7
1.3 Devices with heat-dissipation	7
1.4 Ambient temperature	9
1.5 Surface temperatures	9
2. Reasons for the differing test procedures	9
2.1 Mechanisms of heat transfer	9
3. Test chambers	15
3.1 General	15
3.2 Methods of achieving the required conditions in the test chamber	17
4. Measurements	19
4.1 Temperature	19
4.2 Air velocity	19
4.3 Emissivity coefficient	19
APPENDIX A — Effects of size of chamber on surface temperature of a specimen when no forced air circulation is used	20
FIGURE 1 Heat dissipation per unit surface area of the test specimen at which the deviation between the surface temperature of the specimen in a very large chamber and in a smaller chamber reaches 5 deg C	21
APPENDIX B — Effect of airflow on chamber conditions and on surface temperatures of test specimens	23
FIGURE 2 Experimental data on the effect of airflow on surface temperature of a wirewound resistor — Radial airflow	24
FIGURE 3 Experimental data on the effect of airflow on surface temperature of a wirewound resistor — Axial airflow	25
FIGURE 4 Temperature distribution on a cylinder with homogeneous heat-generation in airflow of velocities 0.5, 1 and 2 m.s ⁻¹	26
APPENDIX C — Effect of specimen emissivity coefficient on temperature rise	27
FIGURE 5 Comparison of the temperature rise as a function of heat-dissipation for thermal white and thermal black specimens subjected to an ambient temperature of 70 °C in a chamber with thermal black walls. (Experimental values.)	27
APPENDIX D — Effect of wire termination dimensions and material on surface temperature of a component	28
FIGURE 6	28
APPENDIX E — Heat transfer calculations and nomograms	31
FIGURE 7 Relationship between the surface temperature T_s of the specimen and the heat dissipated P per unit time at the ambient temperature T_a	34
FIGURE 8 Nomogram for evaluation of surface temperatures of the specimen T_s at different ambient temperatures T_a . Average specimen dimension $a = 0.2$ m, emissivity coefficient of the specimen $\epsilon_2 = 0.7$	35
FIGURE 9 Nomogram for evaluation of surface temperatures of the specimen T_s at different ambient temperatures T_a . Average specimen dimensions $a = 0.05$ m, emissivity coefficient of the specimen $\epsilon_2 = 0.7$	36
FIGURE 10 Relation between overtemperature and emissivity coefficient ϵ_2 of the specimen	37
APPENDIX F — Thermal conductivities of common materials	39
APPENDIX G — Measurement of temperature	41
APPENDIX H — Measurement of air velocity	45
APPENDIX J — Measurement of emissivity coefficient	47
FIGURE 11 Wien's displacement law	56
FIGURE 12 Relation between $\frac{M_{0...1}}{M_s}$ and $\lambda \cdot T$	57
APPENDIX K — General block diagram, cold and dry heat tests	59
FIGURE 13	59

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**ESSAIS FONDAMENTAUX CLIMATIQUES
ET DE ROBUSTESSE MÉCANIQUE**

Troisième partie : Informations de base

Section un — Essais de froid et de chaleur sèche

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 recommandation a été établie par le Sous-Comité 50B: Essais climatiques, du Comité d'Etudes N° 50 de la CEI: Essais climatiques et mécaniques.

Elle comporte les informations de base relatives à l'essai A: Froid, de la Publication 68-2-1 de la CEI, et à l'essai B: Chaleur sèche, de la Publication 68-2-2 de la CEI.

Un premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Washington en 1970. A la suite de cette réunion, un nouveau projet, document 50B(Bureau Central)161, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en avril 1971.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')	Italie
Allemagne	Japon
Australie	Norvège
Autriche	Pays-Bas
Belgique	Portugal
Danemark	Roumanie
Etats-Unis d'Amérique	Royaume-Uni
Finlande	Suède
France	Suisse
Hongrie	Tchécoslovaquie
Iran	Turquie
Israël	Union des Républiques Socialistes Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

BASIC ENVIRONMENTAL TESTING PROCEDURES

Part 3: Background information

Section One — Cold and dry heat tests

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 recommendations and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This recommendation has been prepared by Sub-Committee 50B, Climatic Tests, of IEC Technical Committee No. 50, Environmental Testing.

It gives background information for Test A: Cold, of IEC Publication 68-2-1, and Test B: Dry Heat, of IEC Publication 68-2-2.

A first draft was discussed at the meeting held in Washington in 1970. As a result of this meeting, a new draft, document 50B(Central Office)161, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in April 1971.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Japan
Austria	Netherlands
Belgium	Norway
Czechoslovakia	Portugal
Denmark	Romania
Finland	South Africa (Republic of)
France	Sweden
Germany	Switzerland
Hungary	Turkey
Iran	Union of Soviet Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Italy	United States of America

ESSAIS FONDAMENTAUX CLIMATIQUES ET DE ROBUSTESSE MÉCANIQUE

Troisième partie : Informations de base

Section un — Essais de froid et de chaleur sèche

1. Introduction

Le fonctionnement des composants et équipements est influencé et limité par une température interne qui dépend à la fois des conditions ambiantes extérieures au matériel et de l'énergie dissipée à l'intérieur même du matériel.

Lorsque des gradients de température existent dans le système formé par le matériel et le milieu qui l'entoure, un processus de transfert de chaleur s'établit.

Les essais de froid et de chaleur sèche peuvent avoir des variations brusques ou lentes de la température et s'appliquer à des spécimens ne dissipant pas d'énergie ou dissipant de l'énergie (ceux-ci avec ou sans systèmes de refroidissement propres).

Selon le cas, l'utilisation des chambres d'essais avec et sans circulation forcée de l'air est considérée. Un diagramme complet de toutes les procédures est donné dans l'annexe K.

1.1 Conditions ambiantes de référence

Malheureusement, les conditions ambiantes réelles dans lesquelles le matériel devra fonctionner ne sont, normalement, ni connues avec précision ni bien définies; il n'est donc pas possible de les utiliser comme base pour la construction des matériels, pour l'établissement des spécifications ou pour les essais.

Il est donc nécessaire de définir, à ces fins, des conditions ambiantes de référence conventionnelles qui peuvent être spécifiées compte tenu des considérations suivantes.

1.2 Matériels ne dissipant pas d'énergie

Si la température ambiante est uniforme et constante et qu'il n'y a pas de dissipation d'énergie à l'intérieur du matériel, un transfert de chaleur s'effectuera de l'atmosphère ambiante vers le matériel si celle-ci est à une température supérieure à celui-ci, et du matériel vers l'atmosphère ambiante si celle-ci est à une température plus basse que celui-là. Ce transfert de chaleur se poursuivra jusqu'à ce que toutes les parties du matériel aient atteint la température de l'atmosphère environnante. Le transfert de chaleur cessera à partir de ce moment-là et ne se reproduira que si la température ambiante varie. Dans ce cas, la définition de la température ambiante de référence est simple, la seule condition étant qu'elle soit uniforme et constante. Dans le cas où le matériel n'atteint pas la température de l'atmosphère environnante, la définition de la température de référence est plus complexe et les conclusions du paragraphe 1.3 sont applicables.

1.3 Matériels dissipant de l'énergie

S'il y avait une dissipation d'énergie à l'intérieur du matériel sans transfert de chaleur vers l'atmosphère ambiante, la température du matériel s'élèverait au-delà de toute limite. Il en résulte que si une température stable finit par être atteinte, cela implique que la chaleur s'écoule de façon continue du matériel vers l'atmosphère, d'où refroidissement du matériel, quelle que soit l'atmosphère ambiante. Mais si la température ambiante s'élève, une élévation plus importante de la température peut se produire dans le matériel.

BASIC ENVIRONMENTAL TESTING PROCEDURES

Part 3: Background information

Section One — Cold and dry heat tests

1. Introduction

The performance of components and equipments is influenced and limited by their internal temperatures which depend on the external ambient conditions and on the heat generated within the device itself.

Whenever temperature gradients exist in the system formed by a device and its surroundings, a process of heat transfer will ensue.

The tests cover cold and dry heat testing, with both sudden and gradual change of the temperature, and of non heat-dissipating and heat-dissipating specimens (the latter with or without artificial cooling).

The use of test chambers with and without forced air circulation is covered as appropriate. A general block diagram of the total procedure is given in Appendix K.

1.1 *Reference ambient conditions*

Unfortunately, the actual ambient conditions in which the device will have to work are normally neither accurately known nor well defined, so that it is not possible to use them as a basis for design, specification or testing.

For these purposes, it is necessary to define conventional reference ambient conditions which may be specified taking into account the following considerations.

1.2 *Devices without heat-dissipation*

If the ambient temperature is uniform and constant and there is no generation of heat within the device, heat will flow from the ambient atmosphere into the device if the former is at a higher temperature, and from the device into the ambient atmosphere if the latter is at a lower temperature. This heat transfer will continue until the device has reached in all its parts the temperature of the surrounding atmosphere. From that moment on, the heat transfer ceases and will not start again unless the ambient temperature changes. In this case, the definition of a reference ambient temperature is simple, the only condition being that it shall be uniformly distributed and constant. For the case when the device does not reach the temperature of the surrounding atmosphere, the definition of a reference temperature is more complicated and the conclusions in Sub-clause 1.3 apply.

1.3 *Devices with heat-dissipation*

If heat were generated within the device and there were no heat transfer to the ambient atmosphere, the temperature of the device would rise beyond any limit. It follows that if an ultimate steady temperature is reached, this implies that heat is flowing continuously from the device into the atmosphere whereby the device is always cooled, no matter what the ambient atmosphere is. Only if the ambient temperature rises, a further rise of temperature within the device may occur.

La température ambiante de référence dans ce cas doit évidemment être définie de façon telle que des conditions simples et bien reproductibles de transfert de chaleur soient obtenues. Le transfert de chaleur s'effectuant par trois mécanismes distincts — convection, rayonnement et conduction — il est donc nécessaire que des conditions bien définies soient obtenues pour chacun d'eux séparément mais en tenant compte en même temps des deux autres conditions.

Si plusieurs spécimens sont soumis à un des essais de chaleur sèche dans la même chambre, il est nécessaire de s'assurer que tous les spécimens sont placés à la même température ambiante et dans des conditions de montage identiques. Par contre, il ne s'est pas avéré nécessaire de distinguer l'essai d'un seul spécimen et l'essai de plusieurs spécimens lorsque l'essai de froid est effectué.

1.4 *Température ambiante*

Les utilisateurs de composants et d'équipements, en particulier d'équipements, désirent connaître les valeurs maximales et minimales de la température ambiante entre lesquelles le spécimen peut fonctionner. Ces valeurs devraient être spécifiées pour déterminer les paramètres de l'essai.

Certaines difficultés apparaissent ici car le transfert de chaleur est lié aux gradients de température et par conséquent la température du milieu entourant le matériel est nécessairement variable dans l'espace. La « température ambiante » de l'atmosphère environnante doit donc être particulièrement bien définie.

1.5 *Températures de surface*

Par ailleurs, étant donné que la principale influence sur les performances du matériel est due à sa propre température, il peut être pratique de se référer, pour le contrôle et le réglage de la température, à celle de quelques points significatifs de la surface ou même de l'intérieur du spécimen.

2. **Justification de l'existence de différentes méthodes d'essais**

2.1 *Mécanismes du transfert de chaleur*

2.1.1 *Convection*

2.1.1.1 La part la plus importante du transfert de chaleur, pour des spécimens dissipant de l'énergie exposés à des conditions d'essais dans une chambre, est celle due au phénomène de convection. Le coefficient du transfert de chaleur de la surface du spécimen en essai dans l'air ambiant dépend de la vitesse de l'air environnant. Plus la vitesse de l'air est grande et plus le transfert de chaleur est efficace. Ainsi, pour une température de l'air ambiant donnée, la température de surface du spécimen en essai sera d'autant plus faible que la vitesse de l'air sera plus élevée. Cet effet est mis en évidence sur les figures 2 et 3, pages 24 et 25.

En plus de son influence sur la valeur de la température d'un point quelconque de la surface du spécimen en essai, la circulation de l'air aura également une influence sur la distribution de la température sur la surface du spécimen en essai. Cet effet est mis en évidence sur la figure 4, page 26.

2.1.1.2 Il est évident, d'après l'annexe B, qu'il n'y a pas de relation simple entre les températures de surface et leur distribution d'une part et la vitesse de la circulation de l'air et sa direction d'autre part. Il est aussi évident que si l'essai devait être défini conformément aux conditions réelles, avec une vitesse et une direction données pour la circulation de l'air, cela entraînerait des problèmes pour la construction des chambres.

La nécessité d'avoir des conditions d'essais bien définies et reproductibles et des résultats d'essais pouvant être facilement comparés avec les conditions réelles conduit à utiliser des conditions d'« air calme ».

The reference ambient temperature for this case shall obviously be so defined that simple and well reproducible conditions for heat transfer are obtained. Because heat transfer is accomplished by means of three distinct mechanisms, convection, radiation and conduction, well-defined conditions for each of them shall be obtained separately but simultaneously.

If more than one specimen is subjected to one of the dry heat tests in the same chamber, it is necessary to ensure that all specimens are in the same ambient temperature and have identical mounting conditions. It has not, however, been found necessary to differentiate between testing of single specimens and multiple specimens when the cold test is being performed.

1.4 *Ambient temperature*

Users of components and equipments, particularly equipments, require to know the maximum and minimum values of ambient temperature between which the item will operate and these should be specific for the purpose of testing.

Certain difficulties arise here due to the fact that heat transfer is connected with temperature gradients and that therefore the temperature of the medium surrounding the device is necessarily varying in space. Consequently, the “ambient temperature” of the surrounding atmosphere shall be specially defined.

1.5 *Surface temperatures*

Considering on the other hand that the principal influence on the performance of the device is its own temperature, for the purposes of monitoring and adjusting test gear it may be convenient to refer to the temperatures at some significant points on the surface or even in the interior of the specimen.

2. **Reasons for the differing test procedures**

2.1 *Mechanisms of heat transfer*

2.1.1 *Convection*

2.1.1.1 Heat transfer through convection is a very important part of heat transfer from heat-dissipating specimens exposed to test chamber conditions.

The coefficient of heat transfer from the surface of the test specimen to the ambient air is affected by the velocity of the surrounding air. The heat transfer is more efficient the higher the air velocity. Therefore, with the same temperature of the ambient air, the surface temperature of the test specimen will be lower the higher the air velocity. This effect is illustrated in Figures 2 and 3, pages 24 and 25.

In addition to the influence on the surface temperature of the test specimen at any one location, the airflow will also effect the temperature distribution on the surface of the test specimen. This effect is illustrated in Figure 4, page 26.

2.1.1.2 It is evident from Appendix B that there is no simple relationship between surface temperature and distribution for different air velocities and airflow directions. It is also obvious that if in conformance with actual conditions testing were to be defined with a particular value of air velocity and airflow direction, this would involve problems in the design of chambers.

The necessity for a well-defined, reproducible test condition where the test results can be easily compared with actual conditions leads to the use of “free air” conditions.

- 2.1.1.3 Des « conditions d'air calme » définissent les conditions à l'intérieur d'un espace infini dans lequel le mouvement de l'air est influencé seulement par le spécimen dissipant de l'énergie et l'énergie rayonnée par le spécimen absorbée. Il n'est pas facile de reproduire, pour l'essai, des conditions d'air calme (voir l'article 3).

L'annexe A montre que les conditions d'air calme utilisées comme référence ne conduisent pas normalement à des chambres d'essais coûteuses ou de dimensions exagérées. Ayant certains avantages techniques et étant plus faciles à réaliser que des conditions de circulation forcée de l'air données, les conditions d'air calme sont utilisées de préférence pour réaliser les essais de froid et de chaleur sèche sur les spécimens dissipant de l'énergie.

Pour les raisons indiquées à l'article 3, l'essai sans circulation forcée de l'air peut dans certains cas présenter des difficultés.

Deux méthodes avec circulation forcée de l'air à petite vitesse ont été indiquées. La première méthode s'applique dans les cas où les dimensions de la chambre sont suffisantes, compte tenu des prescriptions de l'annexe A, mais où le chauffage ou le refroidissement ne peut être obtenu que par circulation forcée de l'air.

La deuxième méthode s'applique dans les cas où la chambre a des dimensions inférieures à celles prescrites dans l'annexe A ou lorsque la première méthode ne peut être utilisée pour d'autres raisons.

2.1.2 Rayonnement thermique

- 2.1.2.1 L'annexe C montre que le transfert de chaleur par rayonnement thermique ne peut être négligé lorsqu'il est question des conditions dans la chambre pour l'essai de spécimens dissipant de l'énergie. Dans le cas où les spécimens sont thermiquement noirs, ainsi que les parois de la chambre (pouvoir émissif proche de l'unité), à peu près la moitié du transfert de chaleur provenant du spécimen peut être due au rayonnement thermique. Ainsi, lorsque le spécimen dissipant de l'énergie est soumis à une certaine température ambiante dans une chambre thermiquement blanche et dans une autre thermiquement noire, les températures de surface du spécimen en essai sont très différentes. Le pouvoir émissif et la température des parois de la chambre devront donc être compris entre les limites spécifiées pour obtenir des résultats *reproductibles*.

- 2.1.2.2 Si le spécimen en essai est séparé des parois de la chambre par d'autres spécimens, par des éléments chauffants ou refroidissants, par des dispositifs de montage, etc., qui ne répondent pas aux conditions requises pour la couleur thermique et la température des parois de la chambre, le rayonnement thermique entre le spécimen en essai et les parois de la chambre est perturbé. La partie des parois de la chambre que peut « voir » un point spécifique du spécimen en essai constitue le « *facteur d'angle* » de ce point. Le facteur d'angle de chaque point du spécimen en essai ne devrait pas être perturbé de façon trop importante par des dispositifs qui ne sont pas conformes aux conditions requises pour la couleur thermique et la température des parois de la chambre.

- 2.1.2.3 Dans des conditions parfaites d'« air calme », la chaleur provenant du spécimen est complètement absorbée par l'air environnant. C'est le résultat d'une convection simple avec absorption du rayonnement thermique.

La plupart des équipements et des composants seront en fonctionnement dans un milieu plus proche du noir thermique que du blanc thermique.

Il est en outre plus facile de réaliser l'intérieur d'une chambre proche du noir thermique que proche du blanc thermique. Il est particulièrement difficile de la maintenir thermiquement blanche pendant une longue période compte tenu des effets dus au vieillissement. En fait, la plupart des peintures et matériaux (non polis) sont plus près du noir thermique que du blanc thermique (voir l'annexe J).

- 2.1.1.3 “Free air conditions” means conditions within an infinite space where the movement of the air is effected only by the heat-dissipating specimen itself, and the energy radiated by the specimen is absorbed. It is not practical for testing purposes to try to reproduce free air conditions (see Clause 3).

It is shown in Appendix A that the use of free air conditions as a reference does not normally lead to expensive or impracticably large testing-chambers. Since free air conditions have certain technical advantages and are normally easier to comply with than specified forced air conditions, they are used as the preferred way of performing cold and dry heat tests on heat-dissipating specimens.

Due to reasons given in Clause 3, there are cases where difficulties in testing with no forced air circulation arise.

Two alternative methods, where forced air circulation with low air velocity is allowed, have therefore been given. The first method applies to the cases where the size of the chamber is large enough to comply with the requirements in Appendix A, but where the heating or cooling of the chamber requires forced air circulation.

The second method applies to the cases where the chamber is too small to comply with the requirements of Appendix A, or where the first method cannot be used for other reasons.

2.1.2 Thermal radiation

- 2.1.2.1 Appendix C shows that heat transfer by thermal radiation cannot be neglected when test chamber conditions for testing of heat-dissipating specimens are discussed. In the case of thermal black test specimens and thermal black chamber walls (emissivity coefficient approaching unity), nearly half of the heat transfer from the test specimen may be due to thermal radiation. Thus, if the heat-dissipating test specimen is subjected to a certain ambient temperature in a thermal white chamber and in a thermal black chamber, the surface temperature of the test specimen will be significantly different. The emissivity coefficient and the temperature of the chamber walls should therefore be limited by specification if *reproducible* test results are to be achieved.

- 2.1.2.2 If the test specimen is sheltered from the chamber walls by other specimens, heating or cooling elements, mounting devices, etc., which do not comply with the requirements for thermal colour and temperature of the chamber walls, the heat radiation between the test specimen and the chamber walls is affected. The percentage of the chamber walls which can be “seen” by a specific point on the test specimen determines the “*view factor*” of that point. The view factors of each point of the test specimen should not be unduly disturbed by devices which do not comply with the requirements on thermal colour and temperature of the chamber walls.

- 2.1.2.3 In an ideal “free air” condition, the heat transferred from the test specimen is completely absorbed by the surrounding air. This occurs as a result of free convection and complete absorption of the thermal radiation.

Most equipments and components will be operating in a surrounding which approximates more to thermal black than to thermal white.

It is furthermore easier to make the inside of a chamber approximately thermal black than to make it approximately thermal white. It is especially difficult to keep it thermal white for a long period due to ageing effects. In fact, most paints and materials (unpolished) approximate more to thermal black than to thermal white (see Appendix J).

Si la température des parois de la chambre varie au plus de 3% de la température spécifiée pour l'essai en degrés Kelvin et si le pouvoir émissif varie de 0,7 à 1, la variation résultante sur la température de surface du spécimen en essai sera normalement inférieure à 3 K. Etant donné que le rayonnement de chaleur est proportionnel à la différence entre la température de surface du spécimen en essai à la puissance quatre et la température des parois de la chambre à la puissance quatre, le rayonnement thermique est moins important aux basses températures et, par conséquent, les conditions requises pour la couleur thermique et les parois de la chambre sont moins sévères lorsqu'elles concernent des essais à basse température.

- 2.1.2.4 Le transfert de chaleur dû au rayonnement thermique dépend de façon très étroite de la température des parois de la chambre. Cette dépendance constitue la principale raison pour laquelle l'essai avec circulation forcée de l'air ne peut être utilisé sans les corrections indiquées dans l'annexe F lorsque l'écart entre la température de surface du spécimen et la température de l'atmosphère environnante est significatif.

2.1.3 *Conduction thermique*

- 2.1.3.1 La dissipation de chaleur par conduction thermique dépend des caractéristiques thermiques des montages et autres connexions.

- 2.1.3.2 Beaucoup d'équipements et de composants dissipant de l'énergie sont destinés à être montés sur des plaques de refroidissement ou sur d'autres dispositifs bon conducteurs pour qu'une certaine partie de la chaleur soit effectivement dissipée par conduction thermique.

La spécification particulière doit alors définir les caractéristiques thermiques du montage et l'essai devrait être réalisé dans ces conditions.

- 2.1.3.3 Lorsqu'un équipement ou un composant peut être placé sur plusieurs montages ayant différentes caractéristiques de conduction thermique, le cas le plus défavorable dépend des différentes applications suivantes:

- a) Essai de chaleur sèche sur spécimens dissipant de l'énergie. La chaleur se transférant du spécimen vers les dispositifs de montage, le cas le plus défavorable se produit lorsque ce transfert est aussi faible que possible, par exemple lorsque le montage a une conduction thermique faible (isolé thermiquement).
- b) Essai de chaleur sèche sur spécimens ne dissipant pas d'énergie. Tant que la stabilité thermique n'est pas atteinte, la chaleur est transférée des parois de la chambre vers le spécimen en essai par l'intermédiaire des dispositifs de montage. Le cas le plus défavorable se produit lorsque la conduction thermique du montage est élevée. La capacité thermique du montage devrait être faible afin d'éviter un échauffement important du montage et, en conséquence, un retard dans le transfert de chaleur des parois de la chambre vers le spécimen en essai.
- c) Essai de froid sur spécimens dissipant de l'énergie ou ne dissipant pas d'énergie. Etant donné que le transfert de chaleur s'effectue du spécimen en essai vers les parois de la chambre par l'intermédiaire des dispositifs de montage, le cas le plus défavorable (température la plus basse pour le spécimen) se produit lorsque ce transfert est le plus efficace possible, par exemple quand la conduction thermique du montage est élevée.

2.1.4 *Circulation forcée de l'air*

- 2.1.4.1 Bien que la chambre soit suffisamment grande pour satisfaire aux conditions de l'annexe A, le chauffage et le refroidissement de la chambre peuvent nécessiter une circulation forcée de l'air. Dans ce cas, la chambre étant à la température du laboratoire, il est vérifié à l'intérieur de celle-ci que la température des points représentatifs de la surface du spécimen en essai n'est pas perturbée par la vitesse de l'air dans la chambre. Si la température de surface en un point quelconque du spécimen en essai ne diminue pas de plus de 5 deg C par suite de l'influence de la circulation

If the temperature of the chamber walls varies within 3% of the specified test temperature in degrees Kelvin and the emissivity coefficient varies between 0.7 to 1, the resulting variation in surface temperature of the test specimen will normally be less than 3 K. Since the heat radiation is proportional to the difference between the fourth power of the surface temperature of the test specimen and the fourth power of the chamber wall temperature, the thermal radiation is less pronounced at low temperatures and therefore the requirements on thermal colour and temperature of the chamber walls are less stringent when low temperature testing is concerned.

- 2.1.2.4 The heat transfer due to thermal radiation is considerably dependent on the temperature of the chamber walls. This dependence is the main reason why testing with forced air circulation cannot be used without corrections in accordance with Appendix E when the difference between the surface temperature of the specimen and the temperature of the ambient air is significant.

2.1.3 *Thermal conduction*

- 2.1.3.1 Heat-dissipation by thermal conduction depends on the thermal characteristics of mounting and other connections.

- 2.1.3.2 Many heat-dissipating equipments and components are intended to be mounted on heat sinks or other well-conducting devices, with the result that a certain amount of heat is effectively dissipated through thermal conduction.

The relevant specification shall then define the thermal characteristics of the mounting and these should be reproduced when the test is made.

- 2.1.3.3 If an equipment or component can be mounted in more than one manner with different values of thermal conduction, the worst case should be covered. The worst case is different for differing applications as follows:

- a) Dry heat testing of heat-dissipating specimens. Since heat is transported in the direction from the test specimen to the mounting devices, the worst case is reached when this transfer is as small as possible, i.e. when the mounting has low thermal conductivity (thermally isolated).
- b) Dry heat testing of non heat-dissipating specimens. As long as thermal stability has not been reached, the heat is transferred from the chamber walls through the mounting devices to the test specimen. The worst case is then where the thermal conductivity of the mounting is high. The thermal capacity of the mounting should be low in order to avoid a considerable warm-up time of the mounting and accordingly a delay in the heat transfer from the chamber walls to the test specimen.
- c) Cold testing of heat-dissipating specimens and non heat-dissipating specimens. Since heat is transferred from the test specimen to the chamber walls through the mounting devices, the worst case (lowest temperature of the test specimen) is reached when this transfer is as effective as possible, i.e. when the thermal conductivity of the mounting is high.

2.1.4 *Forced air circulation*

- 2.1.4.1 Where the chamber is large enough to comply with the requirements in Appendix A, the heating and cooling of the chamber may necessitate forced air circulation.

In such cases, a check is made, at *laboratory temperature* inside the chamber, that the temperature at representative points on the surface of the test specimen is not unduly influenced by the air velocity used in the chamber. If the surface temperature at any point of the test specimen is not reduced by more than 5 deg C by the influence of the forced air circulation used in the chamber,

forcée de l'air dans la chambre, l'essai est effectué comme dans une chambre sans circulation forcée de l'air et le refroidissement dû à la circulation forcée de l'air est considéré comme suffisamment faible pour être négligé.

- 2.1.4.2 Lorsque les dimensions de la chambre sont trop petites pour être conformes aux conditions de l'annexe A ou que la diminution de la température de surface mesurée selon le paragraphe 2.1.4.1 est supérieure à 5 deg C, un essai préalable devrait être effectué à l'extérieur de la chambre.

La température d'un certain nombre de points représentatifs sur la surface du spécimen en essai est mesurée dans le laboratoire à l'extérieur de la chambre afin d'obtenir des bases pour le calcul des températures de surface dans les conditions spécifiées pour l'essai. Ces mesures sont effectuées dans les conditions de dissipation prescrites dans la spécification particulière pour la température d'essai.

Pour de petits écarts de température ΔT_1 entre la température ambiante et la température de surface, on peut supposer que ΔT_1 sera le même pour différentes températures ambiantes pourvu que les différences ΔT_2 entre les températures ambiantes soient faibles.

L'erreur est au plus de 3 deg C si $\Delta T_1 < 25$ deg C et $\Delta T_2 < 30$ deg C.

Les relations entre les températures de surface à différentes températures ambiantes sont données dans l'annexe E. Il est possible avec les abaques de l'annexe E de calculer la température de surface à une température ambiante quelconque si la température de surface à une température ambiante donnée est connue. En utilisant l'abaque, il est possible d'étendre la gamme du calcul des températures de surface dans des conditions d'essais spécifiées si ces températures sont connues à la température du laboratoire. Les abaques de l'annexe E peuvent être utilisés jusqu'à $\Delta T_1 = 80$ deg C et $\Delta T_2 = 65$ deg C au moins.

- 2.1.4.3 Le choix des points représentatifs à contrôler lorsque sont utilisées, soit la première soit la seconde méthode, devrait être basé sur une connaissance détaillée du spécimen en essai (distribution thermique, points thermiquement critiques, etc.). Puisque ce choix est essentiellement une question de jugement, la méthode préférentielle, dans laquelle aucune circulation forcée de l'air n'est utilisée, est fortement recommandée pour les essais d'approbation de type à cause de son plus haut degré de reproductibilité.

Un seul essai préalable du fonctionnement de la chambre peut être suffisant pour une longue série d'essais analogues (par exemple composants analogues) tandis que dans d'autres cas une vérification peut être nécessaire avant chaque essai (par exemple pour des équipements différents).

3. Chambres d'essais

3.1 Généralités

Il n'est pas facile de reproduire, pour les essais, les conditions d'air calme; néanmoins, il est possible de simuler les effets de ces conditions.

Même dans des chambres de très grandes dimensions, la circulation d'air et la distribution de la température autour du spécimen en essai ne seront pas identiques à celles obtenues dans des conditions réelles d'air calme.

Néanmoins, les résultats déjà obtenus et l'expérience montrent que les conditions dans une chambre de dimensions suffisantes sans circulation forcée de l'air influencent la température du spécimen en essai à peu près comme les conditions d'air calme.

Les prescriptions sur les dimensions de la chambre, compte tenu des dimensions et de la dissipation du spécimen en essai, nécessaires pour simuler les effets des conditions d'air calme, sont données dans l'annexe A.

Les prescriptions indiquées sont applicables lorsque la température ambiante est contrôlée dans la partie inférieure de la chambre, où l'air n'est pas influencé de façon importante par les phénomènes de convection dus à la dissipation du spécimen.

testing is performed as in a chamber with no forced air circulation, and the cooling effect of the forced air circulation is neglected since it may be assumed to be reasonably small.

- 2.1.4.2 Where the chamber is too small to comply with the requirements of Appendix A, or where the reduction of surface temperature as measured in Sub-clause 2.1.4.1 exceeds 5 deg C, an exploratory test should be made outside the test chamber.

The temperatures of a representative number of points on the surface of the test specimen are measured in the laboratory *outside the chamber* in order to give a basis for calculation of the surface temperatures at the specified test conditions. These measurements are carried out under those load conditions which are specified for the test temperature by the relevant specification.

For small temperature differences ΔT_1 between ambient temperature and surface temperature, this difference ΔT_1 can be assumed to be the same in different ambient temperatures as long as the differences ΔT_2 in ambient temperatures are small.

The error is within 3 deg C if $\Delta T_1 < 25$ deg C and $\Delta T_2 < 30$ deg C.

The relationships between surface temperatures at different ambient temperatures are given in Appendix E. With nomograms in Appendix E, it is possible to calculate the surface temperature at any ambient temperature if the surface temperature at a certain ambient temperature is known. By using the nomogram, it is possible to extend the range where the surface temperatures in specified test conditions can be calculated if they are known at laboratory temperature. The nomograms in Appendix E can be used to at least $\Delta T_1 = 80$ deg C and $\Delta T_2 = 65$ deg C.

- 2.1.4.3 The choice of representative points to be checked when the alternative first and second methods are used should be based on a detailed knowledge of test specimen (thermal distribution, thermally critical points, etc.). Since such a choice is mainly a matter of skilled judgement, the preferred method where no forced air circulation is used is strongly recommended for type approval purposes because of its higher degree of reproducibility.

One exploratory test may cover the chamber performance for a long series of similar tests (e.g. similar components), whereas in other cases an assessment may need to be made prior to each test (e.g. for different equipment).

3. Test chambers

3.1 General

It is not practical for testing purposes to try to reproduce free air conditions, but it is however possible to simulate the effects of these conditions.

Even in very large chambers, the air circulation and temperature distribution around the test specimen will not be identical with actual free air conditions.

Nevertheless, it is established by experimental results and test experience that a reasonably large chamber with no forced air circulation will affect the temperature of the test specimen in approximately the same way as would free air conditions.

The requirements on size of chamber in relation to the size and heat dissipation of the test specimen, which are necessary for simulating the effects of free air conditions, are given in Appendix A.

The requirements presented are valid when the ambient temperature is monitored in the lower part of the testing chamber, where the air is not greatly affected by the heat convection from the test specimen.

Néanmoins, dans certains cas, l'essai sans circulation forcée de l'air présente certaines difficultés. Dans un certain nombre de chambres existant actuellement, le chauffage ou le refroidissement de la chambre ne peut être effectué sans circulation forcée de l'air, en particulier pour l'essai des spécimens de grandes dimensions ou lorsqu'un grand nombre de composants sont essayés dans la même chambre.

Le tableau I donne les paramètres d'une chambre d'essai qui auront une influence considérable sur les résultats de l'essai d'un spécimen dissipant de l'énergie.

TABEAU I

Mécanisme du transfert	Convection		Rayonnement	Conduction
	Air calme	Circulation forcée de l'air		
Paramètres de la chambre	Dimensions; température de l'air	Vitesse de l'air; température de l'air	Température des parois; pouvoir émissif; facteur d'angle	Caractéristiques thermiques du montage

3.2 Méthodes permettant de réaliser les conditions requises dans la chambre d'essai

3.2.1 Construction des chambres permettant de reproduire les effets des conditions d'air calme

Les éléments chauffants et refroidissants ne devraient pas être placés dans l'espace de travail, puisque le contrôle de la température dans la chambre implique des variations de la température de ces éléments. Des fluctuations importantes de la température des parois de la chambre devraient être évitées afin de réduire les problèmes de rayonnement.

Les meilleurs résultats seraient obtenus si toutes les parois de la chambre étaient chauffées. La circulation de liquide constitue une méthode pratique pour chauffer ou refroidir toutes les parois sans créer de fluctuations importantes dans la température des parois. Les parois de la chambre devraient être conformes aux prescriptions de l'essai relatives à l'émissivité.

Lorsque, dans une chambre, la température d'essai est maintenue par circulation d'air, il est possible de placer le spécimen en essai dans une boîte qui est à son tour placée dans la chambre. Le volume de la boîte devrait être conforme aux dimensions prescrites pour l'essai et les parois devraient être conformes aux conditions prescrites pour le pouvoir émissif.

3.2.2 Construction des chambres avec circulation forcée de l'air

Une chambre à circulation d'air est utilisée lorsque les dimensions ou la dissipation des spécimens sont telles qu'une chambre à air calme n'est pas appropriée. Toutes les conditions relatives aux chambres à air calme s'appliquent donc sauf celles concernant les dimensions.

La circulation d'air devrait être de vitesse suffisante pour éviter que le spécimen ne soit soumis à des conditions trop sévères, sans être trop rapide car un refroidissement excessif du spécimen pourrait se produire. Les effets de la circulation d'air sont donnés plus en détail dans l'annexe B. En pratique, on a constaté qu'une circulation d'air de 0,5 m/s est un compromis satisfaisant, bien que la possibilité de varier la vitesse de la circulation d'air soit un avantage.

Le flux d'air devrait être aussi uniforme que possible; il devrait être dirigé verticalement de bas en haut afin de réduire les perturbations qui s'ajoutent à celles provoquées par l'effet de convection proprement dit. Si la ventilation provoque une augmentation de la pression dans le stand de préparation d'où l'air s'échappe à travers un filtre (par exemple tampon de fibre de verre), il se crée un flux d'air uniforme. Ce stand peut aussi contenir les éléments chauffants qui contrôlent la température dans la chambre. Eventuellement, les éléments chauffants et le filtre peuvent être combinés par l'utilisation d'éléments chauffants sous forme de fibres tressées.

However, in some cases difficulties in testing with no forced air circulation arise. In a number of existing chambers the heating or cooling of the chamber cannot be performed without forced air circulation, especially for testing of large specimens, or many components in the same chamber.

Table I shows the parameters of a test chamber that will have a considerable influence on the test results of a heat-dissipating specimen.

TABLE I

Transfer mechanism	Convection		Radiation	Conduction
	Free air	Forced air circulation		
Chamber parameters	Dimensions; air temperature	Air velocity; air temperature	Wall temperature; wall emission; view factor	Thermal characteristic of mounting

3.2 *Methods of achieving the required conditions in the test chamber*

3.2.1 *Design of chambers for simulating the effect of free air condition*

Heating and cooling elements should not be situated in the working space, as the controlling of the chamber temperature involves changes in the temperatures of these elements. Large fluctuations in the temperature of the chamber walls should be avoided in order to minimize radiation problems.

For the best results, all the walls of the chamber should be heated. Liquid circulation provides a convenient method of heating or cooling all walls without large fluctuations in wall temperature. The walls of the chamber should fulfil the emissivity requirements of the test.

Where a chamber relies on air circulation for maintenance of the test temperature, it may be possible to place the test specimen inside a box which is then placed in a chamber. The volume of the box should fulfil the dimensional requirements of the test and the walls should meet the emissivity coefficient requirements.

3.2.2 *Design of chambers with forced air circulation*

A chamber with an airflow is intended for use with specimens which make the use of a free air chamber impracticable either by virtue of their large size or high dissipation. All the requirements for free air chambers thus apply except for those relating to dimensions.

The airflow should be large enough to ensure that the specimen is not overheated, yet should not be so large that excessive cooling of the specimen can occur. The effects of airflow are given in more detail in Appendix B. In practice, an airflow of 0.5 m/s has been found to represent a fair compromise, although facility to vary the rate of flow is a useful advantage.

The airflow should be as uniform as possible. The airflow should be directed vertically upward to minimize the variation from that which would occur due to convection above. If the fan causes a pressure build-up in an antechamber, from which the air is allowed to escape through a filter (e.g. fibre-glass mat) a uniform airflow results. This antechamber may also contain the heaters which control the chamber temperature. Alternatively, the heaters and filter may be combined by the use of woven mesh heaters.

3.2.3 *Pouvoir émissif des parois*

Les parois de la chambre devraient être thermiquement noires dans le cas où des conditions d'air calme dans un espace infini doivent être réalisées. Le tableau IV de l'annexe J indique qu'un pouvoir émissif de 0,70 peut être facilement obtenu. La plupart des peintures mates conviennent parfaitement pour le traitement des parois des chambres fonctionnant à des températures modérées.

3.2.4 *Caractéristiques thermiques des dispositifs de montage*

Il y aurait lieu de se référer au paragraphe 2.1.3 et à l'annexe D dans lesquels sont données quelques caractéristiques de sorties par fils. Il y aurait lieu également de se référer à l'annexe F qui donne les conductivités thermiques de divers matériaux. Dans le cas où la conduction par le montage et/ou les sorties (fils par exemple) est importante, il est indispensable que ces sorties aient toujours la même longueur pour tous les essais.

4. **Mesures**

4.1 *Température*

Les mesures de température à différents points sur ou dans un spécimen sont nécessaires dans le cas d'essais de spécimens dissipant de l'énergie dans des conditions autres que l'« air calme ».

Des recommandations sont données dans l'annexe G.

4.2 *Vitesse de l'air*

La connaissance de la vitesse de l'air dans la chambre d'essai, bien que non indispensable pour la description de l'essai, est néanmoins très utile, par exemple pour assurer des conditions uniformes à l'intérieur de la chambre dans le cas d'essais de plusieurs spécimens dans la même chambre avec circulation forcée de l'air.

Des recommandations sont données dans l'annexe H.

4.3 *Pouvoir émissif*

Le transfert de chaleur par rayonnement étant important dans le cas d'essais sur spécimens dissipant de l'énergie, le pouvoir émissif des parois de la chambre doit être mesuré et vérifié périodiquement.

Des recommandations sur ces mesures sont données dans l'annexe J.

3.2.3 *Emissivity coefficient of walls*

The walls of the chamber should be thermal black if free air conditions in infinite space are to be simulated. The Table IV of Appendix J indicates that an emissivity coefficient of 0.70 may easily be achieved. Most matt paints are perfectly satisfactory for the treatment of chamber walls operating at moderate temperatures.

3.2.4 *Thermal characteristics of mounting devices*

Reference should be made in Sub-clause 2.1.3 and Appendix D where some characteristics for wire terminations are given. Reference should also be made to Appendix F which gives thermal conductivities of various materials. In cases where conduction by a mounting and/or terminations, such as lead wires, becomes important, it is essential that a constant length of such wire terminations is used for all tests.

4. **Measurements**

4.1 *Temperature*

Measurements of temperature at various points on or in a specimen are necessary for the purposes of tests involving heat-dissipating specimens in conditions other than "free air".

Recommendations are given in Appendix G.

4.2 *Air velocity*

A knowledge of the velocity of the air in the test chamber, while not essential for specification of the tests, is nevertheless most useful, e.g. to ensure uniformity of conditions within the chamber in the case of testing multiple specimens in the same chamber with forced air circulation.

Recommendations are given in Appendix H.

4.3 *Emissivity coefficient*

Since the transfer of heat by radiation is important in the case of testing of heat-dissipating specimens, the emissivity coefficient of the walls of the chamber shall be measured and periodically checked.

Recommendations for such measurements are given in Appendix J.

ANNEXE A

EFFETS DES DIMENSIONS DE LA CHAMBRE SUR LA TEMPÉRATURE DE SURFACE D'UN SPÉCIMEN EN L'ABSENCE DE CIRCULATION FORCÉE DE L'AIR

La figure 1, ci-contre, donne les résultats d'une série d'expériences qui ont été effectuées afin de déterminer les dimensions minimales acceptables d'une chambre pour essais de chaleur sèche dans laquelle, pour un certain spécimen en essai, la température de surface du spécimen sera approximativement la même que dans les conditions d'« air calme ».

Des spécimens de dimensions différentes et de dissipation par unité de surface variable ont été soumis à une température ambiante (définie dans la Publication 68-1 de la CEI: Essais fondamentaux climatiques et de robustesse mécanique, Première partie: Généralités) de $+70^{\circ}\text{C}$ dans des chambres pour essais de chaleur sèche, de dimensions différentes. Une chambre d'essai était considérée de dimensions satisfaisantes si la température du spécimen en essai ne présentait pas des écarts supérieurs à 5°C de celle obtenue dans une chambre très grande comparativement à la dimension des spécimens en essai. L'écart entre la température des parois de la chambre et la température ambiante était maintenu inférieur ou égal à 5°C .

Les spécimens en essai étaient de forme cubique et près du blanc thermique afin de constituer le cas le plus défavorable, où presque la totalité de la chaleur était dissipée par convection. Les parois de la chambre étaient proches du noir thermique.

APPENDIX A

EFFECTS OF SIZE OF CHAMBER ON SURFACE TEMPERATURE OF A SPECIMEN WHEN NO FORCED AIR CIRCULATION IS USED

Figure 1, opposite, shows the results of a series of experiments which have been made in order to determine the minimum acceptable size of chamber for dry heat testing in which for a certain test specimen the surface temperature on the specimen will be approximately the same as in "free air" conditions.

Specimens with different sizes and variable heat dissipation per unit surface have been subjected to an ambient temperature (defined as in IEC Publication 68-1, Basic Environmental Testing Procedures, Part 1: General) of $+70^{\circ}\text{C}$ in dry heat test chambers of different sizes. The criterion for the acceptable size of chamber was the requirement that the surface temperature of the test specimen shall not be allowed to deviate more than 5°C from the surface temperature attained in the biggest chamber, which was very large compared with the sizes of the test specimens. The walls of the chambers were kept within 5°C of the ambient temperature.

The test specimens were cubical and almost thermal white in order to give the worst case where almost all heat was dissipated through convection. The chamber walls were close to thermal black.

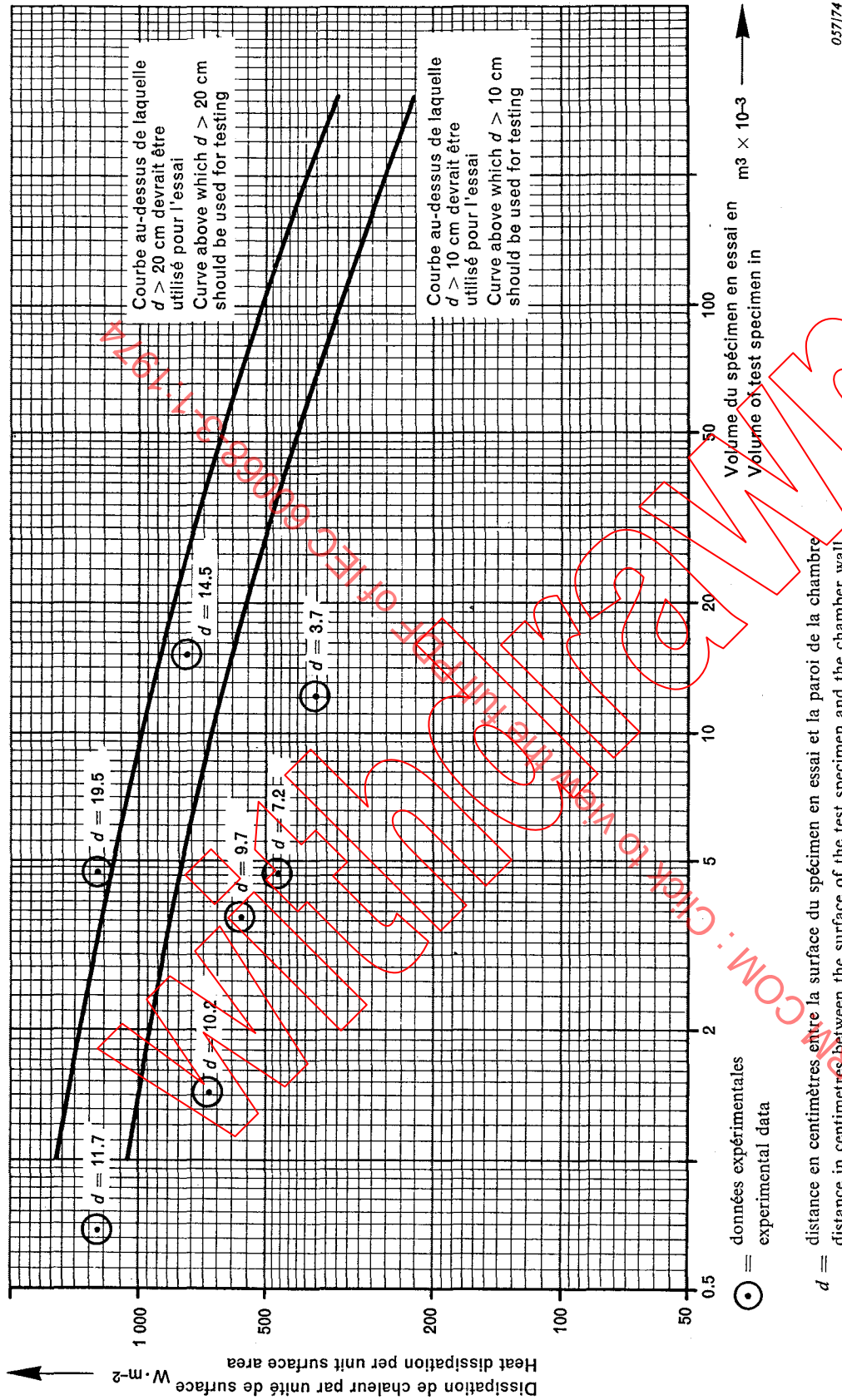


Fig. 1. — Dissipation de chaleur par unité de surface du spécimen en essai pour laquelle l'écart entre la température de surface du spécimen dans une grande chambre et dans une chambre plus petite atteint 5 deg C.
Heat dissipation per unit surface area of the test specimen at which the deviation between the surface temperature of the specimen in a very large chamber and in a smaller chamber reaches 5 deg C.

057174

ANNEXE B

EFFET DE LA CIRCULATION DE L'AIR SUR LES CONDITIONS DANS LA CHAMBRE ET SUR LES TEMPÉRATURES DE SURFACE DES SPÉCIMENS EN ESSAI

1. Calcul de l'effet de la circulation d'air sur la température du spécimen et sur le gradient de température dans la chambre

- v = vitesse de l'air (m.s^{-1})
 $\lambda(v)$ = coefficient du transfert de chaleur ($\text{W.m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
 P = quantité de chaleur transférée par unité de temps (W)
 F = zone effective de dissipation (m^2)
 t = temps
 G = masse d'air pénétrant ou sortant par unité de temps (kg.s^{-1})
 C_p = capacité calorifique de l'air à pression constante ($1\,000 \text{ J.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 γ = masse volumique de l'air ($1,29 \text{ kg.m}^{-3}$)
 S = surface d'une section droite de la chambre (m^2)
 T = température (K)

1.1 Température du spécimen

$$T = \frac{1}{\lambda(v)} \cdot \frac{P}{F}$$

où: $\lambda(v) = a + bv$

$$a \cong 10$$

$$v < \frac{a}{b} < 3 \text{ m.s}^{-1}$$

Les résultats expérimentaux montrent que pour des vitesses de l'air faibles correspondant à celles utilisées pour les essais, $b \cong 3$; b croît lorsque la vitesse de l'air croît; à 3 m.s^{-1} , $b \cong 8$.

Si $v = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$, l'erreur sur $T \leq 10\%$.

1.2 Gradient entre l'air pénétrant et l'air sortant

$$\Delta T_{\text{air}} = \frac{P}{C_p G} = \frac{P}{C_p S v \gamma}$$

Les valeurs numériques pour une chambre cubique de 0,5 m d'arête avec une circulation d'air de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ et une dissipation à l'intérieur de la chambre de 100 W, sont les suivantes:

$$S = 0,25 \text{ m}^2$$

$$\Delta T_{\text{air}} = \frac{100}{1,29 \times 1\,000 \times 0,25 \times 0,3} \cong 1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Jusqu'à 100 W de dissipation, il n'y a pas de problèmes. A 1 kW, il est nécessaire d'avoir une grande chambre (par exemple une chambre de forme cubique de 1,5 m environ d'arête). Une circulation d'air plus rapide peut être utilisée si le gradient est acceptable.

APPENDIX B

EFFECT OF AIRFLOW ON CHAMBER CONDITIONS AND ON SURFACE TEMPERATURES OF TEST SPECIMENS

1. Calculation of the effect on airflow on specimen temperature and on temperature gradient in the chamber

- v = air velocity (m.s^{-1})
 $\lambda(v)$ = heat transfer coefficient ($\text{W.m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
 P = quantity of heat transferred in unit time (W)
 F = effective area of the heat-dissipating surface (m^2)
 t = time
 G = mass of incoming or outgoing air per unit time (kg.s^{-1})
 C_p = specific heat of air at constant pressure ($1\,000 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 γ = density of air (1.29 kg.m^{-3})
 S = cross-sectional area of chamber (m^2)
 T = temperature (K)

1.1 Specimen temperature

$$T = \frac{1}{\lambda(v)} \cdot \frac{P}{F}$$

where: $\lambda(v) = a + bv$
 $a \cong 10$

$$v < \frac{a}{b} < 3 \text{ m.s}^{-1}$$

Experimental results indicate that, at the low air velocities relevant to the tests, $b \cong 3$; b increases with increasing air velocity until at 3 m.s^{-1} , $b \cong 8$.

If $v = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$, the error in $T \leq 10\%$.

1.2 Gradient between incoming and outgoing air

$$\Delta T_{\text{air}} = \frac{P}{C_p G} = \frac{P}{C_p S v \gamma}$$

Substituting numerical values for a cubic chamber of 0.5 m side with an airflow of 0.3 m.s^{-1} and a power dissipation within the chamber of 100 W :

$$S = 0.25 \text{ m}^2$$

$$\Delta T_{\text{air}} = \frac{100}{1.29 \times 1\,000 \times 0.25 \times 0.3} \cong 1^\circ \text{C}$$

Up to 100 W dissipation, there is little problem. At 1 kW , a large chamber is needed (e.g. a cubic chamber of side of about 1.5 m). A faster air flow can be used if the gradient is acceptable.

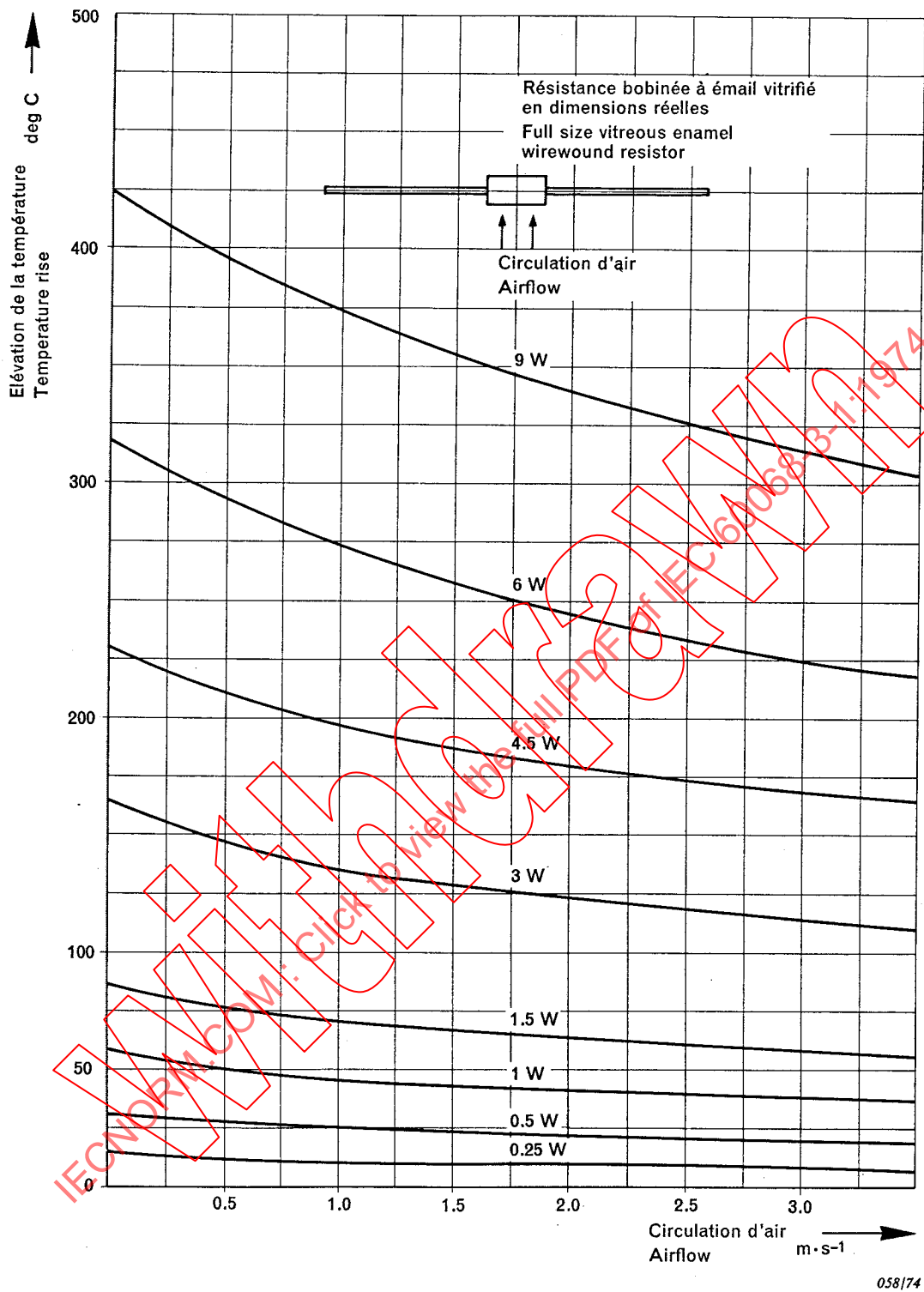


FIG. 2. — Données expérimentales sur l'effet de la circulation d'air sur la température de surface d'une résistance bobinée — Circulation d'air selon une direction radiale.

Experimental data on the effect of airflow on surface temperature of a wirewound resistor — Radial airflow.

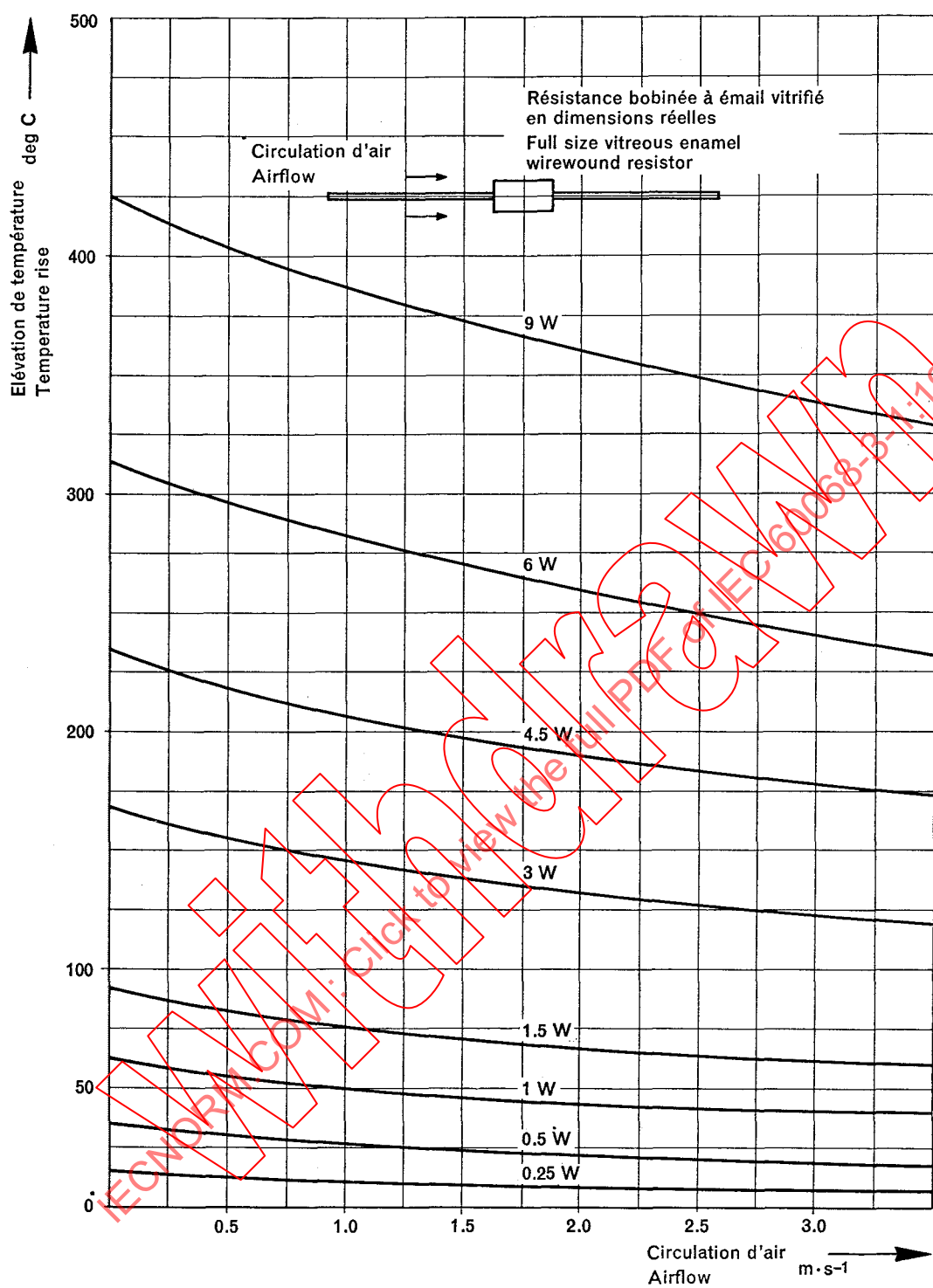


FIG. 3. — Données expérimentales sur l'effet de la circulation d'air sur la température de surface d'une résistance bobinée — Circulation d'air selon une direction axiale.

Experimental data on the effect of airflow on surface temperature of a wirewound resistor — Axial airflow.

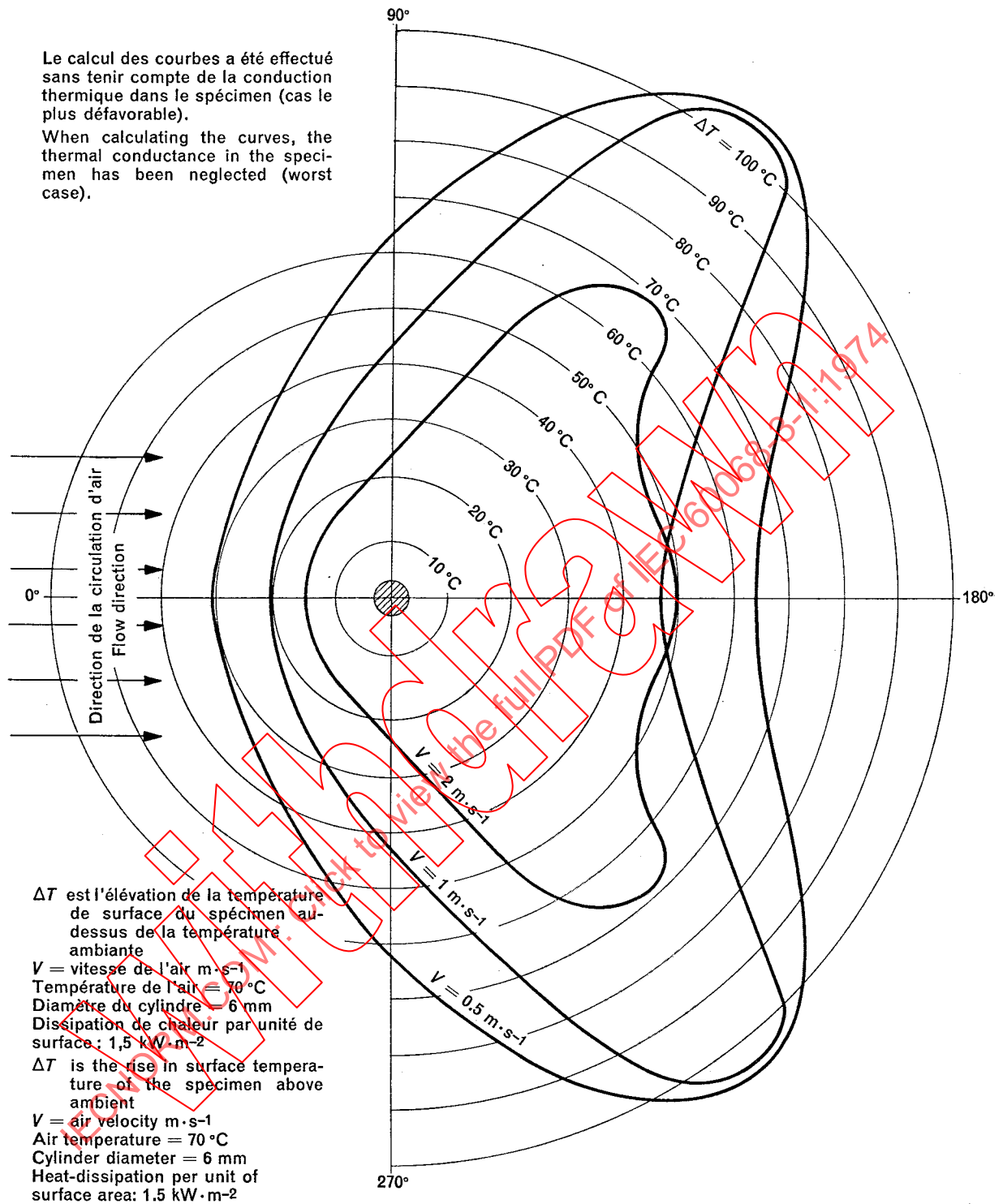


FIG. 4. — Distribution de la température sur un cylindre avec une dissipation homogène pour des vitesses de circulation d'air de 0,5, 1 et $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

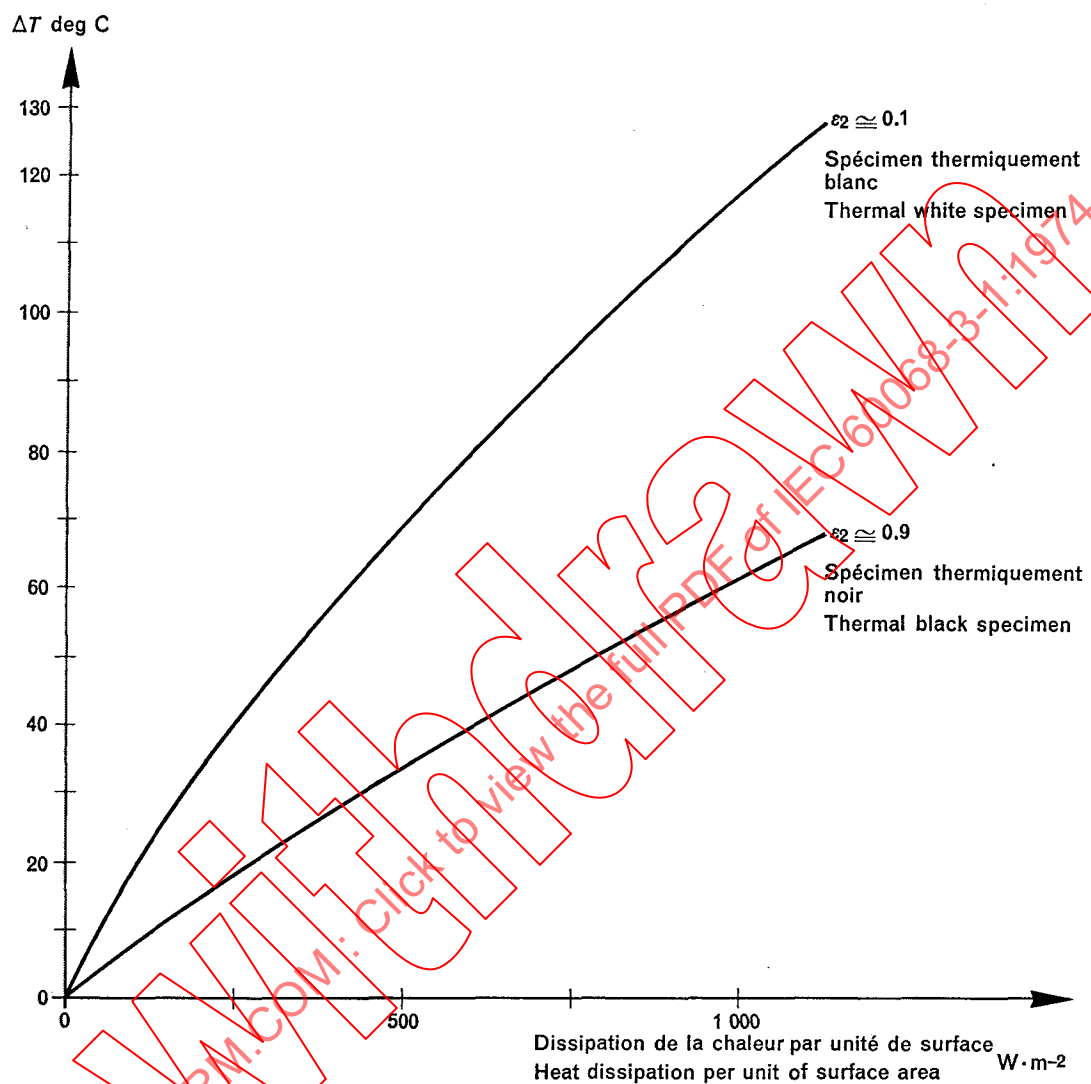
Temperature distribution on a cylinder with homogeneous heat-generation in airflow of velocities 0.5, 1 and $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

ANNEXE C

APPENDIX C

EFFET DU POUVOIR ÉMISSIF DU SPÉCIMEN
SUR L'ÉLEVATION DE TEMPÉRATURE

EFFECT OF SPECIMEN EMISSIVITY
COEFFICIENT ON TEMPERATURE RISE



061/74

FIG. 5. — Comparaison de l'élévation de température en fonction de la dissipation pour des spécimens thermiquement blancs ou noirs soumis à une température ambiante de 70 °C dans une chambre dont les parois sont thermiquement noires (données expérimentales). Voir également l'annexe E.

Comparison of the temperature rise as a function of heat-dissipation for thermal white and thermal black specimens subjected to an ambient temperature of 70 °C in a chamber with thermal black walls (experimental values).

See also Appendix E.

ANNEXE D

— Page blanche —

— Blank page —

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60068-3-1:1974

Withdrawn

ANNEXE E

CALCULS ET ABAQUES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR

1. Nomenclature

- P = quantité de chaleur transférée par unité de temps (W)
 A_2 = surface du spécimen (m^2)
 A_1 = surface des parois de la chambre (m^2)
 T_a = température des parois de la chambre (K)
 T_s = température de surface du spécimen (K)
 ε_1 = pouvoir émissif des parois de la chambre
 ε_2 = pouvoir émissif du spécimen
 σ = constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

- a = dimension moyenne du spécimen (m)
 α = coefficient de convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). La valeur de α dépend de $(T_s - T_a)$ et a .

2. Transfert de chaleur par rayonnement

La quantité de chaleur transférée par rayonnement uniquement, d'un objet dans une chambre aux parois environnantes, est donnée par:

$$P = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)} \cdot A_2 (T_s^4 - T_a^4)$$

Pour une chambre de dimensions infinies, c'est-à-dire en air calme, $A_1 \gg A_2$ et on obtient:

$$P = \varepsilon_2 \sigma A_2 (T_s^4 - T_a^4)$$

Le même résultat est obtenu pour des parois thermiquement noires ($\varepsilon_1 = 1$) indépendamment des dimensions de la chambre.

Avec la simplification:

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)}$$

le cas général peut s'écrire:

$$P = \sigma F A_2 (T_s - T_a) (T_s + T_a) (T_s^2 + T_a^2) = \sigma F A_2 (T_s - T_a) \cdot f(T_a, T_s)$$

ou:

$$\frac{P}{F A_2 (T_s - T_a)} = \sigma f(T_a, T_s)$$

Cette relation est représentée à la figure 5, annexe C.

3. Transfert de chaleur par rayonnement et convection

3.1 Transfert de chaleur

En supposant que les parois de la chambre sont à la même température que l'air ambiant, on a:

$$\frac{P}{A_2} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)} (T_s^4 - T_a^4) + \alpha (T_s - T_a)$$

APPENDIX E

HEAT TRANSFER CALCULATIONS AND NOMOGRAMS

1. Nomenclature

- P = quantity of heat transferred in unit time (W)
 A_2 = surface area of specimen (m^2)
 A_1 = surface area of chamber walls (m^2)
 T_a = temperature of chamber walls (K)
 T_s = surface temperature of specimen (K)
 ε_1 = emissivity coefficient of chamber walls
 ε_2 = emissivity coefficient of specimen
 σ = Stefan-Boltzmann constant:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

- a = average specimen dimension (m)
 α = convection coefficient ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). The value of α is dependent on $(T_s - T_a)$ and a .

2. Heat transfer by radiation

The quantity of heat transferred by radiation alone from an object in a chamber to the surrounding walls is given by:

$$P = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)} \cdot A_2 (T_s^4 - T_a^4)$$

For an infinite chamber, i.e. in free air, $A_1 \gg A_2$ and one obtains:

$$P = \varepsilon_2 \sigma \cdot A_2 (T_s^4 - T_a^4)$$

The same result is obtained for thermally black walls ($\varepsilon_1 = 1$) independently of chamber size.

With the abbreviation:

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)}$$

the general case can be rewritten:

$$P = \sigma F A_2 (T_s - T_a) (T_s + T_a) (T_s^2 + T_a^2) = \sigma F A_2 (T_s - T_a) \cdot f(T_a, T_s)$$

or:

$$\frac{P}{F A_2 (T_s - T_a)} = \sigma f(T_a, T_s)$$

This relation is represented in Figure 5, Appendix C.

3. Heat transfer by radiation and convection

3.1 Heat transfer

Assuming that the chamber walls have the same temperature as the ambient air, one has:

$$\frac{P}{A_2} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)} (T_s^4 - T_a^4) + \alpha(T_s - T_a)$$

Pour des conditions d'air calme ou des parois thermiquement noires, cela peut se simplifier en :

$$\frac{P}{A_2} = \varepsilon_2 \sigma (T_s^4 - T_a^4) + \alpha (T_s - T_a)$$

ce qui peut s'écrire :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{P}{A_2} = \left(T_s + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_s^4 \right) - \left(T_a + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_a^4 \right)$$

En introduisant les nouvelles variables :

$$x_s = T_s + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_s^4 \quad x_a = T_a + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_a^4$$

on a :

$$\frac{P}{A_2} = \alpha (x_s - x_a)$$

Cette relation peut être facilement représentée par un abaque. Deux exemples sont indiqués (dans les abaques, les températures sont données en °C pour plus de commodité).

3.2. *Abaques*

D'après l'article 1, on voit que α dépend de $T_s - T_a$ et de la dimension moyenne du spécimen a . Des exemples d'abaques pour $\varepsilon_2 = 0,7$, basés sur deux valeurs différentes de α , sont donnés dans les figures 8 et 9, pages 35 et 36.

Les valeurs utilisées pour le calcul des abaques sont les suivantes :

	Figure 8	Figure 9
Dimension moyenne du spécimen	$a = 0,2 \text{ m}$	$a = 0,05 \text{ m}$
Ecart de température moyen	$T_s - T_a = 35 \text{ °C}$	$T_s - T_a = 100 \text{ °C}$
Coefficient de convection pour les valeurs de dimension du spécimen et d'écart de température données ci-dessus	$\alpha = 5 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ $\frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} = 0,8 \cdot 10^{-8} \cdot \text{K}^{-3}$	$\alpha = 8 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ $\frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} = 0,5 \cdot 10^{-8} \cdot \text{K}^{-3}$

Exemple d'utilisation des abaques

Problème : Un spécimen dissipant une certaine puissance en air calme à 20 °C atteint une température de surface de 70 °C.

Quelle sera sa température de surface pour une dissipation identique en air calme à 55 °C ?

Solution : Puisque $T_s - T_a = 50 \text{ °C}$, la valeur d' α utilisée dans l'abaque de la figure 8, page 35, est la plus proche de la vraie valeur.

Sur la figure 8, tirer un trait du point + 20 °C sur l'échelle T_a au point + 70 °C sur l'échelle T_s ; noter son intersection avec LA DROITE CHARNIÈRE. Tracer maintenant un trait du point + 55 °C sur l'échelle T_a passant par ce point d'intersection sur LA DROITE CHARNIÈRE; la nouvelle intersection avec l'échelle T_s + 98 °C donne la température de surface requise.

Note. — La relation entre l'écart de température et le pouvoir émissif ε_2 du spécimen en essai est donnée sur la figure 10, page 37, pour le cas $a = 0,1 \text{ m}$ et $\varepsilon_1 = 1,0$ et la température ambiante du laboratoire $T_{a0} = 20 \text{ °C}$.

4. **Analogie entre les abaques utilisés dans les essais A et B**

Ainsi qu'on peut le voir en comparant les figures 8 et 9, pages 35 et 36, les écarts de température dépendent seulement dans de faibles proportions des valeurs d' α . Aussi un seul abaque est donné dans les essais A et B (basé sur $\alpha = 5 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

For free air conditions or for black chamber walls, this simplifies to:

$$\frac{P}{A_2} = \varepsilon_2 \sigma (T_s^4 - T_a^4) + \alpha (T_s - T_a)$$

which can be rewritten:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{P}{A_2} = \left(T_s + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_s^4 \right) - \left(T_a + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_a^4 \right)$$

Introducing the new variables:

$$x_s = T_s + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_s^4 \quad x_a = T_a + \frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} T_a^4$$

one has:

$$\frac{P}{A_2} = \alpha (x_s - x_a)$$

This relation can be easily represented by means of a nomogram. Two examples are included (in the nomograms, temperatures are given in °C for convenience).

3.2 Nomograms

From Clause 1, it is seen that α depends on $T_s - T_a$ and on the average specimen dimension a . Examples of nomograms for $\varepsilon_2 = 0.7$ based on two different values of a are given in Figures 8 and 9, pages 35 and 36.

The values used for calculating the nomograms are:

	Figure 8 $a = 0.2 \text{ m}$	Figure 9 $a = 0.05 \text{ m}$
Average specimen dimension	$a = 0.2 \text{ m}$	$a = 0.05 \text{ m}$
Average overtemperature	$T_s - T_a = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_s - T_a = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Convection coefficient for the values of specimen dimension and overtemperature given above	$\alpha = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ $\frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} = 0.8 \cdot 10^{-8} \cdot \text{K}^{-3}$	$\alpha = 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ $\frac{\varepsilon_2 \sigma}{\alpha} = 0.5 \cdot 10^{-8} \cdot \text{K}^{-3}$

Example for the use of the nomograms

Question: A specimen dissipating a certain power in free air of 20 °C reaches a surface temperature of 70 °C.

What will be its surface temperature when dissipating the same power in free air of 55 °C?

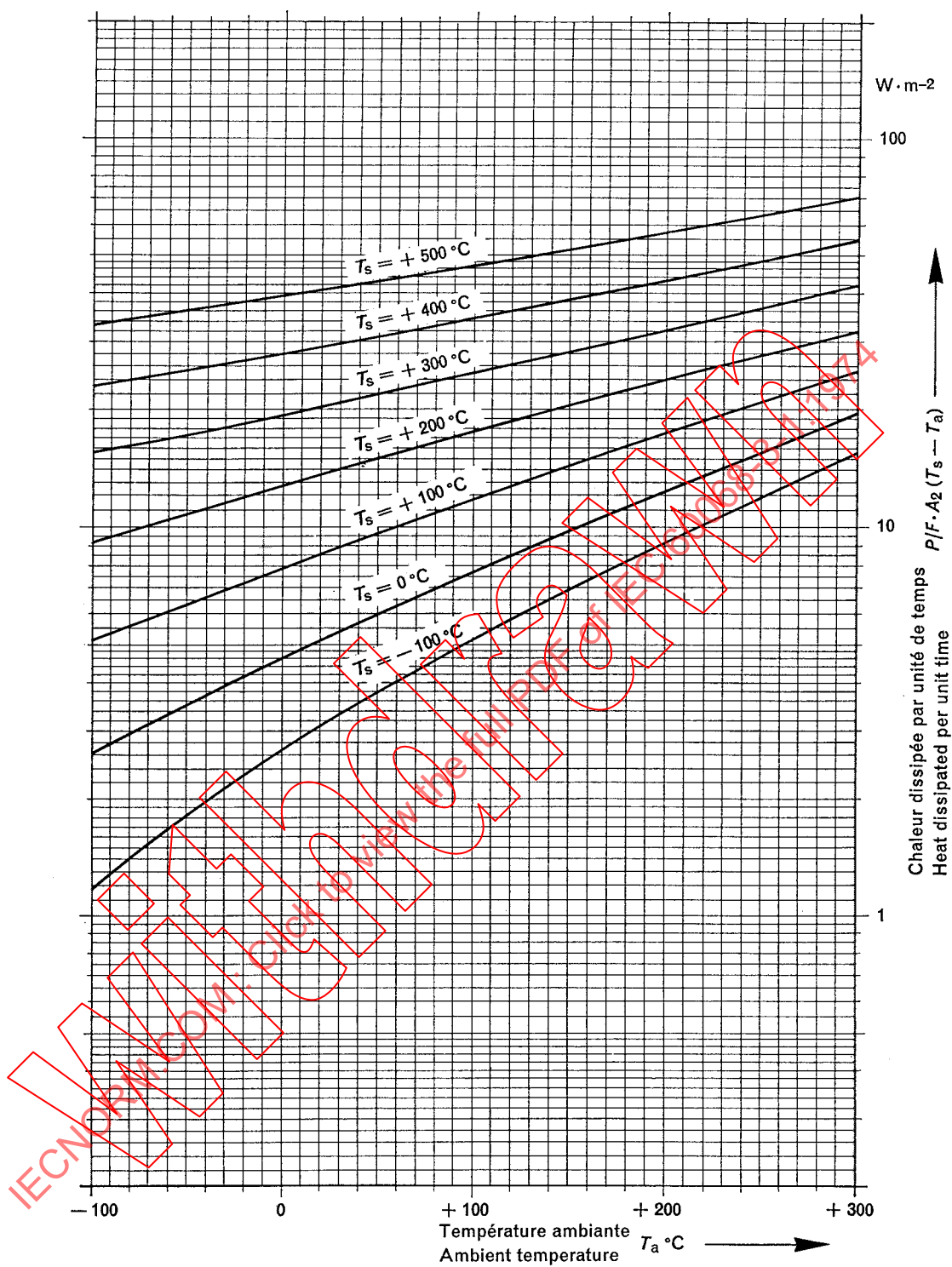
Answer: Since $T_s - T_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, the value of α used in the nomogram of Figure 8, page 35, is closest to the actual value.

In Figure 8 draw a straight line from point + 20 °C on scale T_a to point + 70 °C on scale T_s ; note its intersection with THE PIVOT LINE. Now draw a straight line from point + 55 °C on scale T_a through this intersection point on THE PIVOT LINE and read the new intersection with scale T_s : + 98 °C. This is the required surface temperature.

Note. — The dependence of the overtemperature on the emissivity coefficient ε_2 of the test specimen is shown in Figure 10, page 37, for the case $a = 0.1 \text{ m}$ and $\varepsilon_1 = 1.0$ and the ambient laboratory temperature $T_{a0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Correlation nomograms used in Test A and Test B

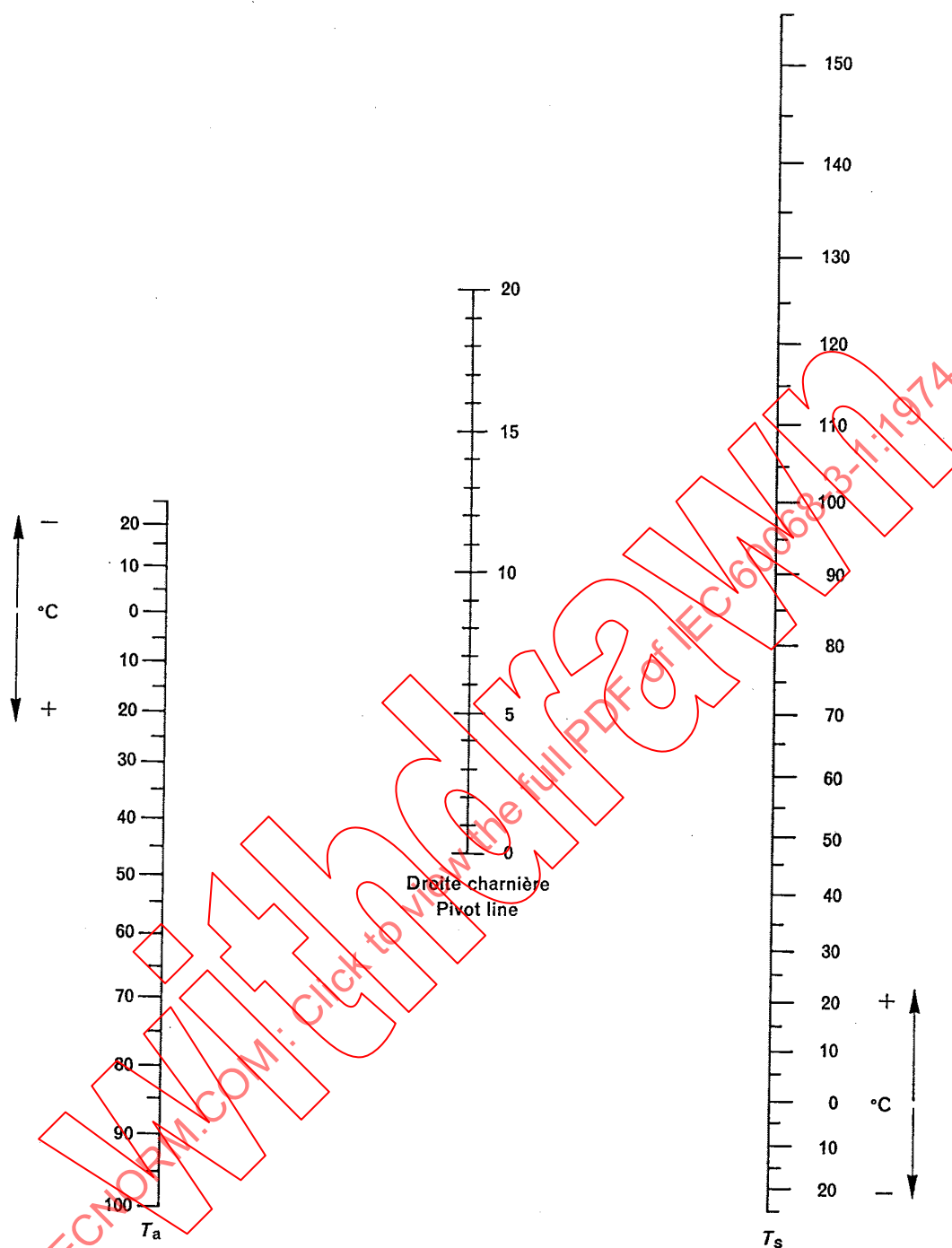
As can be seen by comparing Figures 8 and 9, pages 35 and 36, the resulting overtemperatures depend only slightly on the values of α . Therefore only one nomogram is given in Test A and Test B (based on $\alpha = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).



063/74

FIG. 7. — Relation entre la température de surface T_s du spécimen et la chaleur dissipée P par unité de temps à la température ambiante T_a .

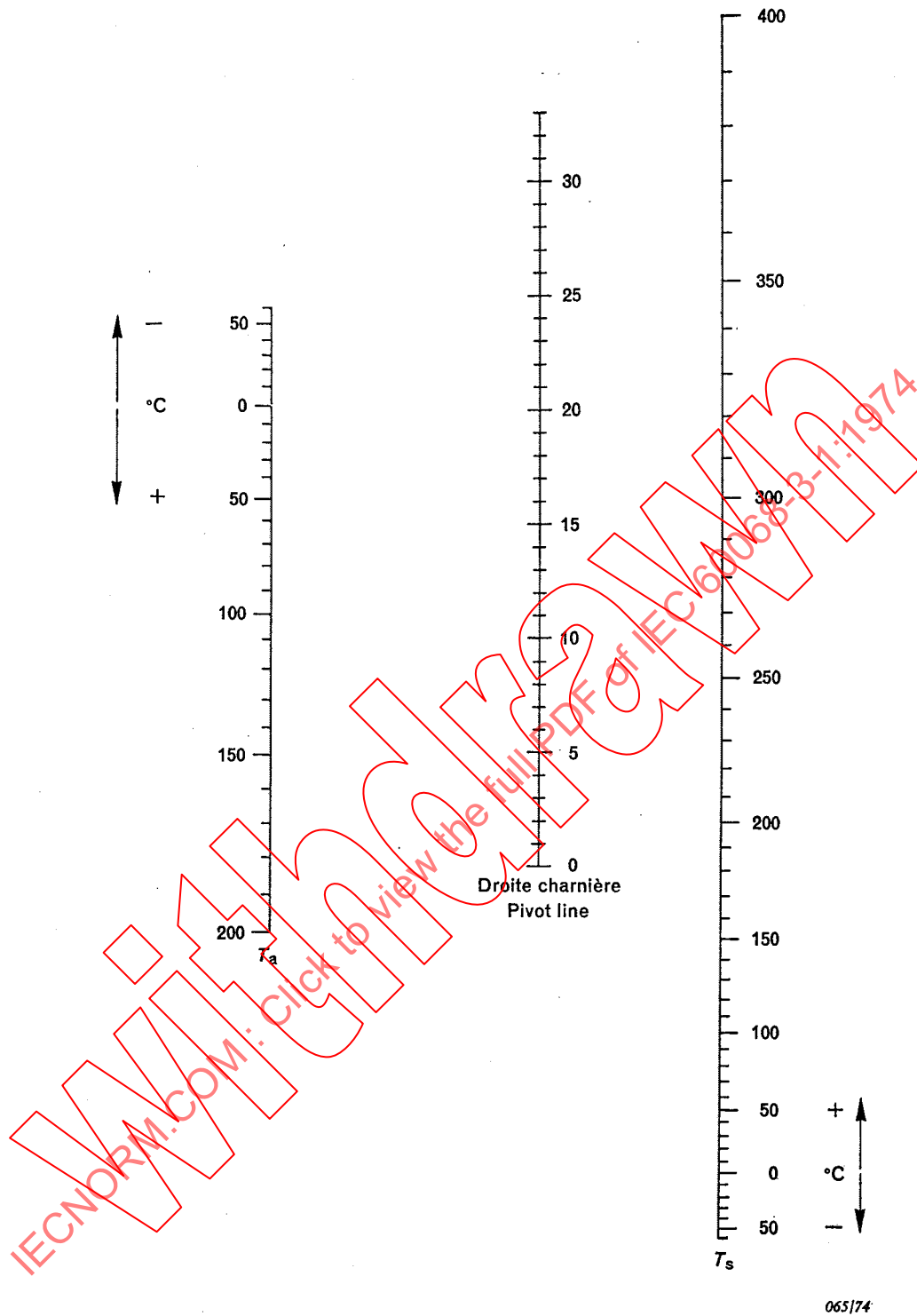
Relationship between the surface temperature T_s of the specimen and the heat dissipated P per unit time at the ambient temperature T_a .



064/74

FIG. 8. — Abaque pour l'évaluation des températures de surface du spécimen T_s à différentes températures ambiantes T_a . Dimension moyenne du spécimen $a = 0,2$ m, pouvoir émissif du spécimen $\varepsilon_2 = 0,7$.

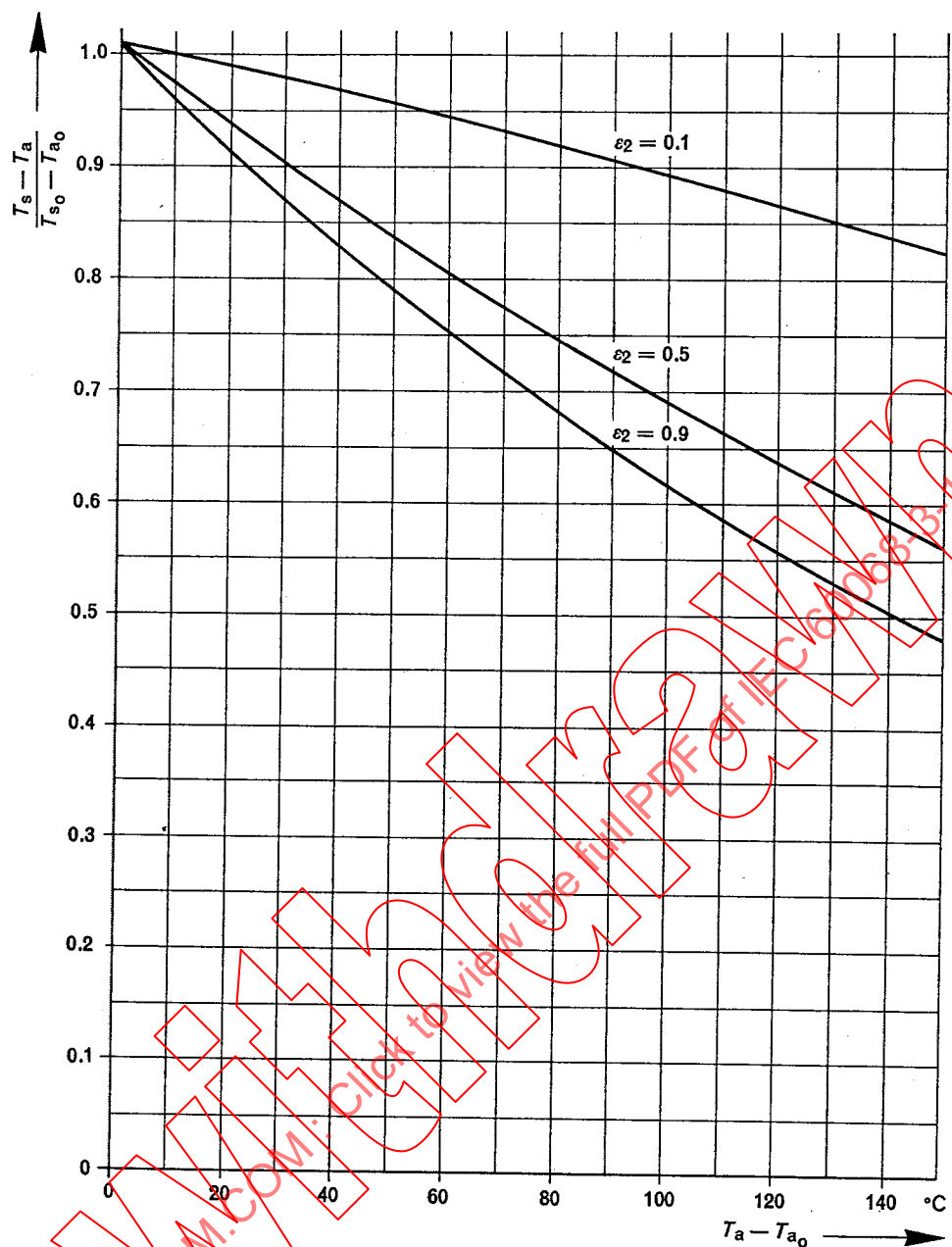
Nomogram for evaluation of surface temperatures of the specimen T_s at different ambient temperatures T_a . Average specimen dimensions $a = 0.2$ m, emissivity coefficient of the specimen $\varepsilon_2 = 0.7$.



065/74

FIG. 9. — Abaque pour l'évaluation des températures de surface du spécimen T_s à différentes températures ambiantes T_a . Dimension moyenne du spécimen $a = 0,05$ m, pouvoir émissif du spécimen $\varepsilon_2 = 0,7$.

Nomogram for evaluation of surface temperatures of the specimen T_s at different ambient temperatures T_a . Average specimen dimension $a = 0.05$ m, emissivity coefficient of the specimen $\varepsilon_2 = 0.7$.



066174

T_{a_0} = température ambiante du laboratoire (+20 °C)
 T_{s_0} = température de surface du spécimen lorsqu'il est soumis à la température ambiante du laboratoire dans des conditions « d'air calme »

Dimension moyenne du spécimen $a = 0,1$ m

T_{a_0} = ambient laboratory temperature (+20 °C)
 T_{s_0} = surface temperature of the specimen when subjected to ambient laboratory temperature in "free air" conditions

Average specimen dimension $a = 0.1$ m

FIG. 10. — Relation entre l'écart de température et le pouvoir émissif ϵ_2 du spécimen.

Relation between overtemperature and emissivity coefficient ϵ_2 of the specimen.

ANNEXE F

CONDUCTIVITÉS THERMIQUES DES MATÉRIAUX USUELS

Ces chiffres, tirés du V.D.I. Wärmeatlas 1956, Ea4 et d'autres sources, ont été convertis en unités S.I. par multiplication par 1,163. La variation de la conduction thermique en fonction de la température est donnée sur le feuillet Ea3 du V.D.I. Wärmeatlas 1956.

TABLEAU II

Matériaux	t °C	Conductivité thermique $W.m^{-1} K^{-1}$
Argent	20	411
Cuivre très pur	20	395
Cuivre commercial	20	372
Or pur	20	311
Aluminium	20	229
Duralumin (Al-Cu)	20	165
Magnésium pur	20	143
Elektron (Ni-St)	20	116
Laiton	20	81-116
Zinc	20	113
Etain	20	66
Fer — forgé, pur	0	59
Fer	200	52
Fer — fonte 3% carbone	20	58
Fer — acier au chrome	20	40
Fer — acier nickel chrome	20	14,5
Nickel	18	59,5
Nickel — argent (Ni-Cu-Zn)	0	29,3
Plomb pur	0	35,1
Graphite — compact	20	12-174
Argile réfractaire	100	0,5-1,2
Béton	20	0,8-1,4
Brique — sèche	20	0,38-0,52
Glace	20	0,76
Marbre	20	2,8
Bakélite	20	0,233
Caoutchouc	20	0,13-0,23
Plexiglas	20	0,184
Celluloïd	20	0,215
Bouleau — coupe en long	20	0,35
Chêne — tranche	20	0,17-0,21
Chêne — coupe en long	—	0,37
Pin — tranche	20	0,14
Pin — coupe en long	—	0,26

APPENDIX F

THERMAL CONDUCTIVITIES OF COMMON MATERIALS

These figures, taken from V.D.I. Wärmeatlas 1956, Ea4 and other sources, have been converted to S.I. units by multiplying by 1.163. The variation in thermal conductivity with temperature is given on sheet Ea3 of the V.D.I. Wärmeatlas 1956.

TABLE II

Material	t °C	Thermal conductivity $W \cdot m^{-1} K^{-1}$
Silver	20	411
Copper — very pure	20	395
Copper — commercial	20	372
Gold — pure	20	311
Aluminium	20	229
Duralumin (Al-Cu)	20	165
Magnesium — pure	20	143
Elektron (Ni-St)	20	116
Brass	20	81-116
Zinc	20	113
Tin	20	66
Iron — wrought, pure	0	59
Iron	200	52
Iron — cast 3% carbon	20	58
Iron — chrome steel	20	40
Iron — nickel chrome steel	20	14.5
Nickel	18	59.5
Nickel — silver (Ni-Cu-Zn)	0	29.3
Lead — pure	0	35.1
Graphite — compact	20	12-174
Fireclay	100	0.5-1.2
Concrete	20	0.8-1.4
Brick — dry	20	0.38-0.52
Plate glass	20	0.76
Marble	20	2.8
Bakelite	20	0.233
Rubber	20	0.13-0.23
Plexiglass	20	0.184
Celluloid	20	0.215
Beechwood — along grain	20	0.35
Oak — cross grain	20	0.17-0.21
Oak — along grain	—	0.37
Pine — cross grain	20	0.14
Pine — along grain	—	0.26

ANNEXE G

MESURE DE LA TEMPÉRATURE

1. Généralités

Le but de cette annexe n'est pas de décrire les instruments normalement utilisés pour mesurer la température de l'air et des liquides, par exemple thermomètres à alcool ou à mercure. Ceux-ci et les précautions à observer dans leur utilisation sont bien connus et décrits dans la littérature technique appropriée.

Les mêmes considérations s'appliquent aux méthodes fondées sur la résistance électrique (en particulier les thermomètres à résistance au platine), aux thermistances et thermocouples utilisés surtout pour la mesure de la température des matériaux solides. La conduction thermique du dispositif de mesure devrait être faible par rapport à celle du spécimen subissant l'essai. En outre, la résistance thermique entre le dispositif de mesure et le spécimen doit être faible et la quantité de chaleur dissipée par les fils de connexion maintenue au minimum. La puissance fournie au dispositif de contact doit être suffisamment faible pour éviter un échauffement trop important de ce dispositif ou du spécimen en essai.

Dans le cas d'un transfert de chaleur entre un spécimen dissipant de l'énergie soumis à l'essai et les parois de la chambre, les températures de surface des matériaux participant à l'échange thermique sont très importantes. Il existe deux méthodes de mesure de la température de surface. Dans l'une de ces méthodes, le matériau de mesure fait contact avec la surface dont la température est à mesurer. Dans l'autre, il n'y a pas de contact entre ces éléments.

Il faudrait préciser que lorsqu'il y a contact avec la surface, celle-ci peut être contaminée par une couche de matériau difficile à enlever. L'utilisation de ces méthodes est donc à proscrire dans certains cas, par exemple pour l'essai d'engins spatiaux.

2. Méthodes utilisant la variation de couleur ou des effets de fusion

Pendant plusieurs années des matériaux ont été utilisés dont la couleur varie avec la température. Certains présentent une variation constante de la couleur à l'intérieur d'une certaine gamme de température, par exemple cristaux liquides; on peut trouver leur température par comparaison avec un tableau de couleurs. D'autres matériaux changent de couleur brusquement à certaines températures, au cours d'une augmentation de la température; ce phénomène étant irréversible lorsque la température décroît ensuite. Ces matériaux sont présentés sous forme de crayons de couleur ou de laques spéciales qui peuvent être appliquées en couche fine sur la surface dont la température est à mesurer. Il existe également des rubans adhésifs utilisés comme indicateurs de température qui changent de couleur lorsque la température s'élève au-dessus d'une valeur déterminée pour le modèle choisi. Dans d'autres cas, le point de fusion d'un matériau est utilisé pour la mesure.

Dans tous les exemples indiqués ci-dessus pour lesquels il se produit un changement brusque de température, il est seulement possible de déterminer qu'une température, celle pour laquelle le changement de couleur s'effectue, a été dépassée; on peut toutefois utiliser un certain nombre de petits échantillons de matériaux avec des gammes de température différentes afin d'obtenir une approximation de la température atteinte.

En général, la précision de la mesure obtenue avec tous les indicateurs donnés ci-dessus dépend d'un certain nombre de facteurs indiqués ci-dessous.

APPENDIX G

MEASUREMENT OF TEMPERATURE

1. General

It is not the purpose of this appendix to describe the normal instruments used for the temperature measurement of air and liquids, e.g. mercury or alcohol thermometers. These and the precautions to be observed in their use are well known and described in the appropriate technical literature.

The same considerations apply to resistance methods (especially platinum resistance thermometers), thermistors and thermocouples mostly used for temperature measurement of solid material. The thermal capacity of the measuring device should be small in comparison with that of the specimen undergoing test. In addition, the thermal resistance between the measuring device and the specimen shall be low and the thermal flux led away by the connecting wires has to be kept to a minimum. The power fed to the sensor shall be low enough to avoid undue self-heating of the sensor or heating of the test specimen.

In the case of heat transfer between a heat-dissipating specimen under test and the walls of the testing chamber, the surface temperatures of the materials participating in the thermal exchange are very important. Two methods of surface temperature measurement are available. In one of these, the measuring material makes contact with the surface, the temperature of which is to be measured. In the other, there is no contact between them.

It should be mentioned that, where there is contact with the surface, the surface may become contaminated with a layer of material which is difficult to remove. The use of such methods is, therefore, not permissible in certain cases, e.g. in testing of space vehicles.

2. Methods using colour changing or melting effects

For many years materials have been used, the colour of which changes with temperature. There are some with a steady colour change within a certain temperature range, as liquid crystals, the attained temperature of which is found by comparison with a colour chart. Other materials change their colour suddenly at certain temperatures when the temperature increases, without reversal of the colour change when the temperature decreases. Such materials are available as colour pencils or special lacquers which can be applied as thin coatings to the surface, the temperature of which is to be measured. There are also self-adhesive tapes used as temperature indicators, which change colour when the temperature rises above the predetermined figure for the type which has been used. In other cases, the melting point of a material is used for the measurement.

In all the above examples, where there is a sudden change, it is possible to determine only an overstepping of the temperature at which the change of colour or state occurs, although it is possible to use a number of small samples with differing temperature ranges in order to achieve an assessment of temperature attained.

In general, the accuracy of the measurement, obtainable with all the indicators referred to above, is governed by a number of factors which are referred to below.

- 2.1 Dans les cas où un changement d'état à une température donnée est utilisé pour indiquer la température, il est nécessaire normalement d'utiliser une série d'indicateurs sensibles à différentes températures. Lorsque l'un de ces indicateurs change, mais que celui immédiatement supérieur dans la série ne change pas, la température de la surface se situe entre les deux températures propres aux deux indicateurs donnés. L'erreur maximale de mesure sera alors égale à la différence entre les deux températures à la condition que les valeurs déterminées de température de seuil ne soient pas modifiées par d'autres effets.
- 2.2 Des erreurs de mesure des indicateurs à variations de couleur peuvent être apportées par le vieillissement. Lorsque ces matériaux sont utilisés pour des essais couvrant de longues périodes à des températures seulement légèrement inférieures à la température de seuil nominale, il peut arriver que la variation de couleur se produise à une température plus basse que celle indiquée.
- 2.3 Les matériaux sensibles à la température peuvent être aussi affectés par la présence de liquides, de vapeurs ou de gaz.
- 2.4 Lorsqu'un rayonnement thermique frappe la surface du spécimen, certaines précautions doivent être prises.
 - 2.4.1 Lorsque l'indicateur couvre une petite portion d'une surface soumise à un rayonnement, il faut s'assurer que l'indicateur ne subit pas lui aussi le rayonnement. Il suffit de le protéger par un matériau réfléchissant.
 - 2.4.2 Lorsque l'indicateur couvre une portion importante de la surface soumise à un rayonnement, le coefficient d'absorption de l'indicateur ne doit pas être très différent de celui de la surface, sinon la température de celle-ci sera perturbée par la présence de l'indicateur.
- 2.5 Lorsque les méthodes ci-dessus sont utilisées dans des conditions de variation de la température, on peut noter que l'indication ne suit pas la vitesse de variation de la température. Il en résulte une sous-estimation de la température réelle pendant la variation.

3. Méthodes utilisant des dispositifs à infrarouge

Une explication des points essentiels du rayonnement infrarouge est donnée dans l'annexe J.

Pour la mesure de la température, le pouvoir émissif de la surface rayonnante doit être connu. Une image à infrarouge déterminée par analyse sera en fait une image de la répartition du rayonnement et non de la température. De meilleurs résultats seront obtenus en utilisant la méthode de comparaison de deux petites surfaces à la même température dont l'une est recouverte d'un matériau dont le pouvoir émissif est connu.

La surface couverte par le dispositif de contact doit être plus petite que la surface dont la température est à mesurer. Il peut donc être nécessaire d'utiliser un microscope à infrarouge lorsque les spécimens sont trop petits pour des détecteurs de rayonnement normaux. Afin d'obtenir une grande précision dans la mesure de la température, il est préférable d'utiliser un instrument qui prélève le rayonnement émis par une petite surface du spécimen en essai.

Il y a lieu de noter que la surface choisie doit être suffisamment plane pour éviter des rayonnements non négligeables dans des directions autres que celle du dispositif de contact. En outre, des précautions doivent être prises pour s'assurer que le rayonnement provenant d'autres sources ne puisse pas atteindre le dispositif de contact directement ou par réflexion sur la surface mesurée.

- 2.1 In those cases where a change of state at a predetermined temperature is used for temperature indication, it is normally necessary to use a series of indicators with differing sensing temperatures. When one of the indicators changes but the one immediately above it in the series does not, the temperature of the surface lies between the sensing temperatures of the two indicators concerned. The maximum error of measurement will then be equal to the difference between these two sensing temperatures, provided that the predetermined sensing temperature values are not changed by other effects.
- 2.2 Measurement errors of colour changing indicators may be brought about by ageing. When such materials are used for testing over long periods of time at temperatures only slightly below the nominal sensing temperature, there is a risk that the colour change will occur at a lower temperature than that indicated.
- 2.3 The temperature sensing material may also be affected by the presence of liquids, vapours or gases.
- 2.4 Where thermal radiation is falling on the surface of the specimen, certain precautions shall be taken.
 - 2.4.1 When the indicator covers a small portion of a surface which is subjected to radiation, care shall be taken to ensure that the indicator is not heated by the radiation. It is sufficient to shield the indicator by covering it with reflecting material.
 - 2.4.2 Where the indicator covers a considerable portion of the surface which is subjected to radiation, the absorption coefficient of the indicator shall not differ appreciably from that of the surface, otherwise the temperature of the surface will be affected by the presence of the indicator.
- 2.5 When using the above methods under conditions of changing temperature, it should be noted that the indication may be slow compared with the rate of change of temperature. This results in an underestimation of the actual temperature during the change.

3. **Methods using infra-red sensors**

An explanation of the essential points of infra-red radiation is given in Appendix J.

In the case of temperature measurement, the emissivity coefficient of the radiating surface must be known. An infra-red picture received by scanning will be, in fact, a picture of the radiation distribution and not of the temperature distribution. Best results will be achieved by the method of comparison of two small areas at the same temperature, one of which is coated with a material of known emissivity coefficient.

The area covered by the sensor shall be smaller than the surface of which the temperature is to be measured. It may, therefore, be necessary to use an infra-red microscope when the specimens to be measured are too small for normal radiation detectors. In order to achieve a high accuracy of temperature measurement, it is better to use an instrument picking up radiation emitted from a small area of the specimen under test.

It should be noted that the area selected shall be sufficiently flat to avoid significant radiation in directions other than that of the sensor. Furthermore, care shall be taken to ensure that radiation from extraneous sources does not reach the sensor directly or by reflection in the measured area.

ANNEXE H

MESURE DE LA VITESSE DE L'AIR

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la vitesse de l'air, en particulier :

1. L'anémomètre à coupelle, l'un des plus anciens instruments, est utilisé principalement en météorologie. Le mouvement des ailettes en croix sous l'effet de la circulation d'air peut être étalonné en fonction de la vitesse de l'air. La gamme possible est très large et il existe dans le commerce plusieurs formats d'anémomètres à coupelle. La vitesse du déplacement d'air dans un petit volume (par exemple à l'intérieur d'une chambre d'essais) peut être mesurée à l'aide d'un petit anémomètre.
2. Le thermomètre Cata est un thermomètre en verre d'un type particulier utilisant l'effet de refroidissement par convection. Le principe consiste à mesurer le temps nécessaire pour refroidir un thermomètre chauffé au préalable, par exemple de 38 °C à 35 °C . Il est utilisable à l'intérieur de la gamme de vitesse approximative $0,05\text{ m.s}^{-1}$ à 10 m.s^{-1} et aux températures comprises entre -10 °C et $+30\text{ °C}$. Néanmoins, étant donné que le thermomètre doit être chauffé à nouveau après chaque mesure, cette méthode n'est pas très pratique.

L'effet de refroidissement par convection est également utilisé dans l'anémomètre à fil thermique et l'anémomètre thermique. Dans les deux cas, une valeur définie de puissance électrique est fournie à l'élément de mesure, le portant ainsi à une température de base prédéterminée. Lorsque l'air circule à travers l'élément, la température de celui-ci décroît; l'amplitude de cette décroissance en température permet de déterminer la vitesse de l'air. Alors que l'élément de mesure à fil thermique consiste en un fil de platine tendu, l'élément de mesure d'un anémomètre thermique est dans de nombreux cas une résistance CTN. Etant donné que l'on peut attendre pour ces éléments des dimensions et une capacité thermique faibles, il est possible d'obtenir une constante de temps thermique peu élevée et donc de mesurer un flux normal très petit. On peut l'utiliser en particulier pour des vitesses de circulation de l'air faibles et il existe dans le commerce des gammes destinées à des températures approximativement comprises entre -30 °C et $+100\text{ °C}$. Dans le cas de l'anémomètre à fil thermique, l'effet de refroidissement dépend de l'angle fait par l'axe du fil et la direction du flux; l'effet de refroidissement étant minimal lorsque le flux d'air est parallèle au fil, on peut déterminer de façon précise la direction du flux en tournant l'anémomètre à fil thermique.

Les méthodes basées sur les anémomètres à coupelle et le thermomètre Cata sont seulement applicables lorsque les chambres sont de dimensions importantes (par exemple des salles); par contre les méthodes fondées sur l'anémomètre thermique ou à fil thermique peuvent être utilisées pour des chambres de petites dimensions.

D'autres méthodes appropriées pour la mesure de la vitesse de l'air dans les chambres climatiques sont décrites dans les ouvrages existant actuellement.

APPENDIX H

MEASUREMENT OF AIR VELOCITY

Several methods of measurement of air velocity are known, among them the following:

1. One of the oldest instruments is the cup anemometer, mostly used in the meteorological field. The motion of the blown cross-arms can be calibrated in terms of wind speed, i.e. air velocity. The available range is very wide and many sizes of cup anemometers are available commercially. By means of a small anemometer, the air velocity can be measured in a small volume, e.g. inside a testing chamber.
2. The Cata thermometer is a special type of glass thermometer which uses the cooling effect by convection. The principle of measurement is the measurement of time needed for cooling the warmed-up thermometer, e.g. from 38 °C to 35 °C. It is usable within the velocity range from approx. 0.05 m.s⁻¹ to 10 m.s⁻¹ and at temperatures from approx. -10 °C to +30 °C. However, due to the fact that the thermometer must be warmed up again after each measurement, this method is cumbersome.

The cooling effect by convection is also used in the hot-wire anemometer and the thermal anemometer. In both cases, a defined amount of electric power is supplied to the measuring element, thus causing it to reach a predetermined standard temperature. When air flows across the element the temperature of the latter decreases. The magnitude of this decrease in temperature enables the air velocity to be determined. While the hot-wire measuring element consists of a free stretched platinum wire, the measuring element of the thermal anemometer is in many cases a NTC resistor. Because of the available small size and small thermal capacity of such elements, a low thermal time constant can be obtained and a very small cross-section of flow can be measured. It is usable especially for low air velocity and is commercially available for use over a temperature range from approx. -30 °C to +100 °C. In the case of the hot-wire anemometer the cooling effect is dependent on the angle between the wire axis and the direction of flow, because the cooling effect is lowest when the airflow is parallel to the wire, the direction of flow can be determined very closely by turning the hot-wire anemometer.

The methods using cup anemometers and the Cata thermometer are applicable only to large (e.g. walk-in) chambers, whilst the methods using a hot-wire or thermal anemometer can be used for small chambers.

Other methods, suitable for the measurement of air velocity in climatic chambers, are described in the generally available literature.

ANNEXE J

MESURE DU POUVOIR ÉMISSIF

1. Introduction

Ainsi que l'indique l'annexe G, le transfert de chaleur par rayonnement entre deux objets dont les températures de surface sont différentes, par exemple entre un spécimen en essai et les parois de la chambre d'essai, dépend de leur émissivité. Aussi les pouvoirs émissifs des surfaces participant à l'échange de rayonnement doivent être connus afin que le comportement des spécimens en fonctionnement puisse être déduit des résultats d'essais. Ceci s'applique particulièrement aux spécimens dissipant de l'énergie.

Cette annexe traite essentiellement des méthodes de mesure du pouvoir émissif qui donnent assez de précision, qui sont pratiques pour des essais climatiques et qui nécessitent un nombre relativement restreint d'appareils de mesure et une durée qui n'est pas trop importante. Des mesures précises du pouvoir émissif, dans des chambres simulant des conditions en espace non clos, demandent des méthodes coûteuses. Lorsqu'un rayonnement solaire est inclus, on doit tenir compte des différentes étendues spectrales du rayonnement dirigé vers l'intérieur comme vers l'extérieur et donc du degré d'absorption du rayonnement. Il est conseillé pour ces méthodes de se reporter aux ouvrages qui s'y rapportent.

2. Théorie du rayonnement

La théorie du rayonnement, indiquée ci-dessous, concerne les méthodes de mesure figurant dans l'article 4 de cette annexe.

La puissance rayonnée M émise dans l'hémisphère par unité de surface d'un corps à une certaine température est liée à la puissance rayonnée correspondante M_s d'un corps noir à la même température par l'expression:

$$M = \varepsilon \cdot M_s$$

M_s est donné par la loi de Stefan-Boltzmann

$$M_s = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

où T est la température en K et σ est la constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

ε représente le « pouvoir émissif total hémisphérique ». La répartition spectrale du rayonnement d'un corps noir à la température T est donnée par la loi de rayonnement de Planck et la longueur d'onde $\lambda_{\max}$ de l'intensité du rayonnement maximal est donnée par la loi du déplacement de Wien

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

En pratique, l'équation (1) est habituellement utilisée dans la forme suivante:

$$M_s = C_s \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

où:

$$C_s = 5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} = 20,4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$$

où: h = temps en heure.

Ainsi, pour un corps:

$$M = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (3)$$

APPENDIX J

MEASUREMENT OF EMISSIVITY COEFFICIENT

1. Introduction

As already indicated in Appendix G, heat transfer by radiation between two bodies at different surface temperatures, e.g. between a specimen under test and the walls of a test chamber, is governed by their emissivities. Thus, the emissivity coefficients of the surfaces participating in the exchange of radiation must be known in order to enable the behaviour of specimens under operational conditions to be assessed from the test results. This applies particularly to heat-dissipating specimens.

This appendix deals mainly with methods of measurement of emissivity coefficient that provide sufficient accuracy and are suitable for practical environmental testing, and also require a comparatively small amount of apparatus and time. Precision measurements as well as emissivity coefficient measurements in outer space simulation chambers call for more expensive methods. When solar irradiation is included the differing spectral ranges of incoming and outgoing radiation, and hence the degree of absorption of the irradiation, must be taken into account. With respect to these methods reference should be made to the relevant literature.

2. Radiation theory

The radiation theory given below relates to the measurement methods of Clause 4 of this appendix.

The radiation power M emitted into the hemisphere from unit surface of a real body at a certain temperature is related to the corresponding radiation power M_s of a black body at the same temperature by the expression:

$$M = \varepsilon \cdot M_s$$

M_s is given by the Stefan-Boltzmann law

$$M_s = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

where T is the temperature in K and σ is Stefan-Boltzmann's constant

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

ε is termed the "hemispherical total emissivity coefficient". The spectral distribution of the radiation of a black body at temperature T is given by Planck's radiation law and the wavelength λ_{max} of the maximum of radiation intensity is given by Wien's displacement law

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2.89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

In practice, equation (1) is usually employed in the following form:

$$M_s = C_s \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

where:

$$C_s = 5.67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} = 20.4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$$

where: h = time in hours.

The following thus holds for a real body:

$$M = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (3)$$