

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC  
1094-2**

Première édition  
First edition  
1992-03

---

---

**Microphones de mesure**

**Partie 2:**

Méthode primaire pour l'étalonnage en pression  
des microphones étalons de laboratoire par  
la méthode de réciprocité

**Measurement microphones**

**Part 2:**

Primary method for pressure calibration of  
laboratory standard microphones by  
the reciprocity technique



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 1094-2: 1992

## Numéros des publications

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60 000.

## 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* (VEI).

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 60 000 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  
1094-2**

Première édition  
First edition  
1992-03

---

---

**Microphones de mesure**

**Partie 2:**

Méthode primaire pour l'étalonnage en pression  
des microphones étalons de laboratoire par  
la méthode de réciprocité

**Measurement microphones**

**Part 2:**

Primary method for pressure calibration of  
laboratory standard microphones by  
the reciprocity technique

© CEI 1992 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

**V**

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

## SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS .....	6
Articles	
1 Domaine d'application .....	8
2 Références normatives .....	8
3 Définitions .....	8
3.1 microphone réciproque .....	8
3.2 argument de l'efficacité en pression d'un microphone .....	8
3.3 impédance électrique de transfert .....	10
3.4 impédance acoustique de transfert .....	10
3.5 coupleur .....	10
4 Conditions ambiantes de référence .....	10
5 Principe de l'étalonnage en pression par réciprocité .....	10
5.1 Principe général .....	10
5.1.1 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones .....	10
5.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire .....	12
5.2 Expressions de base .....	12
5.3 Technique de la tension insérée .....	14
5.4 Evaluation de l'impédance acoustique de transfert .....	14
5.5 Correction de conduction thermique .....	18
5.6 Correction de tube capillaire .....	18
5.7 Expressions finales de l'efficacité en pression .....	20
5.7.1 Méthode utilisant trois microphones .....	20
5.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire .....	20
6 Grandeurs d'influence sur l'efficacité en pression .....	22
6.1 Généralités .....	22
6.2 Tension de polarisation .....	22
6.3 Configuration de référence du blindage .....	22
6.4 Distribution de la pression sur la membrane .....	22
6.5 Influence des conditions d'environnement .....	24
6.5.1 Pression statique .....	24
6.5.2 Température du microphone .....	24
6.5.3 Humidité .....	24
6.5.4 Conditions atmosphériques .....	26
7 Incertitude d'étalonnage .....	26
7.1 Généralités .....	26
7.2 Impédance électrique de transfert .....	26

## CONTENTS

	Page
FOREWORD .....	7
Clause	
1 Scope .....	9
2 Normative references .....	9
3 Definitions .....	9
3.1 reciprocal microphone .....	9
3.2 phase angle of pressure sensitivity of a microphone .....	9
3.3 electrical transfer impedance .....	11
3.4 acoustic transfer impedance .....	11
3.5 coupler .....	11
4 Reference environmental conditions .....	11
5. Principles of pressure calibration by reciprocity .....	11
5.1 General principle .....	11
5.1.1 General principles using three microphones .....	11
5.1.2 General principles using two microphones and an auxiliary sound source .....	13
5.2 Basic expressions .....	13
5.3 Insert voltage technique .....	15
5.4 Evaluation of the acoustic transfer impedance .....	15
5.5 Heat-conduction correction .....	19
5.6 Capillary tube correction .....	19
5.7 Final expressions for the pressure sensitivity .....	21
5.7.1 Method using three microphones .....	21
5.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source .....	21
6 Factors influencing the pressure sensitivity .....	23
6.1 General .....	23
6.2 Polarizing voltage .....	23
6.3 Ground shield reference configuration .....	23
6.4 Pressure distribution over the diaphragm .....	23
6.5 Dependence on environmental conditions .....	25
6.5.1 Static pressure .....	25
6.5.2 Temperature of microphone .....	25
6.5.3 Humidity .....	25
6.5.4 Atmospheric conditions .....	27
7 Calibration uncertainty components .....	27
7.1 General .....	27
7.2 Electrical transfer impedance .....	27

Articles	Pages
7.3 Impédance acoustique de transfert .....	26
7.3.1 Généralités .....	26
7.3.2 Dimensions des coupleurs .....	26
7.3.3 Cavité frontale .....	28
7.3.4 Impédance acoustique .....	30
7.3.5 Grandeurs physiques .....	30
7.3.6 Conditions d'environnement .....	30
7.3.7 Facteurs correctifs .....	30
7.4 Tension de polarisation .....	30
7.5 Incertitude sur le niveau d'efficacité en pression .....	32
ANNEXES	
A Conduction thermique dans une cavité close .....	34
B Impédance acoustique d'un tube capillaire .....	38
C Exemples de coupleurs cylindriques pour l'étalonnage des microphones .....	44
C.1 Coupleurs en ondes planes .....	44
C.2 Coupleurs de grands volumes .....	46
D Influence de l'environnement sur l'efficacité des microphones .....	52
D.1 Généralités .....	52
D.2 Influence de la pression statique .....	52
D.3 Influence de la température .....	54
E Méthodes de détermination des paramètres des microphones .....	58
E.1 Profondeur de la cavité frontale .....	58
E.2 Volume de la cavité frontale et volume équivalent .....	58
E.3 Impédance acoustique du microphone .....	60
F Grandeurs physiques .....	62

Clause	Page
7.3 Acoustic transfer impedance .....	27
7.3.1 General .....	27
7.3.2 Coupler dimensions .....	27
7.3.3 Front cavity .....	29
7.3.4 Acoustic impedance .....	31
7.3.5 Physical quantities .....	31
7.3.6 Environmental conditions .....	31
7.3.7 Correction factors .....	31
7.4 Polarizing voltage .....	31
7.5 Uncertainty on pressure sensitivity level .....	33
ANNEXES	
A Heat conduction in a closed cavity .....	35
B Acoustic impedance of a capillary tube .....	39
C Examples of cylindrical couplers for calibration of microphones .....	45
C.1 Plane-wave couplers .....	45
C.2 Large-volume couplers .....	47
D Environmental influence on the sensitivity of microphones .....	53
D.1 General .....	53
D.2 Dependence on static pressure .....	53
D.3 Dependence on temperature .....	55
E Methods for determining microphone parameters .....	59
E.1 Front cavity depth .....	59
E.2 Front cavity volume and equivalent volume .....	59
E.3 Acoustic impedance of the microphone .....	61
F Physical quantities .....	63

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## MICROPHONES DE MESURE

### Partie 2: Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité

#### AVANT-PROPOS

- 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.

La présente partie de la Norme internationale CEI 1094 a été établie par le Comité d'Etudes n° 29 de la CEI: Electroacoustique.

Le texte de cette partie est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
29(BC)159	29(BC)164

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

Les annexes A et B sont partie intégrante de la présente partie.

Les annexes C, D, E et F sont informatives.



## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## MEASUREMENT MICROPHONES

**Part 2: Primary method for pressure calibration  
of laboratory standard microphones  
by the reciprocity technique**

## FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

This part of International Standard IEC 1094 has been prepared by IEC Technical Committee No. 29: Electroacoustics.

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

DIS	Report on Voting
29(CO)159	29(CO)164

Full information on the voting for the approval of this part can be found in the Voting Report indicated in the above table.

Annexes A and B form an integral part of this standard.

Annexes C, D, E and F are for information only.

## MICROPHONES DE MESURE

### Partie 2: Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 1094

- est applicable aux microphones étalons de laboratoire répondant aux prescriptions de la CEI 1094-1 et aux autres types de microphones à condensateur présentant les mêmes dimensions mécaniques;

- spécifie une méthode primaire de détermination de l'efficacité en pression de manière à établir une base reproductible et exacte pour la mesure de la pression acoustique.

#### 2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 1094. Au moment de la publication de cette partie, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 1094 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des normes internationales en vigueur:

CEI 27-2: 1972, *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique - Deuxième partie : Télécommunications et électronique.*

CEI 1094-1: 1992, *Microphones de mesure - Partie 1: Spécifications des microphones étalons de laboratoire.*

#### 3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 1094, les définitions suivantes s'appliquent en plus des définitions données dans la CEI 1094-1:

**3.1 microphone réciproque:** Microphone linéaire passif pour lequel l'impédance de transfert inverse, entrée en circuit ouvert et l'impédance de transfert direct, sortie en circuit ouvert (voir 206 de la CEI 27-2) sont égales en valeur absolue.

**3.2 argument de l'efficacité en pression d'un microphone:** Pour une fréquence donnée, angle de phase entre la tension à circuit ouvert et la pression acoustique uniforme agissant sur la membrane.

Unité: degré ou radian (° ou rad).

## MEASUREMENT MICROPHONES

### Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique

#### 1 Scope

This part of IEC 1094

- is applicable to laboratory standard microphones meeting the requirements of IEC 1094-1 and other types of condenser microphones having the same mechanical dimensions;
- specifies a primary method of determining the pressure sensitivity so as to establish a reproducible and accurate basis for the measurement of sound pressure.

#### 2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 1094. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 1094 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents listed below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 27: 1972, *Letter symbols to be used in electrical technology - Part 2: Telecommunications and electronics*.

IEC 1094-1: 1991, *Measurement microphones - Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*.

#### 3 Definitions

For the purpose of this part of IEC 1094, the following definitions apply in addition to the definitions given in IEC 1094-1.

**3.1 reciprocal microphone:** A linear passive microphone for which the open-circuit reverse and forward transfer impedances (see 206 in IEC 27-2) are equal in magnitude.

**3.2 phase angle of pressure sensitivity of a microphone:** For a given frequency, the phase angle between the open-circuit voltage and the uniform sound pressure acting on the diaphragm.

Unit: degree or radian ( $^{\circ}$  or rad).

**3.3 impédance électrique de transfert:** Pour un système formé de deux microphones couplés acoustiquement, quotient de la tension à circuit ouvert du microphone utilisé en récepteur par le courant traversant le microphone utilisé en émetteur.

Unité: ohm ( $\Omega$ ).

NOTE - Cette impédance est définie pour la configuration de référence du blindage donnée en 7.2 de la CEI 1094-1.

**3.4 impédance acoustique de transfert:** Pour un système formé de deux microphones couplés acoustiquement, quotient de la pression acoustique agissant sur la membrane du microphone utilisé en récepteur par le flux de vitesse en court-circuit produit par le microphone utilisé en émetteur.

Unité: pascal·seconde par mètre cube ( $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ ).

**3.5 coupleur:** Dispositif qui, adapté aux microphones, constitue une cavité de forme et dimensions déterminées agissant comme élément de couplage acoustique entre les deux microphones.

## 4 Conditions ambiantes de référence

Les conditions ambiantes de référence sont:

Température:	$t_r$	= 23,0 °C
Pression statique:	$p_{s,r}$	= 101,325 kPa
Taux d'humidité relative:	$H_r$	≈ 50 %

NOTE - La température de référence est choisie égale à 23,0 °C en raison de considérations pratiques qui entraînent que la plupart des étalonnages sont effectués à cette température ou à son voisinage.

## 5 Principe de l'étalonnage en pression par réciprocité

### 5.1 Principe général

Un étalonnage de microphones par réciprocité peut être effectué au moyen de trois microphones, deux d'entre eux devant être réciproques, ou au moyen d'une source sonore auxiliaire et de deux microphones, l'un d'eux devant être réciproque.

NOTE - Si l'un des microphones n'est pas réciproque, il ne peut être utilisé que comme récepteur acoustique.

#### 5.1.1 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones

Considérons deux microphones couplés acoustiquement au moyen d'un coupleur. En utilisant l'un d'entre eux comme source sonore et l'autre comme récepteur, on mesure l'impédance électrique de transfert. Quand l'impédance acoustique de transfert du système est connue, le produit des efficacités en pression des deux microphones couplés peut être déterminé. En effectuant des combinaisons des microphones (1), (2) et (3) deux à deux, on obtient trois produits mutuellement indépendants, à partir desquels on peut déduire l'expression de l'efficacité en pression pour chacun des trois microphones.

**3.3 electrical transfer impedance:** For a system of two acoustically coupled microphones the quotient of the open-circuit voltage of the microphone used as a receiver by the input current through the electrical terminals of the microphone used as a transmitter.

Unit: ohm ( $\Omega$ ).

NOTE - This impedance is defined for the ground-shield configuration given in 7.2 of IEC 1094-1.

**3.4 acoustic transfer impedance:** For a system of two acoustically coupled microphones the quotient of the sound pressure acting on the diaphragm of the microphone used as a receiver by the short-circuit volume velocity produced by the microphone used as a transmitter.

Unit: pascal · second per cubic metre ( $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ ).

**3.5 coupler:** A device which, when fitted with microphones, forms a cavity of predetermined shape and dimensions acting as an acoustic coupling element between the microphones.

## 4 Reference environmental conditions

The reference environmental conditions are:

Temperature:	$t_r$	= 23,0 °C
Static pressure:	$p_{s,r}$	= 101,325 kPa
Relative humidity:	$H_r$	= 50 %

NOTE - The reference temperature is chosen to be 23,0 °C because practical considerations require that most calibrations be carried out at, or near, this temperature.

## 5 Principles of pressure calibration by reciprocity

### 5.1 General principle

A reciprocity calibration of microphones may be carried out by means of three microphones, two of which shall be reciprocal, or by means of an auxiliary sound source and two microphones, one of which must be reciprocal.

NOTE - If one of the microphones is not reciprocal it can only be used as a sound receiver.

#### 5.1.1 General principles using three microphones

Let two of the microphones be connected acoustically by a coupler. Using one of them as a sound source and the other as a sound receiver, the electrical transfer impedance is measured. When the acoustic transfer impedance of the system is known, the product of the pressure sensitivities of the two coupled microphones can be determined. Using pair-wise combinations of microphones (1), (2) and (3), three such mutually independent products are available, from which an expression for the pressure sensitivity of each of the three microphones can be derived.

### 5.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire

Dans un premier temps, les deux microphones sont couplés acoustiquement par un coupleur et le produit des efficacités en pression des deux microphones est déterminé (voir 5.1.1). Ensuite, les deux microphones sont soumis à la même pression acoustique produite par la source sonore auxiliaire. Le rapport des deux tensions de sortie est alors égal au rapport des efficacités en pression. Ainsi, à partir du produit et du rapport des efficacités en pression des deux microphones, on peut déduire une expression de l'efficacité en pression de chacun d'eux.

NOTE - Pour obtenir le rapport des efficacités en pression, une méthode de comparaison directe peut être utilisée et la source sonore auxiliaire peut être un troisième microphone de caractéristiques mécanique ou acoustique différentes de celles des microphones étalonnés.

### 5.2 Expressions de base

Les microphones étalons de laboratoire et les microphones similaires sont considérés comme réciproques. Dans ces conditions, les équations du réseau électroacoustique à deux accès formé par les microphones peuvent s'écrire sous la forme:

$$\begin{aligned} z_{11} i + z_{12} q &= U \\ z_{21} i + z_{22} q &= p \end{aligned} \quad (1)$$

où

$p$  est la pression acoustique uniformément appliquée aux bornes acoustiques (membrane) du microphone;

$U$  est la tension aux bornes électriques du microphone;

$q$  est le flux de vitesse à travers les bornes acoustiques (membrane) du microphone;

$i$  est le courant à travers les bornes électriques du microphone;

$z_{11} = Z_e$  est l'impédance électrique du microphone quand la membrane est bloquée;

$z_{22} = Z_a$  est l'impédance acoustique du microphone quand il n'est pas chargé électriquement;

$z_{12} = z_{21} = \underline{M_p} \underline{Z_a}$  est égale aux impédances de transferts inverse et directe,  $\underline{M_p}$  étant l'efficacité en pression du microphone.

Les équations (1) peuvent être réécrites sous la forme:

$$\begin{aligned} Z_e i + \underline{M_p} Z_a q &= U \\ \underline{M_p} Z_a i + Z_a q &= p \end{aligned} \quad (1a)$$

qui constituent les équations de réciprocité du microphone.

On couple acoustiquement à l'aide d'un coupleur les microphones (1) et (2) dont les efficacités en pression sont  $\underline{M_{p,1}}$  et  $\underline{M_{p,2}}$ . A partir des équations (1a) on voit qu'un courant  $i_1$  traversant le microphone (1) produit un flux de vitesse en court-circuit acoustique ( $p=0$  sur la membrane) égal à  $\underline{M_{p,1}} i_1$  et donc une pression acoustique  $p_2 = \underline{Z_{a,12}} \underline{M_{p,1}} i_1$  aux bornes acoustiques du microphone (2), où  $\underline{Z_{a,12}}$  est l'impédance acoustique de transfert du système.



### 5.1.2 General principles using two microphones and an auxiliary sound source

First, let the two microphones be connected acoustically by a coupler, and the product of the pressure sensitivities of the two microphones be determined, see 5.1.1. Next, let the two microphones be presented to the same sound pressure, set up by the auxiliary sound source. The ratio of the two output voltages will then equal the ratio of the two pressure sensitivities. Thus, from the product and the ratio of the pressure sensitivities of the two microphones, an expression for the pressure sensitivity of each of the two microphones can be derived.

NOTE - In order to obtain the ratio of pressure sensitivities, a direct comparison method may be used, and the auxiliary sound source may be a third microphone having mechanical or acoustical characteristics which differ from those of the microphones being calibrated.

### 5.2 Basic expressions

Laboratory standard microphones and similar microphones are considered reciprocal and thus the two-port equations of the microphones can be written as:

$$\begin{aligned} z_{11} i + z_{12} q &= \underline{U} \\ z_{21} i + z_{22} q &= p \end{aligned} \quad (1)$$

where

$p$  is the sound pressure, uniformly applied, at the acoustical terminals (diaphragm) of the microphone;

$\underline{U}$  is the signal voltage at the electrical terminals of the microphone;

$q$  is the volume velocity through the acoustical terminals (diaphragm) of the microphone;

$i$  is the current through the electrical terminals of the microphone;

$z_{11} = \underline{Z}_e$  is the electrical impedance of the microphone when the diaphragm is blocked;

$z_{22} = \underline{Z}_a$  is the acoustic impedance of the microphone when the electrical terminals are unloaded;

$z_{12} = z_{21} = \underline{M}_p \underline{Z}_a$  is equal to the reverse and forward transfer impedances,  $\underline{M}_p$  being the pressure sensitivity of the microphone.

Equations (1) may then be rewritten as:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e i + \underline{M}_p \underline{Z}_a q &= \underline{U} \\ \underline{M}_p \underline{Z}_a i + \underline{Z}_a q &= p \end{aligned} \quad (1a)$$

which constitute the equations of reciprocity for the microphone.

Let microphones (1) and (2) with the pressure sensitivities  $\underline{M}_{p,1}$  and  $\underline{M}_{p,2}$  be connected acoustically by a coupler. From equations (1a) it is seen that a current  $i_1$  through the electrical terminals of microphone (1) will produce a short-circuit volume velocity ( $p=0$  at the diaphragm) of  $\underline{M}_{p,1} i_1$  and thus a sound pressure  $p_2 = \underline{Z}_{a,12} \underline{M}_{p,1} i_1$  at the acoustical terminals of microphone (2), where  $\underline{Z}_{a,12}$  is the acoustic transfer impedance of the system.

La tension à circuit ouvert du microphone (2) sera alors:

$$U_2 = M_{p,2} p_2 = M_{p,1} M_{p,2} Z_{a,12} i_1$$

Ainsi le produit des efficacités en pression est donné par:

$$\frac{M_{p,1}}{Z_{a,12}} \frac{M_{p,2}}{i_1} = \frac{1}{Z_{a,12}} \frac{U_2}{i_1} \quad (2)$$

### 5.3 Technique de la tension insérée

La technique de la tension insérée est utilisée pour déterminer la tension à circuit ouvert d'un microphone quand il est chargé électriquement.

Considérons un microphone ayant une tension à circuit ouvert et une impédance interne données, fermé sur une impédance de charge. Pour mesurer sa tension à circuit ouvert, une impédance, petite par rapport à l'impédance de charge, est connectée en série avec le microphone et une tension d'étalonnage est appliquée à ses bornes.

On applique alternativement la tension d'étalonnage et une pression acoustique de même fréquence. On ajuste la tension d'étalonnage de façon qu'elle produise la même chute de tension aux bornes de l'impédance de charge que la pression acoustique, la tension à circuit ouvert est alors égale en module à la tension d'étalonnage.

### 5.4 Evaluation de l'impédance acoustique de transfert

L'impédance acoustique de transfert  $Z_{a,12} = p_2 / (M_{p,1} i_1)$  peut être évaluée à partir du circuit équivalent de la figure 1 où  $Z_{a,1}$  et  $Z_{a,2}$  sont respectivement les impédances acoustiques des microphones (1) et (2).

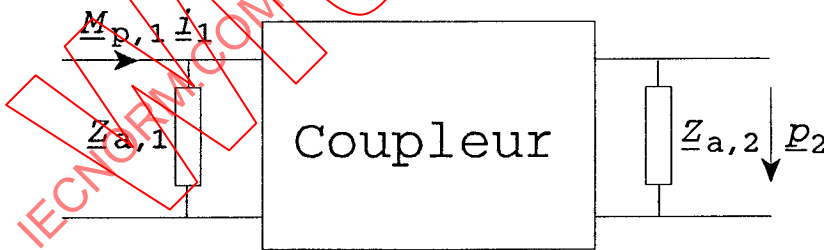


Figure 1 - Circuit équivalent pour évaluer l'impédance acoustique de transfert  $Z_{a,12}$

Dans plusieurs cas,  $Z_{a,12}$  peut être évaluée théoriquement. Supposons que la pression acoustique soit la même en n'importe quel point de la cavité (cela est réalisé lorsque les dimensions mécaniques du coupleur sont très petites par rapport à la longueur d'onde). Le gaz dans le coupleur se comporte comme une élasticité pure et, à partir du circuit équivalent de la figure 2,  $Z_{a,12}$  est donné par  $Z_{a,12}$  (en supposant une compression et une expansion adiabatique du gaz):



The open-circuit voltage of microphone (2) will then be:

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{p,2} p_2 = \underline{M}_{p,1} \underline{M}_{p,2} \underline{Z}_{a,12} i_1$$

Thus the product of the pressure sensitivities is given by:

$$\underline{M}_{p,1} \underline{M}_{p,2} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,12}} \frac{\underline{U}_2}{i_1} \quad (2)$$

### 5.3 Insert voltage technique

The insert voltage technique is used to determine the open-circuit voltage of a microphone when it is electrically loaded.

Let a microphone having a certain open-circuit voltage and internal impedance be connected to a load impedance. To measure the open-circuit voltage, an impedance, small compared to the load impedance, is connected in series to the microphone and a calibrating voltage applied across it.

Let a sound pressure and a calibrating voltage of the same frequency be applied alternately. When the calibrating voltage is adjusted until it gives the same voltage drop across the load impedance as results from the sound pressure on the microphone, the open-circuit voltage will be equal in magnitude to the calibrating voltage.

### 5.4 Evaluation of the acoustic transfer impedance

The acoustic transfer impedance  $\underline{Z}_{a,12} = p_2 / (\underline{M}_{p,1} i_1)$  can be evaluated from the equivalent circuit in figure 1, where  $\underline{Z}_{a,1}$  and  $\underline{Z}_{a,2}$  are the acoustic impedances of microphones (1) and (2) respectively.

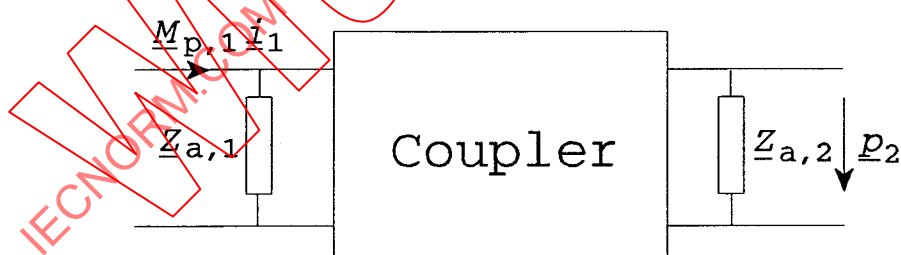


Figure 1 - Equivalent circuit for evaluating the acoustic transfer impedance  $\underline{Z}_{a,12}$

In several cases,  $\underline{Z}_{a,12}$  can be evaluated theoretically. Assume the sound pressure to be the same at any point inside the coupler (this will take place when the physical dimensions of the coupler are very small compared to the wavelength). The gas in the coupler then behaves as a pure compliance and, from the equivalent circuit in figure 2,  $\underline{Z}_{a,12}$  is given by  $\underline{Z}'_{a,12}$  (assuming adiabatic compression and expansion of the gas):

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,V}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}} = j\omega \left( \frac{V}{\kappa p_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_r p_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_r p_{s,r}} \right) \quad (3)$$

où

$V$  est le volume géométrique total du coupleur,  $m^3$ ;

$V_{e,1}$  est le volume équivalent du microphone (1),  $m^3$ ;

$V_{e,2}$  est le volume équivalent du microphone (2),  $m^3$ ;

$Z_{a,V} = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$  est l'impédance acoustique du gaz à l'intérieur du coupleur,  $Pa \cdot s/m^3$ ;

$\omega$  est la pulsation,  $rad/s$ ;

$p_s$  est la pression statique,  $Pa$ ;

$\kappa$  est le rapport des capacités thermiques massiques dans les conditions de mesure;

$\kappa_r$  est la valeur de  $\kappa$  dans les conditions de référence.

Des valeurs de  $\kappa$  et  $\kappa_r$  peuvent être déduites des équations données dans l'annexe F.

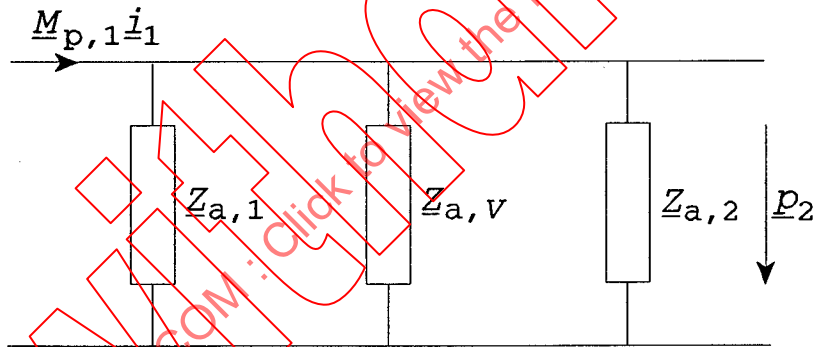


Figure 2 - Circuit équivalent pour évaluer  $Z_{a,12}$  quand les dimensions du coupleur sont petites par rapport à la longueur d'onde

Aux fréquences plus élevées, lorsque les dimensions ne sont plus suffisamment petites par rapport à la longueur d'onde, l'évaluation de  $Z_{a,12}$  devient en général complexe. Toutefois, si le coupleur est de forme cylindrique et possède un diamètre égal à celui des membranes, on peut alors, aux fréquences où l'on peut admettre l'existence d'une transmission en ondes planes, considérer le système complet comme ligne de transmission homogène (voir figure 3);  $Z_{a,12}$  est donné par  $Z_{a,12}$  (en supposant une compression et une expansion adiabatique du gaz):

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,0}} \left[ \left( \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \cosh \gamma l_0 + \left( 1 + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \sinh \gamma l_0 \right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{\underline{Z}'_{a,12}} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,V}} + \frac{1}{\underline{Z}_{a,1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{a,2}} = j\omega \left( \frac{V}{\kappa p_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_r p_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_r p_{s,r}} \right) \quad (3)$$

where

$V$  is the total geometrical volume of the coupler,  $\text{m}^3$ ;

$V_{e,1}$  is the equivalent volume of microphone (1),  $\text{m}^3$ ;

$V_{e,2}$  is the equivalent volume of microphone (2),  $\text{m}^3$ ;

$\underline{Z}_{a,V} = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$  is the acoustic impedance of the gas enclosed in the coupler,  $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ ;

$\omega$  is the angular frequency,  $\text{rad/s}$ ;

$p_s$  is the static pressure,  $\text{Pa}$ ;

$\kappa$  is the ratio of the specific heat capacities at measurement conditions;

$\kappa_r$  is  $\kappa$  at reference conditions.

Values for  $\kappa$  and  $\kappa_r$  can be derived from equations given in annex F.

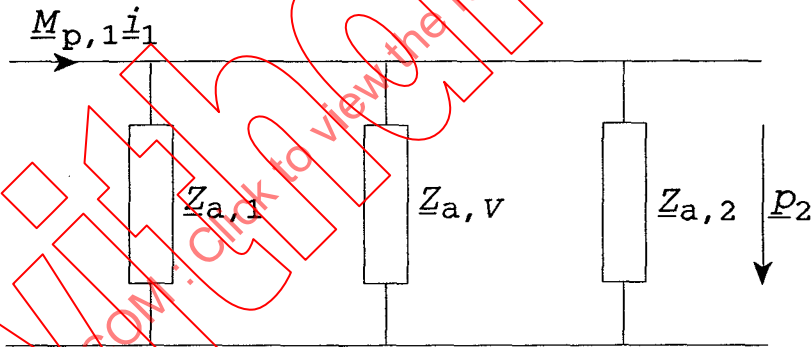


Figure 2 - Equivalent circuit for evaluating  $\underline{Z}'_{a,12}$  when coupler dimensions are small compared with wavelength

At higher frequencies, when the dimensions are not sufficiently small compared with the wavelength, the evaluation of  $\underline{Z}_{a,12}$  generally becomes complicated. However, if the shape of the coupler is cylindrical and the diameter the same as that of the microphone diaphragms, then, at frequencies where planewave transmission can be assumed, the whole system can be considered as a homogeneous transmission line (see figure 3);  $\underline{Z}_{a,12}$  is then given by  $\underline{Z}'_{a,12}$  (assuming adiabatic compression and expansion of the gas):

$$\frac{1}{\underline{Z}'_{a,12}} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,0}} \left[ \left( \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}} + \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,2}} \right) \cosh \gamma \ell_0 + \left( 1 + \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}} \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,2}} \right) \sinh \gamma \ell_0 \right] \quad (4)$$

où

$$Z_{a,0} = \rho c / S_0$$

$\rho$  est la masse volumique du gaz à l'intérieur du coupleur, kg/m<sup>3</sup>;

$c$  est la célérité du son en espace libre dans le gaz, m/s;

$S_0$  est l'aire de la section droite du coupleur, m<sup>2</sup>;

$\ell_0$  est la longueur du coupleur, c'est-à-dire la distance entre les deux membranes, m;

$\gamma = \alpha + j\beta$  est la constante de propagation complexe, m<sup>-1</sup>.

Quand on utilise l'équation (4), on peut obtenir une valeur approchée de  $\gamma$  en faisant  $\alpha = 0$  et  $\beta = \omega/c$ .

Il y a lieu de tenir compte de tout volume d'air associé aux microphones qui n'est pas compris dans le volume limité par les parois du coupleur et les membranes (voir 7.3.3).

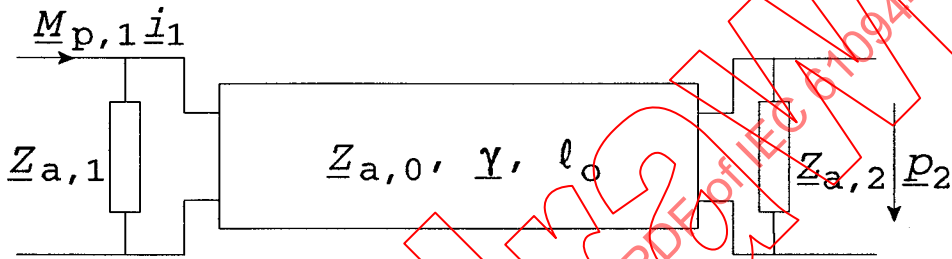


Figure 3 - Circuit équivalent pour évaluer  $Z_{a,12}$  quand on suppose une transmission en ondes planes dans le coupleur

### 5.5 Correction de conduction thermique

L'évaluation de  $Z_{a,12}$  au paragraphe précédent suppose un comportement adiabatique dans le coupleur. Cependant, dans la pratique, l'influence de la conduction thermique au niveau des parois du coupleur entraîne des écarts par rapport aux conditions purement adiabatiques, spécialement pour les coupleurs de petites dimensions et aux fréquences basses. Pour un coupleur de forme simple et avec l'hypothèse que les parois restent à température constante, l'influence des pertes par conduction thermique peut être calculée et exprimée sous forme d'un facteur correctif complexe  $\Delta_H$  appliqué au volume géométrique  $V$  dans l'équation (3) ou à l'aire de la section droite  $S_0$  dans l'équation (4).

Des expressions de calcul du facteur correctif  $\Delta_H$  sont données dans l'annexe A.

### 5.6 Correction de tube capillaire

Le coupleur est généralement muni de tubes capillaires destinés à l'égalisation des pressions statiques entre l'intérieur et l'extérieur du coupleur. Deux tubes capillaires permettent également l'introduction d'un gaz autre que l'air.

L'impédance acoustique à l'entrée d'un tube capillaire ouvert est donnée par:

$$Z_{a,C} = Z_{a,t} \tanh \gamma \ell_C \quad (5)$$

where

$$\underline{Z}_{a,o} = \rho c / S_o$$

$\rho$  is the density of the gas enclosed, kg/m<sup>3</sup>;

$c$  is the free-space speed of sound in the gas, m/s;

$S_o$  is the cross-sectional area of the coupler, m<sup>2</sup>;

$\ell_o$  is the length of the coupler, i.e. the distance between the two diaphragms, m;

$\gamma = \alpha + j\beta$  is the complex propagation coefficient, m<sup>-1</sup>.

When used in equation (4),  $\gamma$  may be approximated by putting  $\alpha$  equal to zero and  $\beta$  equal to  $\omega/c$ .

Allowance shall be made for any air volume associated with the microphones that is not enclosed by the circumference of the coupler and the two diaphragms (see 7.3.3).

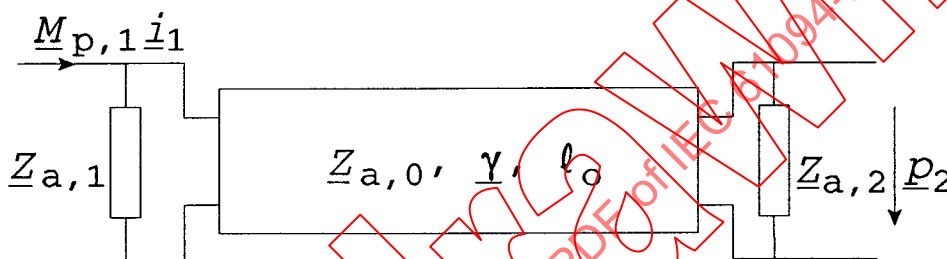


Figure 3 - Equivalent circuit for evaluating  $\underline{Z}_{a,12}$ , when plane wave transmission in the coupler can be assumed

### 5.5 Heat-conduction correction

The evaluation of  $\underline{Z}_{a,12}$  in the preceding clause assumes adiabatic conditions in the coupler. However, in practice, the influence of heat conduction at the walls of the coupler causes departure from purely adiabatic conditions, especially for small couplers and low frequencies. For a coupler of simple shape and under the assumption that the walls remain at a constant temperature, the influence of the heat conduction losses can be calculated and expressed in terms of a complex correction factor  $\Delta_H$  to the geometrical volume  $V$  in equation (3) or to the cross-sectional area  $S_o$  in equation (4).

Expressions for the correction factor  $\Delta_H$  are given in annex A.

### 5.6 Capillary tube correction

The coupler is usually fitted with capillary tubes in order to equalize the static pressure inside and outside the coupler. Two such capillary tubes also permit the introduction of a gas other than air.

The acoustic input impedance of an open capillary tube is given by:

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t} \tanh \gamma \ell_C \quad (5)$$

où  
 $Z_{a,t}$  est l'impédance acoustique complexe d'un tube infini, Pa·s/m<sup>3</sup>;  
 $\ell_C$  est la longueur du tube, m.

L'effet de shunt des tubes capillaires peut être pris en compte en introduisant un facteur correctif complexe  $\Delta_C$  appliqué aux impédances acoustiques de transfert données par les équations (3) et (4)

$$\Delta_{C,12} = 1 + n \frac{Z''_{a,12}}{Z_{a,C}} \quad (6)$$

où  
 $n$  est le nombre de tubes capillaires identiques utilisés;  
 $Z''_{a,12}$  est l'impédance acoustique de transfert  $Z_{a,12}$  corrigée de la conduction thermique conformément au paragraphe 5.5.

Une expression de l'impédance acoustique d'entrée  $Z_{a,C}$  d'un tube capillaire ouvert est donnée dans l'annexe B.

## 5.7 Expressions finales de l'efficacité en pression

### 5.7.1 Méthode utilisant trois microphones

L'impédance électrique de transfert  $U_2/i_1$  (voir 5.2) est notée  $Z_{e,12}$  avec des expressions similaires pour les autres couples de microphones.  
 En tenant compte des corrections données en 5.5 et 5.6, l'expression finale de l'efficacité en pression du microphone (1) est:

$$|M_{p,1}| = \left\{ \left| \frac{Z_{e,12} Z_{e,31}}{Z_{e,23}} \right| \left| \frac{Z'_{a,23}}{Z'_{a,12} Z'_{a,31}} \right| \left| \frac{\Delta_{C,12} \Delta_{C,31}}{\Delta_{C,23}} \right| \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Des expressions similaires s'appliquent aux microphones (2) et (3).

L'argument de l'efficacité en pression de chaque microphone est déterminé par une procédure similaire à partir de l'argument de chaque terme de l'expression ci-dessus.

### 5.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire

Si seulement deux microphones et une source sonore auxiliaire sont utilisés, l'expression finale de l'efficacité en pression est:

$$|M_{p,1}| = \left\{ \left| \frac{M_{p,1}}{M_{p,2}} \frac{Z_{e,12}}{Z'_{a,12}} \Delta_C \right| \right\}^{1/2} \quad (8)$$

où le rapport des deux efficacités en pression est mesuré par comparaison à la source auxiliaire, voir 5.1.2.

where

$Z_{a,t}$  is the complex acoustic wave impedance of an infinite tube, Pa·s/m<sup>3</sup>;  
 $l_C$  is the length of the tube, m.

The shunting effect of the capillary tubes can be taken into account by introducing a complex correction factor  $\Delta_C$  to the acoustic transfer impedances given in equations (3) and (4):

$$\Delta_{C,12} = 1 + n \frac{Z''_{a,12}}{Z_{a,C}} \quad (6)$$

where

$n$  is the number of identical capillary tubes used;  
 $Z''_{a,12}$  is the acoustic transfer impedance  $Z'_{a,12}$  corrected for heat conduction according to 5.5.

An expression for the acoustic input impedance  $Z_{a,C}$  of an open capillary tube is given in annex B.

## 5.7 Final expressions for the pressure sensitivity

### 5.7.1 Method using three microphones

Let the electrical transfer impedance  $U_2/i_1$  (see 5.2) be denoted by  $Z_{e,12}$  with similar expressions for other pairs of microphones.

Taking into account the corrections given in 5.5 and 5.6, the final expression for the modulus of the pressure sensitivity of microphone (1) is:

$$|M_{p,1}| = \left\{ \left| \frac{Z_{e,12} Z_{e,31}}{Z_{e,23}} \right| \left| \frac{Z''_{a,23}}{Z'_{a,12} Z'_{a,31}} \right| \left| \frac{\Delta_{C,12} \Delta_{C,31}}{\Delta_{C,23}} \right| \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Similar expressions apply for microphones (2) and (3).

The phase angle of the pressure sensitivity for each microphone is determined by a similar procedure from the phase angle of each term in the above expression.

### 5.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source

If only two microphones and an auxiliary sound source are used, the final expression for the modulus of the pressure sensitivity is:

$$|M_{p,1}| = \left\{ \left| \frac{M_{p,1}}{M_{p,2}} \frac{Z_{e,12}}{Z'_{a,12}} \Delta_C \right| \right\}^{1/2} \quad (8)$$

where the ratio of the two pressure sensitivities is measured by comparison against the auxiliary source, see 5.1.2.



## 6 Grandeurs d'influence sur l'efficacité en pression

### 6.1 Généralités

L'efficacité en pression d'un microphone à condensateur dépend de la tension de polarisation et des conditions d'environnement. De plus, la définition de l'efficacité en pression implique que certaines prescriptions soient remplies lors des mesures. Pendant l'étalonnage, il est essentiel que ces conditions soient suffisamment bien satisfaites pour que les composantes d'incertitude qui en résultent soient petites.

### 6.2 Tension de polarisation

L'efficacité d'un microphone à condensateur est approximativement proportionnelle à la tension de polarisation; aussi la tension de polarisation effectivement utilisée pendant l'étalonnage doit être indiquée.

Pour se conformer à la CEI 1094-1, une tension de polarisation de 200,0 V est recommandée.

### 6.3 Configuration de référence du blindage

En accord avec le paragraphe 3.3 de la CEI 1094-1, la tension à circuit ouvert doit être mesurée aux bornes électriques du microphone quand il est fixé sur un support comportant la configuration de référence du blindage, en utilisant la technique de la tension insérée décrite en 5.3. Les spécifications de la configuration de référence du blindage pour les microphones étalons de laboratoire sont données dans la CEI 1094-1.

La configuration appropriée de référence du blindage doit être appliquée aux deux microphones couplés, émetteur et récepteur, pendant l'étalonnage, et le blindage doit être connecté au potentiel de la masse.

Si une autre configuration est utilisée, les résultats de l'étalonnage doivent se référer à la configuration de référence du blindage.

Si le constructeur indique une force mécanique maximale à appliquer au contact central du microphone, cette limite ne doit pas être dépassée.

### 6.4 Distribution de la pression sur la membrane

La définition de l'efficacité en pression suppose que la pression acoustique est appliquée uniformément sur la membrane. La tension de sortie d'un microphone pour une distribution de pression non uniforme sur la surface de la membrane sera différente de la tension de sortie du microphone pour une distribution de pression uniforme de même valeur moyenne, car habituellement le microphone est plus sensible à la pression acoustique appliquée au centre de la membrane.

Pour des coupleurs cylindriques, comme ceux qui sont décrits dans l'annexe C, il existe à la fois un mode longitudinal et un mode radial de propagation. A cause de la propagation radiale, une pression acoustique non uniforme sera appliquée sur la membrane. Ce mode de propagation sera excité quand le fonctionnement de la source est différent de celui d'un véritable piston couvrant entièrement la base du coupleur ou quand l'ensemble microphone-coupleur ne forme pas un cylindre droit parfait.



## 6 Factors influencing the pressure sensitivity

### 6.1 General

The pressure sensitivity of a condenser microphone depends on polarizing voltage and environmental conditions. Further, the definition of the pressure sensitivity implies that certain requirements be fulfilled by the measurements. It is essential during a calibration that these conditions are controlled sufficiently well so that the resulting uncertainty components are small.

### 6.2 Polarizing voltage

The sensitivity of a condenser microphone is approximately proportional to the polarizing voltage and thus the polarizing voltage actually used during the calibration shall be reported.

To comply with IEC 1094-1 a polarizing voltage of 200,0 V is recommended.

### 6.3 Ground shield reference configuration

According to 3.3 of IEC 1094-1, the open-circuit voltage shall be measured at the electrical terminals of the microphone when it is attached to a specified ground-shield configuration using the insert voltage technique described in 5.3. Specifications for ground-shield configurations for laboratory standard microphones are given in IEC 1094-1.

The appropriate ground-shield configuration shall apply to both transmitter and receiver microphones during the calibration, and the shield shall be connected to ground potential.

If any other arrangement is used, the results of a calibration shall be referred to the reference ground-shield configuration.

If the manufacturer specifies a maximum mechanical force to be applied to the central electrical contact of the microphone, this limit shall not be exceeded.

### 6.4 Pressure distribution over the diaphragm

The definition of the pressure sensitivity assumes that the sound pressure over the diaphragm is applied uniformly. The output voltage of a microphone presented with a non-uniform pressure distribution over the surface of the diaphragm will differ from the output voltage of the microphone when presented with a uniform pressure distribution having the same mean value, because usually the microphone is more sensitive to a sound pressure at the centre of the diaphragm.

For cylindrical couplers, as described in annex C, both longitudinal and radial wave motions will be present. The radial wave motion will result in a non-uniform pressure distribution over the diaphragm. It will be generated when the source differs from a true piston source covering the whole end surface of the coupler or when the combined microphone/coupler geometry is not a perfect right angle cylinder.

Pendant un étalonnage, il est recommandé que la distribution de pression acoustique sur la surface de la membrane soit uniforme à mieux que  $\pm 0,1$  dB près. Toutefois, il est difficile de satisfaire cette condition sur une installation existante à cause de l'imperfection géométrique d'un microphone réel. Bien que le mode de propagation radial ne puisse jamais être évité puisque la distribution des vitesses de la membrane du microphone émetteur diffère de celle d'un véritable piston, les coupleurs ayant le même diamètre que celui de la membrane du microphone présenteront une proportion aussi petite que possible de mode radial et se montreront moins sensibles aux imperfections géométriques que les coupleurs de plus grands diamètres.

Cependant, lorsqu'il est nécessaire d'effectuer un étalonnage de grande exactitude aux fréquences élevées, il peut être préférable d'utiliser plusieurs coupleurs de différentes dimensions pour évaluer l'efficacité réelle des microphones.

## 6.5 Influence des conditions d'environnement

### 6.5.1 Pression statique

La résistance et la masse acoustiques du gaz situé entre la membrane et l'électrode arrière, l'élasticité de la cavité située derrière la membrane donc l'efficacité en pression d'un microphone dépendent de la pression statique. Cette dépendance est fonction de la fréquence. Elle peut être déterminée pour le microphone en essai en effectuant des étalonnages par réciprocité à différentes pressions statiques.

L'annexe D contient des informations concernant l'influence de la pression statique sur l'efficacité en pression des microphones à condensateur étalons de laboratoire.

### 6.5.2 Température du microphone

Tout microphone étalon à condensateur montre une dépendance de son efficacité en pression en fonction de la température. Cette dépendance est fonction de la fréquence.

L'annexe D contient des informations concernant l'influence des variations de température sur l'efficacité en pression des microphones à condensateur étalons de laboratoire.

NOTE - Si un microphone est exposé à des variations de température excessives, son efficacité peut être modifiée de manière permanente.

### 6.5.3 Humidité

Bien que l'état thermodynamique de l'air enfermé dans la cavité située derrière la membrane du microphone dépende légèrement de l'humidité, aucune influence sur l'efficacité n'a jamais été observée pour les microphones étalons de laboratoire, à condition qu'il n'y ait pas de condensation.

NOTE - La résistance de surface du matériau isolant entre la plaque arrière et le boîtier du microphone peut être dégradée dans des conditions d'humidité excessives, particulièrement si le matériau est contaminé (voir aussi 7.4). La résistance de surface a un effet notable sur l'efficacité du microphone aux basses fréquences, spécialement sur la réponse en phase.

It is recommended that the sound pressure distribution during a calibration should be uniform to better than  $\pm 0,1$  dB over the surface of the diaphragm. However, it is difficult to control this condition in an actual calibration set-up due to the geometrical imperfection of a real microphone. Although radial wave motion can never be avoided because the velocity distribution of the transmitter microphone differs from that of a true piston, couplers having the same diameter as that of the microphone diaphragm will exhibit the smallest amount of radial wave motion and be less sensitive to geometrical imperfections than couplers with larger diameters.

However, when a calibration at high frequencies with a high accuracy is necessary, it may be preferable to use more than one coupler with different dimensions to assess the true sensitivity of the microphones.

## 6.5 *Dependence on environmental conditions*

### 6.5.1 *Static pressure*

The acoustic resistance and mass of the gas between the diaphragm and backplate, the compliance of the cavity behind the diaphragm and thus the pressure sensitivity of the microphone, depend on the static pressure. This dependence is a function of frequency. It can be determined for a microphone under test by making reciprocity calibrations at different static pressures.

Annex D contains information on the influence of static pressure on the pressure sensitivity of laboratory standard condenser microphones.

### 6.5.2 *Temperature of microphone*

Any laboratory standard condenser microphone will exhibit a temperature dependent sensitivity. This dependence is a function of frequency.

Annex D contains information on the influence of temperature on the pressure sensitivity of laboratory standard condenser microphones.

NOTE - If a microphone is exposed to excessive temperature variations a permanent change in sensitivity may result.

### 6.5.3 *Humidity*

Although the thermodynamic state of the air enclosed in the cavity behind the diaphragm of the microphone depends slightly on humidity, an influence on the sensitivity has not been observed for laboratory standard microphones, provided condensation does not take place.

NOTE - The surface resistance of the insulation material between the backplate and the housing of the microphone may deteriorate under excessively humid conditions, particularly if the material is contaminated (see also 7.4). The surface resistance has a noticeable effect on the sensitivity of the microphone at low frequencies, especially on the phase response.

#### 6.5.4 Conditions atmosphériques

Pour donner les résultats d'un étalonnage, il est recommandé que l'efficacité en pression soit ramenée dans les conditions ambiantes de référence si l'on dispose de données sûres concernant les corrections.

Il convient d'indiquer les conditions d'environnement réelles pendant l'étalonnage.

NOTE – Pendant un étalonnage, la température du microphone peut être différente de la température ambiante.

### 7 Incertitude d'étalonnage

#### 7.1 Généralités

En plus des facteurs qui affectent l'efficacité en pression mentionnés à l'article 6, d'autres composantes d'incertitude sont introduites par la méthode, l'équipement et le niveau de précaution pris au moment de l'étalonnage. Les facteurs qui affectent l'étalonnage réalisé selon un processus connu doivent être mesurés ou calculés avec un niveau d'exactitude aussi élevé que possible, de façon à minimiser leur influence sur l'incertitude totale qui en résulte.

#### 7.2 Impédance électrique de transfert

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour mesurer l'impédance électrique de transfert avec l'exactitude nécessaire et aucune préférence n'est donnée à l'une d'entre elles.

La tension utilisée pour exciter le microphone émetteur doit être telle que l'effet des harmoniques qui en résulte sur l'incertitude de la détermination de l'efficacité en pression soit petit en comparaison de l'incertitude aléatoire.

Le bruit ou toute autre cause d'interférence telle que la diaphonie, qu'elle soit d'origine acoustique ou autre, ne doit pas affecter indûment la détermination de l'efficacité en pression. Des filtres passe-bande peuvent être utilisés pour augmenter le rapport signal sur bruit.

#### 7.3 Impédance acoustique de transfert

##### 7.3.1 Généralités

Plusieurs facteurs influent sur l'impédance acoustique de transfert mais la plus grande source d'incertitude dans sa détermination provient souvent des paramètres des microphones, en particulier pour les coupleurs de petites dimensions.

##### 7.3.2 Dimensions des coupleurs

La forme et les dimensions des cavités de couplage doivent être choisies de sorte que les prescriptions de 6.4 soient satisfaites. Tant que la plus grande dimension du coupleur est petite en comparaison de la longueur d'onde du son dans le gaz, la pression acoustique sera réellement uniforme dans le coupleur et indépendante de sa forme. Aux fréquences élevées et pour les grands coupleurs, cette prescription peut être satisfaite en remplissant la cavité avec de l'hélium ou de l'hydrogène.

#### 6.5.4 *Atmospheric conditions*

When reporting the results of a calibration the pressure sensitivity should be referred to the reference environmental conditions if reliable correction data are available.

The actual conditions during the calibration should be reported.

NOTE - During a calibration the temperature of the microphone can be different from the ambient air temperature.

### 7 Calibration uncertainty components

#### 7.1 *General*

In addition to the factors mentioned in clause 6 which affect the pressure sensitivity, further uncertainty components are introduced by the method, the equipment and the degree of care under which the calibration is carried out. Factors which affect the calibration in a known way shall be measured or calculated with as high an accuracy as practicable in order to minimize their influence on the resulting uncertainty.

#### 7.2 *Electrical transfer impedance*

Various methods are used for measuring the electrical transfer impedance with the necessary accuracy, and no preference is given.

The voltage used to excite the source microphone shall be such that the effect of harmonics from this source on the uncertainty in the determination of the pressure sensitivity is small compared to the random uncertainty.

Noise or other interference such as crosstalk, whether of acoustical or other origin, shall not unduly affect the determination of the pressure sensitivity. Band-pass filters may be used to improve the signal-to-noise ratio.

#### 7.3 *Acoustic transfer impedance*

##### 7.3.1 *General*

Several factors influence the acoustic transfer impedance but the major source of uncertainty in its determination is often the microphone parameters, especially for small couplers.

##### 7.3.2 *Coupler dimensions*

The shape and dimensions of the resulting coupler cavity shall be chosen in such a way that the requirement of 6.4 is satisfied. As long as the greatest dimension of the coupler is small compared to the wavelength of sound in the gas, the sound pressure will be substantially uniform in the coupler and independent of the shape. At high frequencies and for large couplers, this requirement may be met by filling the cavity with helium or hydrogen.



Des exemples de coupleurs sont donnés dans l'annexe C.

#### NOTES

- 1 Il convient de construire les coupleurs cylindriques utilisés dans une gamme de fréquences où les dimensions ne sont pas petites en comparaison de la longueur d'onde avec les plus grandes précautions de façon que des modes acoustiques asymétriques ne soient pas excités.
- 2 L'influence d'une distribution de pression acoustique asymétrique peut être mise en évidence en changeant les positions relatives du coupleur et des microphones, par exemple en faisant tourner chaque microphone autour de son axe. Si un tel changement affecte l'impédance électrique de transfert, cet effet sera pris en compte lors de l'estimation de l'incertitude.
- 3 Si le coupleur est rempli avec un autre gaz que l'air, il convient que des précautions soient prises pour éviter une diffusion du gaz dans la cavité située derrière la membrane du microphone, en assurant l'étanchéité de la surface de contact à l'aide d'une fine couche de graisse à vide. Si une diffusion du gaz a lieu au travers de la membrane, le microphone ne peut pas être étalonné par cette méthode puisque son efficacité est modifiée de manière imprévisible.

### 7.3.3 Cavité frontale

Un microphone étalon de laboratoire à condensateur possède, en avant de la membrane, une cavité frontale.

Dans l'équation (3), le volume de la cavité frontale constitue une partie du volume géométrique total  $V$  du coupleur. Dans l'équation (4), les profondeurs des cavités frontales influent sur la longueur  $\ell_0$  du coupleur. A cause des tolérances de fabrication, le volume et la profondeur de la cavité frontale doivent être déterminés individuellement pour chaque microphone étalonné quand on utilise un coupleur d'étalonnage en ondes planes (voir annexe E).

On observe généralement que le volume mesuré pour la cavité frontale est différent du volume calculé à partir de l'aire de la section droite  $S_0$  du coupleur et de la profondeur de la cavité frontale. Cela est dû au fait que le diamètre de la cavité frontale peut légèrement différer du diamètre du coupleur, que la cavité frontale peut avoir un taraudage pratiqué sur sa paroi interne qui fait que le diamètre de cette cavité est mal défini et qu'il peut y avoir un espace d'air annulaire supplémentaire, relié à la cavité et localisé à la périphérie de la membrane du microphone. Si le volume excédentaire de la cavité frontale, à ajouter au volume calculé à partir de l'aire de la section droite  $S_0$  du coupleur et de la profondeur de la cavité, est petit et s'il y a une bonne étanchéité entre les parois de la cavité frontale du microphone et la membrane, le volume excédentaire doit être ajouté au volume équivalent du microphone quand on utilise l'équation (4). Cela peut être fait en considérant  $Z_{a,1}$  et  $Z_{a,2}$  comme étant la combinaison en parallèle de l'impédance du microphone réel et de l'impédance due au volume excédentaire. Si le volume excédentaire est grand et s'il est susceptible d'exister en arrière du plan de la membrane (par exemple quand un microphone possède temporairement un adaptateur afin qu'il soit conforme à la configuration définie dans la CEI 1094-1), alors il convient que le rayon du coupleur soit ajusté pour prendre en compte ce volume excédentaire.

#### NOTES

- 1 Dans certains cas, le volume excédentaire peut être négatif.
- 2 L'exactitude avec laquelle il est nécessaire de mesurer les dimensions des cavités dans le but d'obtenir une incertitude globale fixée dépend du coupleur utilisé et de la fréquence.

Examples of couplers are given in annex C.

#### NOTES

- 1 Cylindrical couplers used in a frequency range where the dimensions are not small compared to the wavelength should be manufactured with the utmost care so that asymmetric sound fields are not excited.
- 2 The influence on a microphone of an asymmetric sound pressure distribution in the coupler may be ascertained by changing the relative position of the coupler and microphones, for instance by incrementally rotating each microphone about its axis. If such a change affects the electrical transfer impedance, this effect should be taken into account when estimating the uncertainty.
- 3 If the coupler is filled with a gas other than air, care should be taken to avoid leakage of the gas to the cavity behind the diaphragm of the microphone, by sealing the contacting surface with a thin layer of vacuum grease. If diffusion of the gas through the diaphragm takes place, the microphone cannot be calibrated in this way as the microphone sensitivity is altered unpredictably.

### 7.3.3 Front cavity

A laboratory standard condenser microphone has a recessed cavity in front of the diaphragm.

In equation (3), the volume of the front cavity forms a part of the total geometrical volume  $V$  of the coupler. In equation (4), the depths of the front cavities similarly influence the length  $\ell_0$  of the coupler. Because of production tolerances the volume and depth of the front cavity shall be determined individually for each microphone under test when calibrated in plane-wave couplers (see annex E).

It will usually be found that the measured volume of the front cavity is different from the volume calculated from the cross-sectional area  $S_0$  of the coupler and the cavity depth. This is because the diameter of the front cavity may differ slightly from the diameter of the coupler, the cavity may have a screw thread turned on its inner wall which makes the cavity diameter somewhat ill-defined, and there may be an additional annular air space linked to the cavity around the edge of the microphone diaphragm. If the excess volume of the cavity, additional to the volume calculated from the cross-sectional area  $S_0$  of the coupler and the cavity depth, is small and there is a good seal between the microphone cavity wall and the diaphragm, the excess volume shall be added to the equivalent volume of the microphone when using equation (4). This may be done by setting  $Z_{a,1}$  and  $Z_{a,2}$  to be the impedance of the parallel connection of the microphone impedance and the impedance due to the excess volume. If the excess volume is large and likely to exist behind the plane of the diaphragm (e.g. when a microphone is temporarily fitted with an adaptor to make it conform to a type defined in IEC 1094-1) then the radius of the coupler should be adjusted to allow for the extra volume.

#### NOTES

- 1 This excess volume can in some instances be negative.
- 2 The accuracy with which the cavity dimensions need to be measured in order to obtain a certain overall accuracy is related to the coupler used and the frequency.

### 7.3.4 Impédance acoustique

L'impédance acoustique du microphone est fonction de la fréquence et est principalement déterminée par les propriétés de la membrane tendue, de l'air enfermé dans la cavité située derrière la membrane et de la géométrie de la plaque arrière. En première approximation, l'impédance acoustique peut être exprimée sous forme d'un circuit série composé d'une élasticité, d'une masse et d'une résistance. Ce circuit peut aussi être décrit par une élasticité, une fréquence de résonance et un facteur de perte. L'élasticité est souvent donnée sous forme de la partie réelle en basse fréquence du volume équivalent du microphone (voir 3.8.1 de la CEI 1094-1).

L'impédance acoustique  $Z_a$  de chaque microphone constitue une partie importante de l'impédance acoustique de transfert  $Z_{a,12}$  du système et des erreurs dans la détermination de  $Z_a$  influent d'une manière compliquée sur l'exactitude de l'étalonnage, particulièrement aux fréquences élevées.

Des méthodes de détermination de l'impédance acoustique sont décrites dans l'annexe E.

NOTE - L'exactitude avec laquelle il est nécessaire de mesurer les paramètres des microphones dans le but d'obtenir une incertitude globale fixée dépend du coupleur utilisé et de la fréquence.

### 7.3.5 Grandeurs physiques

Certaines grandeurs physiques décrivant les propriétés du gaz enfermé dans la cavité entrent dans les expressions de calcul des efficacités des microphones. Ces grandeurs dépendent des conditions d'environnement telles que la pression statique, la température et l'humidité. Les valeurs des grandeurs physiques et leurs variations en fonction des conditions d'environnement sont données dans l'annexe F.

### 7.3.6 Conditions d'environnement

L'impédance acoustique de transfert ainsi que l'efficacité d'un microphone dépendent des conditions d'environnement telles que la pression statique et la température.

### 7.3.7 Facteurs correctifs

Les facteurs correctifs pour les pertes par conduction thermique et pour les pertes dues aux tubes capillaires doivent être calculés à partir des équations données dans les annexes A et B.

## 7.4 Tension de polarisation

Dans le but de déterminer la tension de polarisation, un dispositif peut être prévu pour mesurer cette tension directement aux bornes du microphone. Cela est important quand la tension de polarisation est délivrée par une source possédant une impédance élevée, à cause de la résistance d'isolement finie du microphone. On peut également mesurer la résistance d'isolement du microphone afin de s'assurer qu'elle est suffisamment élevée pour qu'une détermination de la tension de polarisation en l'absence de microphone ou une mesure à la sortie basse impédance de la source de tension de polarisation soient valables.



### 7.3.4 Acoustic impedance

The acoustic impedance of the microphone is a function of frequency and is determined mainly by the properties of the stretched diaphragm and the air enclosed in the cavity behind the diaphragm and by the geometry of the backplate. To a first approximation the acoustic impedance can be expressed in terms of equivalent series-connected compliance, mass and resistance. This network can alternatively be described by compliance, resonance frequency and loss factor. Compliance is often given in terms of the low frequency value of the real part of the equivalent volume of the microphone (see 3.8.1 of IEC 1094-1).

The acoustic impedance  $Z_a$  of each microphone forms an important part of the acoustic transfer impedance  $Z_{a,12}$  of the system and errors in the determination of  $Z_a$  influence the accuracy of the calibration in a complicated way, particularly at high frequencies.

Methods for determining the acoustic impedance are described in annex E.

NOTE - The accuracy to which the microphone parameters need to be measured in order to obtain a certain overall accuracy is related to the coupler used and the frequency.

### 7.3.5 Physical quantities

Certain physical quantities describing the properties of the gas enclosed in the coupler enter the expressions for calculating the sensitivities of the microphones. These quantities depend on environmental conditions such as static pressure, temperature and humidity. Values of the quantities and their dependence on environmental conditions are described in annex F.

### 7.3.6 Environmental conditions

The acoustic transfer impedance as well as the sensitivity of the microphone depend on the environmental conditions such as static pressure and temperature.

### 7.3.7 Correction factors

The correction factors for heat conduction and capillary tube losses shall be calculated from the equations given in annexes A and B.

## 7.4 Polarizing voltage

In order to determine the polarizing voltage, provision can be made for measuring this voltage directly at the terminals of the microphone. This is important, when the polarizing voltage is obtained from a high-impedance source, due to the finite insulation resistance of the microphone. Alternatively, the insulation resistance of the microphone can be measured and verified to be sufficiently high that a measurement of the polarizing voltage supply with the microphone removed, or a measurement at a low impedance port of the polarizing voltage supply, are valid.

### 7.5 *Incertitude sur le niveau d'efficacité en pression*

On estime qu'un étalonnage par réciprocité effectué dans des conditions bien maîtrisées permet d'atteindre sur la détermination du niveau d'efficacité en pression une incertitude de l'ordre de 0,05 dB aux fréquences basses et moyennes. L'incertitude croît jusqu'à environ 0,1 dB à 10 kHz ou 20 kHz pour les microphones étalons de laboratoire de type LS1P et LS2P respectivement.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61094-2:1992

Withd2Wm

### 7.5 *Uncertainty on pressure sensitivity level*

For determining the pressure sensitivity level, it is estimated that a reciprocity calibration carried out under controlled conditions can achieve an uncertainty of approximately 0,05 dB at low and middle frequencies. The uncertainty increases to about 0,1 dB at 10 kHz and 20 kHz for LS1P and LS2P laboratory standard microphones, respectively.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61094-2:1992

Withdr2Wm

## Annexe A (normative)

## Conduction thermique dans une cavité close

Dans une cavité close la conduction thermique entre les parois et l'air a pour conséquence un passage graduel des conditions adiabatiques aux conditions isothermes. La nature exacte de cette transition dépend de la fréquence d'étalonnage et des dimensions du coupleur. La pression acoustique produite par le microphone émetteur, c'est-à-dire par une source de flux de vitesse constant, changera en conséquence. Cet effet est pris en compte par un accroissement apparent du volume du coupleur exprimé par un facteur correctif complexe  $\Delta_H$  appliqué au volume géométrique  $V$  dans l'équation (3) ou à l'aire de la section droite  $S_0$  dans l'équation (4).

Le facteur correctif est donné par:

$$\Delta_H = \frac{\kappa}{1 + (\kappa - 1) \underline{E}_V} \quad (\text{A.1})$$

où  $\underline{E}_V$  est la fonction de transfert complexe de température définie comme le rapport de la moyenne spatiale de la variation sinusoïdale de température associée à la pression acoustique à la variation sinusoïdale de température qui serait produite si les parois du coupleur étaient parfaitement isolantes. On trouve dans la bibliographie [A.1] des valeurs tabulées de  $\underline{E}_V$  en fonction des paramètres  $R$  et  $X$ , où

$R$  est le rapport de la longueur du coupleur à son diamètre;

$X = f\ell^2/(\kappa\alpha_t)$ ;

$f$  est la fréquence, Hz;

$\ell$  est le rapport du volume à la surface du coupleur, m;

$\alpha_t$  est la diffusivité thermique du gaz à l'intérieur de la cavité,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Des valeurs de  $\underline{E}_V$  pour quelques valeurs de  $R$  et de  $X$  sont données dans le tableau A.1. Les valeurs données sont considérées comme exactes à 0,00001 près.

Pour des coupleurs cylindriques comme ceux décrits dans l'annexe C, l'approximation de la quantité complexe  $\underline{E}_V$  donnée ci-dessous sera satisfaisante.

$$\underline{E}_V = 1 - S + D_1 S^2 + (3/4)\sqrt{\pi} D_2 S^3 \quad (\text{A.2})$$

où

$$S = \left[ -j \frac{1}{2\pi X} \right]^{1/2} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi X}}$$

$$D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi (2R + 1)^2}$$

$$D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi} (2R + 1)}$$

Le module de  $\underline{E}_V$  calculé à partir de l'équation (A.2) est exact à 0,01% près pour  $0,125 < R < 8$  et pour  $X > 5$ .

Les deux premiers termes de l'équation (A.2) constituent une approximation qui peut être utilisée pour des coupleurs qui ne sont pas des cylindres droits à base circulaire.

## Annex A (normative)

## Heat conduction in a closed cavity

In a closed coupler heat conduction between the air and the walls results in a gradual transition from adiabatic to isothermal conditions. The exact nature of this transition depends upon the frequency of the calibration and the dimensions of the coupler. The sound pressure generated by the transmitter microphone, i.e. a constant volume displacement source, will change accordingly. The effect can be considered as an apparent increase in the coupler volume expressed by a complex correction factor  $\underline{\Delta}_H$  to the geometrical volume  $V$  in equation (3) or to the cross-sectional area  $S_0$  in equation (4).

The correction factor is given by:

$$\underline{\Delta}_H = \frac{\kappa}{1 + (\kappa - 1) \underline{E}_V} \quad (\text{A.1})$$

where  $\underline{E}_V$  is the complex temperature transfer function defined as the ratio of the space average of the sinusoidal temperature variation associated with the sound pressure to the sinusoidal temperature variation that would be generated if the walls of the coupler were perfectly non-conducting. Tabulated values for  $\underline{E}_V$  are found in the literature [A.1] as a function of parameters  $R$  and  $X$ , where

$R$  is the length to diameter ratio of the coupler;  
 $X = f\ell^2/(\kappa\alpha_t)$ ;  
 $f$  is the frequency, Hz;  
 $\ell$  is the volume to surface ratio of the coupler, m;  
 $\alpha_t$  is the thermal diffusivity of the enclosed gas,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Tabulated values of  $\underline{E}_V$  for some values of  $R$  and  $X$  are given in table A.1. The figures given are considered accurate to 0,00001.

For finite cylindrical couplers as described in annex C, the approximation described below on the complex quantity  $\underline{E}_V$  will be satisfactory.

$$\underline{E}_V = 1 + S + D_1 S^2 + (3/4)\sqrt{\pi} D_2 S^3 \quad (\text{A.2})$$

where

$$S = \left[ -j \frac{1}{2\pi X} \right]^{1/2} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi X}}$$

$$D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi (2R + 1)^2}$$

$$D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi} (2R + 1)}$$

The modulus of  $\underline{E}_V$ , as calculated from equation (A.2), is accurate to 0,01% within the range  $0,125 < R < 8$  and for  $X > 5$ .

The first two terms in equation (A.2) constitute an approximation that may be used for couplers that are not right circular cylinders.

Tableau A.1 - Valeurs de  $\underline{E}_V$

Partie réelle de $\underline{E}_V$			$X$	Partie imaginaire de $\underline{E}_V$		
$R = 0,2$	$R = 0,5$	$R = 1$		$R = 0,2$	$R = 0,5$	$R = 1$
0,72127	0,71996	0,72003	1,0	0,24038	0,22323	0,22146
0,80092	0,80122	0,80128	2,0	0,17722	0,16986	0,16885
0,83727	0,83751	0,83754	3,0	0,14818	0,14304	0,14236
0,85907	0,85920	0,85922	4,0	0,13003	0,12614	0,12563
0,87393	0,87402	0,87403	5,0	0,11732	0,11421	0,11380
0,89343	0,89348	0,89349	7,0	0,10030	0,09807	0,09777
0,91082	0,91086	0,91086	10,0	0,08477	0,08321	0,08300
0,93693	0,93694	0,93694	20,0	0,06086	0,06007	0,05997
0,94850	0,94851	0,94851	30,0	0,05002	0,04950	0,04942
0,95540	0,95541	0,95541	40,0	0,04349	0,04310	0,04304
0,96358	0,96359	0,96359	60,0	0,03568	0,03541	0,03538
0,96846	0,96846	0,96846	80,0	0,03098	0,03078	0,03076
0,97179	0,97179	0,97179	100,0	0,02776	0,02761	0,02758
0,98005	0,98005	0,98005	200,0	0,01972	0,01964	0,01963
0,98590	0,98590	0,98590	400,0	0,01399	0,01395	0,01395
0,99003	0,99003	0,99003	800,0	0,00992	0,00990	0,00989

# Bibliographie

- [A.1] Gerber, H. Acoustic properties of fluid-filled chambers at infrasonic frequencies in the absence of convection. *J. Acoust. Soc. Am.* 36, 1964, pp. 1427-1434.
- [A.2] Jarvis, D.R. Acoustical admittance of cylindrical cavities. *J. Sound and Vibr.* 117, 1987, pp. 390-392.

Table A.1 - Values for  $\underline{E}_V$ 

Real part of $\underline{E}_V$			$X$	Imaginary part of $\underline{E}_V$		
$R = 0,2$	$R = 0,5$	$R = 1$		$R = 0,2$	$R = 0,5$	$R = 1$
0,72127	0,71996	0,72003	1,0	0,24038	0,22323	0,22146
0,80092	0,80122	0,80128	2,0	0,17722	0,16986	0,16885
0,83727	0,83751	0,83754	3,0	0,14818	0,14304	0,14236
0,85907	0,85920	0,85922	4,0	0,13003	0,12614	0,12563
0,87393	0,87402	0,87403	5,0	0,11732	0,11421	0,11380
0,89343	0,89348	0,89349	7,0	0,10030	0,09807	0,09777
0,91082	0,91086	0,91086	10,0	0,08477	0,08321	0,08300
0,93693	0,93694	0,93694	20,0	0,06086	0,06007	0,05997
0,94850	0,94851	0,94851	30,0	0,05002	0,04950	0,04942
0,95540	0,95541	0,95541	40,0	0,04349	0,04310	0,04304
0,96358	0,96359	0,96359	60,0	0,03568	0,03541	0,03538
0,96846	0,96846	0,96846	80,0	0,03098	0,03078	0,03076
0,97179	0,97179	0,97179	100,0	0,02776	0,02761	0,02758
0,98005	0,98005	0,98005	200,0	0,01972	0,01964	0,01963
0,98590	0,98590	0,98590	400,0	0,01399	0,01395	0,01395
0,99003	0,99003	0,99003	800,0	0,00992	0,00990	0,00989

## Literature

- [A.1] Gerber, H. Acoustic properties of fluid-filled chambers at infrasonic frequencies in the absence of convection, *J. Acoust. Soc. Am.* 36, 1964, pp. 1427-1434.
- [A.2] Jarvis, D.R. Acoustical admittance of cylindrical cavities. *J. Sound and Vibr.* 117, 1987, pp. 390-392.

## Annexe B (normative)

### Impédance acoustique d'un tube capillaire

L'impédance acoustique  $Z_{a,C}$  à l'entrée d'un tube capillaire ouvert est déterminée par la théorie des lignes de transmission (voir 5.6):

$$Z_{a,C} = Z_{a,t} \tanh \gamma \ell_C \quad (B.1)$$

Entre  $Z_{a,t}$  et  $\gamma$  il existe les relations (voir bibliographie [B.1]):

$$\gamma Z_{a,t} = j \frac{\omega \rho}{\pi a^2} \left[ 1 - \frac{2 J_1(\underline{k}a)}{\underline{k}a J_0(\underline{k}a)} \right] \quad (B.2)$$

et

$$\frac{\gamma}{Z_{a,t}} = j \omega \frac{\pi a^2}{\rho c^2} \left[ 1 + \frac{2}{B \underline{k}a} (\kappa - 1) \frac{J_1(B \underline{k}a)}{J_0(B \underline{k}a)} \right] \quad (B.3)$$

où

$J_0(\ ), J_1(\ )$	sont les fonctions de Bessel de première espèce à argument complexe d'ordres 0 et 1 respectivement;
$a$	est le rayon du tube, m;
$\underline{k} = (-j \omega \rho / \eta)^{1/2}$	est le nombre d'onde complexe, $m^{-1}$ ;
$B = (\eta / (\rho \alpha_t))^{1/2}$	
$\eta$	est la viscosité du gaz, Pa·s;
$\rho$	est la masse volumique du gaz, $kg/m^3$ ;
$\alpha_t$	est la diffusivité thermique du gaz, $m^2/s$ .

Les équations ci-dessus doivent être utilisées pour calculer le facteur correctif  $\Delta_C$  de l'équation (6).

On peut également obturer le tube capillaire sur toute sa longueur par un fil approprié après assemblage des microphones sur le coupleur. Dans ce cas, le facteur correctif  $\Delta_C$  est égal à 1.

Les expressions données ci-dessus sont calculées pour un tube ayant une section circulaire parfaite et sont fonction de la puissance quatre du rayon du tube. Toutefois dans la pratique, la section intérieure des tubes capillaires n'est pas circulaire et une mesure de débit du tube peut être nécessaire pour connaître le rayon effectif.

Des valeurs tabulées de la partie réelle et de la partie imaginaire de  $Z_{a,C}$ , calculées pour les conditions ambiantes de référence, sont données dans le tableau B.1 en fonction de la fréquence pour des valeurs typiques des paramètres.

### Bibliographie

- [B.1] Zwikker, C. et Kosten, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter II, § 2-3.
- [B.2] Rasmussen, K. A note on the acoustic impedance of narrow tubes, *Acustica* 51, 1982, pp. 72-73.



## Annex B (normative)

## Acoustic impedance of a capillary tube

The acoustic input impedance  $\underline{Z}_{a,C}$  of an open capillary tube is determined by means of the transmission line theory, see 5.6:

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t} \tanh \gamma \ell_C \quad (\text{B.1})$$

Between  $\underline{Z}_{a,t}$  and  $\gamma$  a relationship exists (see literature [B.1]):

$$\gamma \underline{Z}_{a,t} = j \frac{\omega \rho}{\pi a^2} \left[ 1 - \frac{2 J_1(\underline{k}a)}{\underline{k}a J_0(\underline{k}a)} \right] \quad (\text{B.2})$$

and

$$\frac{\gamma}{\underline{Z}_{a,t}} = j \omega \frac{\pi a^2}{\rho c^2} \left[ 1 + \frac{2}{B \underline{k}a} (\kappa - 1) \frac{J_1(B \underline{k}a)}{J_0(B \underline{k}a)} \right] \quad (\text{B.3})$$

where

$J_0(\cdot), J_1(\cdot)$	are the cylindrical Bessel functions of first kind, zero and first order respectively of complex argument;
$a$	is the radius of the tube, m;
$\underline{k} = (-j \omega \rho / \eta)^{1/2}$	is the complex wavenumber, $\text{m}^{-1}$ ;
$B = (\eta / \rho \alpha_t)^{1/2}$	
$\eta$	is the viscosity of the gas, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;
$\rho$	is the density of the gas, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;
$\alpha_t$	is the thermal diffusivity of the gas, $\text{m}^2/\text{s}$ .

The equations above shall be used to calculate the correction factor  $\Delta_C$  given in equation (6).

Alternatively, the capillary tube may be stopped in its full length by a suitable wire after assembling the coupler and microphones. In this case the correction factor  $\Delta_C$  equals 1.

The expressions given above are derived for an ideal circular tube and are sensitive to the fourth power of the radius of the tube. In practice, however, the inner sections of capillary tubes are not circular and a flow calibration of the tube may be necessary to determine the effective radius.

Tabulated values of the real and imaginary parts of  $\underline{Z}_{a,C}$  at reference environmental conditions are given in table B.1 for a typical range of parameters and frequency.

## Literature

- [B.1] Zwikker, C. and Kosten, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter II, § 2-3.
- [B.2] Rasmussen, K. A note on the acoustic impedance of narrow tubes, *Acustica* 51, 1982, pp. 72-73.

Tableau B.1a - Partie réelle de  $Z_{aC}$  en gigapascal-seconde par mètre cube (GPa · s/m³)

$\ell_C = 50$			Fréq. Hz	Dimensions du tube en millimètres $\ell_C = 100$		
$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$		$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$
3,018	1,457	0,597	20	6,041	2,916	1,195
3,019	1,457	0,597	25	6,044	2,919	1,196
3,020	1,458	0,597	31,5	6,049	2,922	1,198
3,022	1,459	0,598	40	6,059	2,928	1,201
3,025	1,460	0,599	50	6,072	2,937	1,205
3,029	1,463	0,600	63	6,094	2,951	1,212
3,036	1,467	0,602	80	6,130	2,975	1,225
3,047	1,473	0,605	100	6,185	3,011	1,243
3,063	1,482	0,610	125	6,270	3,069	1,272
3,093	1,499	0,620	160	6,422	3,173	1,326
3,137	1,524	0,633	200	6,643	3,331	1,408
3,207	1,564	0,654	250	6,989	3,595	1,550
3,326	1,631	0,689	315	7,542	4,066	1,817
3,534	1,750	0,750	400	8,353	4,944	2,381
3,871	1,943	0,849	500	9,068	6,288	3,535
4,504	2,314	1,034	630	8,670	7,336	5,631
5,807	3,113	1,435	800	6,375	5,311	4,375
8,332	4,890	2,378	1 000	4,353	3,005	1,925
12,120	9,008	5,385	1 250	3,545	2,127	1,146
9,191	7,926	6,740	1 600	4,171	2,410	1,196
4,326	3,021	1,951	2 000	6,325	4,409	2,527
2,694	1,637	0,893	2 500	4,979	3,717	2,768
2,807	1,580	0,783	3 150	4,411	2,661	1,392
5,923	3,536	1,749	4 000	5,238	4,019	3,075
5,946	4,825	3,903	5 000	5,059	3,262	1,770
3,306	1,939	1,011	6 300	4,578	2,920	1,672
6,571	5,375	4,137	8 000	4,695	3,034	1,749
4,184	2,465	1,258	10 000	4,977	3,363	1,952
3,902	2,539	1,540	12 500	4,760	3,331	2,271
4,043	2,590	1,534	16 000	4,753	3,263	2,137
4,535	2,813	1,517	20 000	4,844	3,324	2,023

NOTES

1 - Les valeurs utilisées dans ce tableau sont:

$c = 345,7 \text{ m/s}$   
 $\kappa = 1,40$   
 $\rho = 1,186 \text{ kg/m}^3$   
 $\eta = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$   
 $\alpha_t = 21 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

2 - Les valeurs données dans ce tableau ne sont valables que dans les conditions ambiantes de référence.

Table B.1a - Real part of  $Z_{aC}$  in gigapascal-second per cube metre (GPa·s/m³)

Tube dimensions in millimetres

$\ell_C = 50$			Freq. Hz	$\ell_C = 100$		
$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$		$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$
3,018	1,457	0,597	20	6,041	2,916	1,195
3,019	1,457	0,597	25	6,044	2,919	1,196
3,020	1,458	0,597	31,5	6,049	2,922	1,198
3,022	1,459	0,598	40	6,059	2,928	1,201
3,025	1,460	0,599	50	6,072	2,937	1,205
3,029	1,463	0,600	63	6,094	2,951	1,212
3,036	1,467	0,602	80	6,130	2,975	1,225
3,047	1,473	0,605	100	6,185	3,011	1,243
3,063	1,482	0,610	125	6,270	3,069	1,272
3,093	1,499	0,620	160	6,422	3,173	1,326
3,137	1,524	0,633	200	6,643	3,331	1,408
3,207	1,564	0,654	250	6,989	3,595	1,550
3,326	1,631	0,689	315	7,542	4,066	1,817
3,534	1,750	0,750	400	8,353	4,944	2,381
3,871	1,943	0,849	500	9,068	6,288	3,535
4,504	2,314	1,034	630	8,670	7,336	5,631
5,807	3,113	1,435	800	6,375	5,311	4,375
8,332	4,890	2,378	1 000	4,353	3,005	1,925
12,120	9,008	5,385	1 250	3,545	2,127	1,146
9,191	7,926	6,740	1 600	4,171	2,410	1,196
4,326	3,021	1,951	2 000	6,325	4,409	2,527
2,694	1,637	0,893	2 500	4,979	3,717	2,768
2,807	1,580	0,783	3 150	4,411	2,661	1,392
5,923	3,536	1,749	4 000	5,238	4,019	3,075
5,946	4,825	3,903	5 000	5,059	3,262	1,770
3,306	1,939	1,011	6 300	4,578	2,920	1,672
6,571	5,375	4,137	8 000	4,695	3,034	1,749
4,184	2,465	1,258	10 000	4,977	3,363	1,952
3,902	2,539	1,540	12 500	4,760	3,331	2,271
4,043	2,590	1,534	16 000	4,753	3,263	2,137
4,535	2,813	1,517	20 000	4,844	3,324	2,023

NOTES

1 - The data used for this table are:

$c = 345,7$  m/s

$\kappa = 1,40$

$\rho = 1,186$  kg/m³

$\eta = 18,3 \cdot 10^{-6}$  Pa·s

$\alpha_t = 21 \cdot 10^{-6}$  m²/s

2 - The values given in this table are valid at reference environmental conditions only.

### Dimensions du tube en millimètres

$l_c = 50$			Fréq. Hz	$l_c = 100$		
$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$		$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$
0,097	0,074	0,049	20	0,096	0,114	0,090
0,122	0,092	0,061	25	0,120	0,143	0,112
0,153	0,116	0,077	31,5	0,151	0,180	0,141
0,195	0,147	0,098	40	0,191	0,228	0,180
0,244	0,184	0,123	50	0,238	0,285	0,225
0,307	0,232	0,155	63	0,299	0,359	0,283
0,390	0,295	0,197	80	0,376	0,455	0,360
0,488	0,369	0,246	100	0,465	0,569	0,452
0,610	0,461	0,308	125	0,569	0,710	0,567
0,782	0,592	0,396	160	0,701	0,905	0,731
0,980	0,743	0,496	200	0,824	1,123	0,923
1,228	0,933	0,623	250	0,916	1,380	1,170
1,556	1,186	0,792	315	0,888	1,664	1,500
1,990	1,527	1,021	400	0,479	1,842	1,922
2,511	1,948	1,306	500	-0,684	1,411	2,200
3,189	2,532	1,711	630	-2,739	-0,777	0,926
3,987	3,353	2,325	800	-3,890	-3,152	-2,510
4,280	4,213	3,186	1 000	-3,031	-2,595	-2,130
1,338	3,162	3,730	1 250	-1,382	-1,157	-0,944
-5,333	-4,384	-3,281	1 600	0,429	0,456	0,282
-4,500	-3,768	-2,956	2 000	0,260	0,971	1,221
-1,996	-1,663	-1,280	2 500	-1,702	-1,552	-1,344
0,491	0,244	0,051	3 150	0,205	0,199	0,053
2,428	2,283	1,692	4 000	-1,074	-0,864	-0,524
-2,803	-2,434	-1,954	5 000	0,208	0,438	0,406
0,186	-0,037	-0,190	6 300	-0,070	-0,095	-0,219
-1,245	-0,607	0,209	8 000	-0,041	-0,027	-0,138
0,872	0,643	0,336	10 000	-0,056	0,152	0,212
-0,542	-0,699	-0,764	12 500	-0,281	-0,295	-0,281
-0,210	-0,399	-0,532	16 000	-0,174	-0,187	-0,228
0,430	0,349	0,142	20 000	-0,109	-0,001	0,035

NOTES

1 - Les valeurs utilisées dans ce tableau sont:

$c = 345,7 \text{ m/s}$   
 $\kappa = 1,40$   
 $\rho = 1,186 \text{ kg/m}^3$   
 $\eta = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$   
 $\alpha_t = 21 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

2 - Les valeurs données dans ce tableau ne sont valables que dans les conditions ambiantes de référence.

**Table B.1b - Imaginary part of  $\underline{Z}_{aC}$  in gigapascal-second per cube metre (GPa·s/m<sup>3</sup>)**

Tube dimensions in millimetres						
$\ell_C = 50$			Freq.  Hz	$\ell_C = 100$		
$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$		$a=0,1667$	$a=0,20$	$a=0,25$
0,097	0,074	0,049	20	0,096	0,114	0,090
0,122	0,092	0,061	25	0,120	0,143	0,112
0,153	0,116	0,077	31,5	0,151	0,180	0,141
0,195	0,147	0,098	40	0,191	0,228	0,180
0,244	0,184	0,123	50	0,238	0,285	0,225
0,307	0,232	0,155	63	0,299	0,359	0,283
0,390	0,295	0,197	80	0,376	0,455	0,360
0,488	0,369	0,246	100	0,465	0,569	0,452
0,610	0,461	0,308	125	0,569	0,710	0,567
0,782	0,592	0,396	160	0,701	0,905	0,731
0,980	0,743	0,496	200	0,824	1,123	0,923
1,228	0,933	0,623	250	0,916	1,380	1,170
1,556	1,186	0,792	315	0,888	1,664	1,500
1,990	1,527	1,021	400	0,479	1,842	1,922
2,511	1,948	1,306	500	0,684	1,411	2,200
3,189	2,532	1,711	630	-2,739	-0,777	0,926
3,987	3,353	2,325	800	-3,890	-3,152	-2,510
4,280	4,213	3,186	1 000	-3,031	-2,595	-2,130
1,338	3,162	3,730	1 250	-1,382	-1,157	-0,944
-5,333	-4,384	-3,281	1 600	0,429	0,456	0,282
-4,500	-3,768	-2,956	2 000	0,260	0,971	1,221
-1,996	-1,663	-1,280	2 500	-1,702	-1,552	-1,344
0,491	0,244	0,051	3 150	0,205	0,199	0,053
2,428	2,283	1,692	4 000	-1,074	-0,864	-0,524
-2,803	-2,434	-1,954	5 000	0,208	0,438	0,406
0,186	-0,037	-0,190	6 300	-0,070	-0,095	-0,219
-1,245	-0,607	0,209	8 000	-0,041	-0,027	-0,138
0,872	0,643	0,336	10 000	-0,056	0,152	0,212
-0,542	-0,699	-0,764	12 500	-0,281	-0,295	-0,281
-0,210	-0,399	-0,532	16 000	-0,174	-0,187	-0,228
0,430	0,349	0,142	20 000	-0,109	-0,001	0,035

NOTES

1 - The data used for this table are:

$c = 345,7 \text{ m/s}$

$\kappa = 1,40$

$\rho = 1,186 \text{ kg/m}^3$

$\eta = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$\alpha_t = 21 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

2 - The values given in this table are valid at reference environmental conditions only.

## Annexe C (informative)

### Exemples de coupleurs cylindriques pour l'étalonnage des microphones

Les coupleurs utilisés dans un étalonnage par réciprocité devraient en principe produire une distribution de pression acoustique uniforme sur les membranes des microphones émetteur et récepteur. Il est particulièrement important que la distribution de pression sur la membrane du microphone récepteur soit aussi uniforme que possible afin de satisfaire à la définition de l'efficacité en pression, voir 3.4 de la CEI 1094-1. En raison de la propagation d'ondes radiales et de l'asymétrie du mouvement de la membrane, cette condition idéale ne peut qu'être approchée. Dans le but d'étendre la gamme de fréquences où le coupleur peut être utilisé (en ne considérant que le mode radial), il est avantageux d'avoir une fréquence de résonance radiale aussi élevée que possible, ce qui entraîne des coupleurs de petit diamètre. Pour des raisons pratiques, il n'est pas indiqué de choisir un diamètre du coupleur inférieur au diamètre des membranes.

Pour un coupleur donné, il est cependant possible d'élever la fréquence de résonance en introduisant dans le coupleur de l'hydrogène ou de l'hélium à la place de l'air (voir 7.3.2). Théoriquement, il est alors possible de multiplier la fréquence supérieure d'utilisation du coupleur par un facteur égal au rapport de la célérité du son dans l'hydrogène (ou l'hélium) à la célérité du son dans l'air. Il faut cependant noter que la célérité de propagation dans la membrane est presque indépendante du gaz du coupleur et n'augmente pas dans le même rapport que la célérité du son dans le gaz remplissant le coupleur.

Une grandeur importante dans un étalonnage par réciprocité utilisant des coupleurs clos est l'impédance acoustique de transfert  $Z_{a,12}$  du système complet (voir 5.2 et 5.4) qui doit être connue avec une grande exactitude. Aux fréquences où la longueur d'onde acoustique est grande par rapport aux dimensions du coupleur, la distribution de pression acoustique est uniforme dans tout le coupleur et  $Z_{a,12} = Z_{a,12}$  est déterminée par le volume effectif du coupleur, c'est-à-dire par le volume géométrique du coupleur auquel on ajoute les volumes des cavités frontales et les volumes équivalents des microphones (voir équation (3)). Aux fréquences où la longueur d'onde acoustique ne peut plus être considérée comme grande par rapport aux dimensions du coupleur, il y aura propagation et il est difficile d'obtenir une expression théorique pour l'impédance de transfert sauf dans le cas où le coupleur a une forme très simple. L'équation (4) donne l'impédance de transfert  $Z_{a,12}$  d'un coupleur cylindrique dont le diamètre est égal au diamètre des membranes des microphones.

Des méthodes de calcul d'impédance de transfert dans d'autres cas ont été développées. Toutefois, dans de tels cas il y a lieu de déterminer également la correction de propagation de façon empirique.

Deux groupes de coupleurs sont utilisés dans la pratique. Des coupleurs en ondes planes dont le diamètre est égal au diamètre des membranes et des coupleurs de grands volumes dont le volume est très grand par rapport aux volumes frontaux et aux volumes équivalents des microphones.

#### C.1 Coupleurs en ondes planes

Les coupleurs en ondes planes ont un diamètre de cavité égal aux diamètres des cavités frontales des microphones. La longueur des coupleurs, c'est-à-dire la distance entre les membranes, doit être suffisante pour assurer une transmission en ondes planes, mais pas suffisamment grande pour nécessiter des corrections dues aux pertes en hautes fréquences sur les parois des cavités. Des cavités de couplage dont le rapport entre la longueur et le diamètre est compris entre 0,5 et 0,75 sont recommandées. De tels coupleurs permettent l'étalonnage des microphones étalons de laboratoire de type LS1P jusqu'à environ 10 kHz et de type LS2P jusqu'à environ 20 kHz quand ils sont remplis d'air.



## Annex C (informative)

### Examples of cylindrical couplers for calibration of microphones

The coupler used in a reciprocity calibration should produce a uniform sound pressure distribution over the diaphragm of the transmitter and receiver microphones. It is particularly important that the pressure distribution over the diaphragm of the receiver microphone be as uniform as possible in order to be consistent with the definition of pressure sensitivity, see 3.4 of IEC 1094-1. Due to radial wave motion and asymmetry of diaphragm motion, this ideal condition can only be approximated. In order to extend the frequency range over which the coupler can be used (but only as regards the radial wave-motion), it is advantageous for the radial resonance frequency to be as high as possible, which calls for a coupler of small diameter. For practical reasons, the diameter of the coupler should be not less than the diameter of the diaphragms.

For a given coupler, however, it is possible to raise the resonance frequencies by introducing hydrogen or helium into the coupler instead of air (see 7.3.2). Theoretically it should then be possible to extend the upper usable frequency of the coupler by a factor equal to the ratio of the speed of sound in hydrogen (helium) and air. It should, however, be noticed that the wave velocity in the diaphragm of the microphones is almost independent of the gas in the coupler and thus not increased by the same factor as the speed of sound in the enclosed gas.

An important quantity in reciprocity calibration using a closed coupler is the acoustic transfer impedance  $\underline{Z}_{a,12}$  of the total system (see 5.2 and 5.4) which shall be known with a high accuracy. At frequencies where the acoustic wavelength is great compared to the dimensions of the coupler, the sound pressure distribution is uniform in the whole coupler and  $\underline{Z}_{a,12} = \underline{Z}_{a,12}$  is determined by the effective volume of the coupler, i.e. the geometrical volume of the coupler including the front cavity volumes and the equivalent volumes of the microphones (see equation (3)). At frequencies where the acoustic wavelength cannot be considered great compared to the dimensions of the coupler, wave motion will exist and it is difficult to obtain a theoretical expression for the transfer impedance unless the coupler has a very simple form. Equation (4) expresses the transfer impedance  $\underline{Z}_{a,12}$  of a cylindrical coupler with a diameter equal to the diameter of the diaphragms of the microphones.

Methods for calculating the transfer impedance in other cases have been developed. In such cases, however, the wave motion correction should also be determined empirically.

Two groups of couplers are used in practice. Plane-wave couplers, where the diameter of the coupler is equal to the diameter of the diaphragms and large-volume couplers, where the coupler volume is very large compared to the microphone front volumes and equivalent volumes.

#### C.1 Plane-wave couplers

Plane-wave couplers have cavity diameters equal to the diameters of the microphone front cavities. The lengths of the coupler, i.e. the distance between the two diaphragms, shall be long enough to ensure plane-wave transmission, but not so long that high-frequency losses at the cavity walls need to be corrected for. Coupler cavities having length/diameter ratios within the range of 0,5 to 0,75 are recommended. Such couplers will permit calibration of laboratory standard microphones of type LS1P up to about 10 kHz and type LS2P up to about 20 kHz when filled with air.



Il convient d'utiliser équation (4) pour calculer  $Z'_{a,12}$  et il est nécessaire de déterminer tous les facteurs influençant  $Z_{a,12}$  (voir 7.3), particulièrement l'impédance acoustique des microphones, avec une grande exactitude.

Des dimensions recommandées pour des coupleurs en ondes planes sont données dans le tableau C.1 et par la figure C.1.

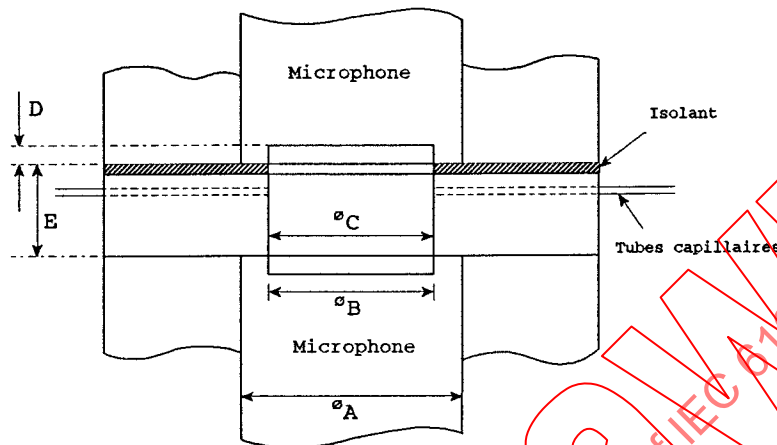


Figure C.1 - Configuration mécanique des coupleurs en ondes planes

Tableau C.1 - Dimensions nominales pour les coupleurs en ondes planes

Dimensions en millimètres

Dimensions	Microphones étalons de laboratoire		
Symbole	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
øA	23,77	13,2	12,15
øB	18,6	9,3	9,8
øC	18,6	9,3	9,8
D	1,95	0,5	0,7
E	6,5 - 8,5	3,5 - 6	3,5 - 6

## C.2 Coupleurs de grands volumes

Les coupleurs de grands volumes ont un volume plus grand que les coupleurs en ondes planes et les dimensions sont choisies pour qu'une diminution de pression sur la membrane due au mode de propagation radiale soit partiellement compensée par l'accroissement de pression dû au mode de propagation longitudinal. Le rapport optimal entre la longueur et le diamètre est de l'ordre de 0,3 et dépend de la profondeur des cavités frontales des microphones.

De tels coupleurs permettent l'étalonnage des microphones étalons de laboratoire de type LS1P jusqu'à environ 2,5 kHz et de type LS2P jusqu'à environ 5 kHz quand ils sont remplis d'air en utilisant une correction de propagation déterminée empiriquement. Quand une grande exactitude est nécessaire, il est recommandé de déterminer la correction de propagation individuellement pour chaque coupleur utilisé puisque le mode de propagation dans le coupleur est très sensible aux dimensions.

Equation (4) should be used to calculate  $Z_{a,12}$  and it is necessary to determine all the factors influencing  $Z_{a,12}$  (see 7.3), in particular the acoustic impedance of the microphones with a high accuracy.

Recommended dimensions for plane-wave couplers are given in table C.1 and figure C.1.

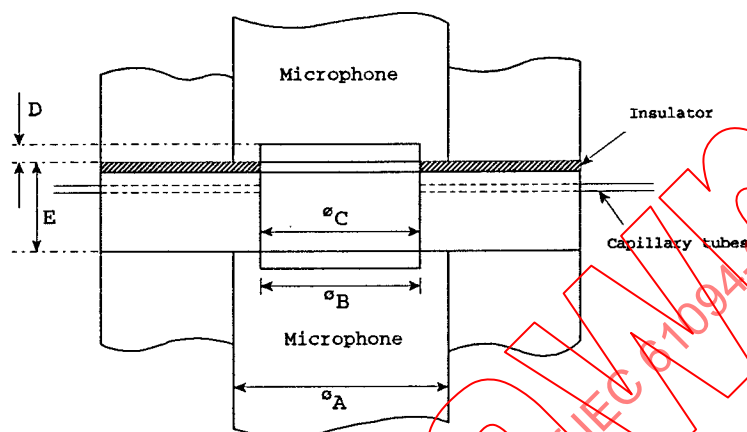


Figure C.1 - Mechanical configuration of plane-wave couplers

Table C.1 - Nominal dimensions for plane-wave couplers

Dimensions in millimetres			
Dimensions	Laboratory standard microphones		
Symbol	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
øA	23,77	13,2	12,15
øB	18,6	9,3	9,8
øC	18,6	9,3	9,8
D	1,95	0,5	0,7
E	6,5 - 8,5	3,5 - 6	3,5 - 6

## C.2 Large-volume couplers

Large-volume couplers have a larger volume than plane-wave couplers and the dimensions are so selected that the pressure decrease on the diaphragm due to the radial modes is partly cancelled by the pressure increase due to the longitudinal mode. The optimal length/diameter ratio is about 0,3 and depends upon the depth of the front cavities of the microphones.

Such couplers will permit the calibration of laboratory standard microphones of type LS1P up to about 2,5 kHz and of type LS2P up to about 5 kHz when filled with air and using an empirically determined wave-motion correction. When a high accuracy is necessary, it is recommended to determine the wave-motion correction for the individual coupler used, since the mode pattern in the coupler is very sensitive to dimensions.

Il convient d'utiliser équation (3) pour calculer  $Z_{a,12}$  et il est seulement nécessaire de déterminer la somme du volume de la cavité frontale et du volume équivalent des microphones.

Des dimensions recommandées pour des coupleurs de grands volumes sont données dans le tableau C.2 et par la figure C.2.

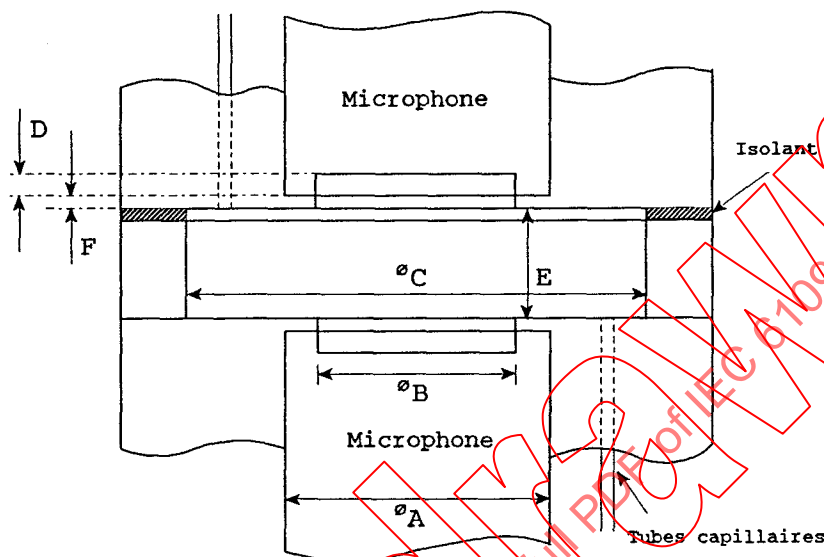


Figure C.2 - Configuration mécanique des coupleurs de grands volumes

Tableau C.2 - Dimensions nominales et tolérances pour les coupleurs de grands volumes

Dimensions en millimètres			
Dimensions	Microphones étalons de laboratoire		
Symbole	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
$\varnothing A$	23,77	13,2	12,15
$\varnothing B$	18,6	9,3	9,8
$\varnothing C$	$42,88 \pm 0,03$	$18,3 \pm 0,03$	$18,3 \pm 0,03$
D	1,95	0,5	0,7
E	$12,55 \pm 0,03$	$3,5 \pm 0,03$	$3,5 \pm 0,03$
F	$0,8 \pm 0,03$	$0,4 \pm 0,03$	$0,4 \pm 0,03$

Le tableau C.3 indique les corrections de propagation typiques pour le coupleur de grand volume utilisé avec les microphones de type LS1P. Ces corrections sont à ajouter au niveau d'efficacité en pression déterminé quand le coupleur est rempli d'air et peuvent être utilisées dans le cas où il n'est pas pratique de déterminer les corrections de propagation pour le coupleur particulier et les microphones utilisés lors d'un étalonnage. Lorsque le coupleur est rempli d'hydrogène, les mêmes corrections peuvent être utilisées à condition que l'échelle des fréquences soit multipliée par un facteur égal au rapport entre la célérité du son dans le mélange ayant la concentration donnée en hydrogène et la célérité du son dans l'air.

Equation (3) should be used to calculate  $Z'_{a,12}$  and it is only necessary to determine the sum of the front cavity volume and the equivalent volume of the microphones.

Recommended dimensions for large-volume couplers are given in table C.2 and figure C.2.

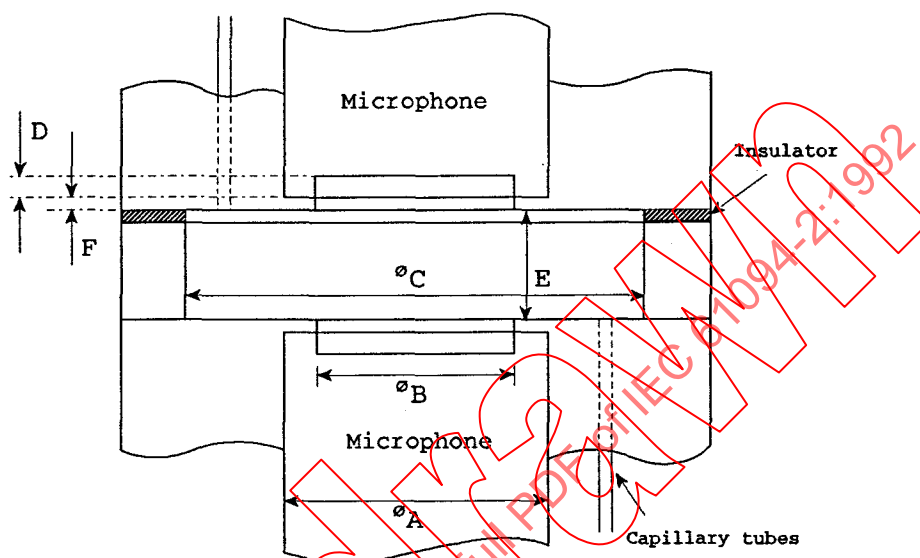


Figure C.2 - Mechanical configuration of large-volume couplers

Table C.2 - Nominal dimensions and tolerances for large-volume couplers

Dimensions in millimetres			
Dimensions	Laboratory standard microphones		
Symbol	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
$\phi A$	23,77	13,2	12,15
$\phi B$	18,6	9,3	9,8
$\phi C$	$42,88 \pm 0,03$	$18,3 \pm 0,03$	$18,3 \pm 0,03$
D	1,95	0,5	0,7
E	$12,55 \pm 0,03$	$3,5 \pm 0,03$	$3,5 \pm 0,03$
F	$0,8 \pm 0,03$	$0,4 \pm 0,03$	$0,4 \pm 0,03$

Table C.3 provides representative wave-motion corrections for the large-volume coupler used with type LS1P microphones. These corrections are to be added to the pressure sensitivity level determined when the coupler is filled with air, and may be applied in cases where it is not practical to determine the wave-motion corrections for the individual coupler and microphones used during a calibration. When the coupler is filled with hydrogen, the same corrections can be used provided the frequency scale is multiplied by a factor equal to the ratio of the speed of sound propagation in the existing hydrogen concentration to the corresponding speed in air.

Tableau C.3 - Corrections de propagation déterminées expérimentalement pour le coupleur de grand volume rempli d'air utilisé avec les microphones de type LS1P

Fréquence (Hz)	Correction (dB)
$\leq 800$	0,000
1 000	-0,002
1 250	-0,013
1 600	-0,034
2 000	-0,060
2 500	-0,087

#### Bibliographie

[C.1] Jacobsen, F.

An improvement of the 20 cm<sup>3</sup> coupler for reciprocity calibration of microphones, *Acustica* 38, 1977, pp. 151-153.

[C.2] Miura, H. et Matsui, E.

On the analysis of the wave motion in a coupler for the pressure calibration of laboratory standard microphones. *J. Acoust. Soc. Japan* 30, 1974, pp. 639-646.

Table C.3 - Experimentally determined wave-motion corrections for the air-filled large-volume coupler used with type LS1P microphones

Frequency (Hz)	Correction (dB)
800 and below	0,000
1 000	-0,002
1 250	-0,013
1 600	-0,034
2 000	-0,060
2 500	-0,087

Literature

[C.1] Jacobsen, F.

An improvement of the 20 cm<sup>3</sup> coupler for reciprocity calibration of microphones. *Acustica* 38, 1977, pp. 151-153.

[C.2] Miura, H. and Matsui, E.

On the analysis of the wave motion in a coupler for the pressure calibration of laboratory standard microphones. *J. Acoust. Soc. Japan* 30, 1974, pp. 639-646.

## Annexe D (informative)

### Influence de l'environnement sur l'efficacité des microphones

Cette annexe donne des informations sur l'influence de la pression statique et de la température sur l'efficacité des microphones.

#### D.1 Généralités

L'efficacité d'un microphone à condensateur est en principe inversement proportionnelle à l'impédance acoustique du microphone. Dans une représentation à paramètres localisés, l'impédance est donnée par un circuit série formé de l'impédance de la membrane (due principalement à sa masse et à son élasticité) et de l'impédance de l'air enfermé derrière la membrane.

Cette dernière impédance est principalement déterminée par trois éléments:

- le film d'air compris entre la membrane et l'électrode arrière produisant une perte et une masse;
- l'air situé dans les trous ou les fentes de l'électrode arrière produisant une perte et une masse;
- l'air situé dans la cavité derrière l'électrode arrière agissant aux fréquences basses comme une élasticité mais aux fréquences élevées comme une masse à cause de la propagation dans la cavité.

Les détails de construction du microphone déterminent l'importance relative de ces trois composantes. La masse volumique et la viscosité de l'air sont considérées comme des fonctions linéaires de la température et/ou de la pression statique. En conséquence, l'impédance acoustique du microphone dépend aussi de la pression statique et de la température. Les coefficients de pression statique et de température qui en résultent pour le microphone sont alors déterminés respectivement par le rapport de l'impédance acoustique dans les conditions ambiantes de référence à l'impédance acoustique à la pression statique et à la température considérées.

#### D.2 Influence de la pression statique

La masse et l'élasticité de l'air enfermé dans la cavité arrière dépendent toutes les deux de la pression statique alors que la résistance peut être considérée comme indépendante de la pression statique. Le coefficient de pression statique varie généralement en fonction de la fréquence comme indiqué sur la figure D.1. Pour des fréquences supérieures à environ  $0,5 f_0$  ( $f_0$  étant la fréquence de résonance du microphone), la variation en fonction de la fréquence dépend fortement de la propagation dans la cavité située derrière l'électrode arrière. En général, le coefficient de variation en pression dépend des détails de construction dans la forme de l'électrode arrière, et de la cavité arrière et les valeurs réelles peuvent différer considérablement pour deux microphones de fabrications différentes bien que ces microphones puissent appartenir au même type, par exemple LS1P. En conséquence, il n'y a pas lieu d'appliquer les valeurs des coefficients de pression donnés par la figure D.1 à des microphones individuels.