

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
1094-3

Première édition
First edition
1995-11

Microphones de mesure

Partie 3:

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

Measurement microphone

Part 3:

Primary method for free-field calibration
of laboratory standard microphones
by the reciprocity technique

© CEI 1995 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 pro-
cédé, 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

Q

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application	6
2 Références normatives	6
3 Définitions	6
3.1 Microphone réciproque	6
3.2 Argument de l'efficacité en champ libre d'un microphone	8
3.3 Centre acoustique d'un microphone	8
3.4 Transducteur ponctuel équivalent	8
3.5 Impédance électrique de transfert	8
3.6 Impédance acoustique de transfert	8
3.7 Axe principal d'un microphone	8
3.8 Conditions de champ libre	8
4 Conditions d'environnement de référence	8
5 Principe de l'étalonnage en champ libre par réciprocité	10
5.1 Principe général	10
5.2 Expressions de base	10
5.3 Technique de la tension insérée	12
5.4 Caractéristiques en champ libre d'un microphone récepteur	12
5.5 Caractéristiques en champ libre d'un microphone émetteur	14
5.6 Procédure de la réciprocité	16
5.7 Expressions finales de l'efficacité en champ libre	16
6 Grandeurs d'influence sur l'efficacité en champ libre	18
6.1 Généralités	18
6.2 Tension de polarisation	18
6.3 Configuration de référence du blindage	18
6.4 Conditions acoustiques	18
6.5 Position du centre acoustique d'un microphone	20
6.6 Influence des conditions d'environnement	20
7 Composantes de l'incertitude d'étalonnage	22
7.1 Généralités	22
7.2 Impédance électrique de transfert	22
7.3 Atténuation du son dans l'air	22
7.4 Écarts par rapport aux conditions de champ idéales	24
7.5 Tension de polarisation	24
7.6 Grandeurs physiques	24
7.7 Incertitude sur le niveau d'efficacité en champ libre	24
Annexes	
A Valeurs de la position des centres acoustiques des microphones	26
B Valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air	28
C Influence de l'environnement sur l'efficacité des microphones	32

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Definitions	7
3.1 Reciprocal microphone	7
3.2 Phase angle of free-field sensitivity of a microphone	9
3.3 Acoustic centre of a microphone	9
3.4 Equivalent point-transducer	9
3.5 Electrical transfer impedance	9
3.6 Acoustical transfer impedance	9
3.7 Principal axis of a microphone	9
3.8 Free-field conditions	9
4 Reference environmental conditions	9
5 Principles of free-field calibration by reciprocity	11
5.1 General principle	11
5.2 Basic expressions	11
5.3 Insert voltage technique	13
5.4 Free-field receiving characteristics of a microphone	13
5.5 Free-field transmitting characteristics of a microphone	15
5.6 Reciprocity procedure	17
5.7 Final expressions for the free-field sensitivity	17
6 Factors influencing the free-field sensitivity	19
6.1 General	19
6.2 Polarizing voltage	19
6.3 Ground shield reference configuration	19
6.4 Acoustic conditions	19
6.5 Position of the acoustic centre of a microphone	21
6.6 Dependence on environmental conditions	21
7 Calibration uncertainty components	23
7.1 General	23
7.2 Electrical transfer impedance	23
7.3 Attenuation of sound in air	23
7.4 Deviations from ideal field conditions	25
7.5 Polarizing voltage	25
7.6 Physical quantities	25
7.7 Uncertainty on free-field sensitivity level	25
Annexes	
A Values for the position of the acoustic centres of microphones.	27
B Values of the air attenuation coefficients	29
C Environmental influence on the sensitivity of microphones.	33

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MICROPHONES DE MESURE

Partie 3: Méthode primaire pour l'étalonnage en champ libre des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 1094-3 a été établie par le comité d'études 29 de la CEI: Electro-acoustique.

La présente partie de la CEI 1094 annule et remplace la CEI 486 parue en 1974.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
29/294/DIS	29/311/RVD

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

La CEI 1094 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Microphones de mesure*:

- Partie 1: 1992, Spécifications des microphones étalons de laboratoire
- Partie 2: 1992, Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité
- Partie 3: 1995, Méthode primaire pour l'étalonnage en champ libre des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité
- Partie 4: 1995, Spécifications des microphones étalons de travail

Les annexes A, B et C sont données uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MEASUREMENT MICROPHONES

**Part 3: Primary method for free-field calibration
of laboratory standard microphones
by the reciprocity technique**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a world-wide organization for standardization comprising all national electrotechnical Committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.

International Standard IEC 1094-3 has been prepared by IEC technical committee 29: Electroacoustics.

This part of IEC 1094 cancels and replaces IEC 486 published in 1974.

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

DIS	Report on voting
29/294/DIS	29/311/RVD

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

IEC 1094 consists of the following parts, under the general title *Measurement microphones*:

- Part 1: 1992, Specifications for laboratory standard microphones
- Part 2: 1992, Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique
- Part 3: 1995, Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique
- Part 4: 1995, Specifications for working standard microphones.

Annexes A, B and C are for information only.

MICROPHONES DE MESURE

Partie 3: Méthode primaire pour l'étalonnage en champ libre 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. Les principes de la méthode sont applicables à d'autres types de microphones. En particulier, les microphones qui répondent aux prescriptions de la CEI 1094-1, quand ils sont munis d'un adaptateur spécial, peuvent aussi être étalonnés selon cette norme quand l'adaptateur est enlevé.

La présente partie de la CEI 1094 spécifie une méthode primaire de détermination de l'efficacité en champ libre de manière à établir une base reproductible et exacte pour la mesure de la pression acoustique dans des conditions de champ libre.

La présente partie de la CEI 1094 est destinée à être utilisée dans des laboratoires ayant du personnel hautement expérimenté et un équipement spécialisé.

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, 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 indiqués 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 50 (801): 1994, *Vocabulaire électrotechnique international (VEI) - Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique*

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

CEI 1094-2: 1992, *Microphones de mesure - Partie 2: Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité*

ISO 9613-1: 1993, *Acoustique - Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre - Partie 1: Calcul de l'absorption atmosphérique*

ISO: 1993, *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*

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 directe, sortie en circuit ouvert (voir 206 de la CEI 27-2) sont égales en valeur absolue.

MEASUREMENT MICROPHONES

Part 3: Primary method for free-field 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. The principles of the method are applicable to other types of microphones. In particular, microphones which fulfil the requirements of IEC 1094-1, when fitted with a special adaptor, may also be calibrated according to this standard when the adaptor is removed.

This part of IEC 1094 specifies a primary method of determining the free-field sensitivity so as to establish a reproducible and accurate basis for the measurement of sound pressure under free-field conditions.

This part of IEC 1094 is intended for use by laboratories with highly experienced staff and specialized equipment.

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 indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

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

IEC 50 (801): 1994, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 801: Acoustics and electro-acoustics*

IEC 1094-1: 1992, *Measurement microphones - Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*

IEC 1094-2: 1992, *Measurement microphones - Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*

ISO 9613-1: 1993, *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*

ISO: 1993, *Guide to the expression of uncertainty of measurements*

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 argument de l'efficacité en champ libre d'un microphone: Pour une onde progressive plane sinusoïdale de fréquence donnée, pour une direction spécifiée de l'incidence de l'onde acoustique et pour des conditions d'environnement données, angle de phase entre la tension à circuit ouvert et la pression acoustique qui existerait à l'emplacement du centre acoustique du microphone en l'absence de celui-ci.

Unité : degré ou radian (° ou rad)

3.3 centre acoustique d'un microphone: Pour un transducteur émetteur acoustique, pour un signal sinusoïdal de fréquence donnée, et pour une direction et une distance spécifiées, point d'où semblent diverger les surfaces d'onde approximativement sphériques qu'on observe dans une petite région autour du point d'observation.

NOTES

- 1 Le centre acoustique d'un transducteur réciproque utilisé comme récepteur coïncide avec le centre acoustique de ce transducteur utilisé comme émetteur.
- 2 Cette définition s'applique seulement aux régions du champ acoustique où les surfaces d'ondes sont sphériques ou approximativement sphériques.

3.4 transducteur ponctuel équivalent: Transducteur qui, situé à l'emplacement du centre acoustique du microphone, possède les caractéristiques d'émission et de réception de ce microphone pour une direction et une gamme de distances données.

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

Unité: ohm (Ω)

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

3.6 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 comme récepteur par le flux de vitesse en court-circuit acoustique produit par le microphone utilisé comme émetteur.

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

3.7 axe principal d'un microphone: Ligne passant par le centre de la membrane du microphone et perpendiculaire à celle-ci.

3.8 conditions de champ libre: Conditions qui prédominent quand une onde acoustique peut se propager librement sans perturbation d'aucune sorte.

4 Conditions d'environnement de référence

Les conditions d'environnement de référence sont:

- température $t_r = 23,0 \text{ }^\circ\text{C}$;
- pression statique $p_{s,r} = 101,325 \text{ kPa}$;
- taux d'humidité relative $H_r = 50 \text{ \%}$.

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

3.2 phase angle of free-field sensitivity of a microphone: For a sinusoidal plane progressive wave of given frequency, for a specified direction of sound incidence and for given environmental conditions, the phase angle between the open-circuit voltage and the sound pressure that would exist at the position of the acoustic centre of the microphone in the absence of the microphone.

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

3.3 acoustic centre of a microphone: For a sound-emitting transducer, for a sinusoidal signal of given frequency and for a specified direction and distance, the point from which the approximately spherical wavefronts, as observed in a small region around the observation point, appear to diverge.

NOTES

- 1 The acoustic centre of a reciprocal transducer when used as a receiver is coincident with the acoustic centre when used as a transmitter.
- 2 This definition only applies to regions of the sound field where spherical, or approximately spherical wavefronts are observed.

3.4 equivalent point-transducer: Transducer which, when located at the position of an acoustic centre of a microphone, simulates the transmitting and receiving characteristics of that microphone for a given direction and range of distance.

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

Unit: ohm (Ω)

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

3.6 acoustical 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 receiver by the short-circuit volume velocity produced by the microphone used as transmitter.

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

3.7 principal axis of a microphone: Line through the centre of and perpendicular to the diaphragm of the microphone.

3.8 free-field conditions: Free-field conditions prevail when a sound wave can propagate freely without disturbances of any kind.

4 Reference environmental conditions

The reference environmental conditions are:

- temperature $t_r = 23,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- static pressure $p_{s,r} = 101,325 \text{ kPa}$;
- relative humidity $H_r = 50 \text{ \%}$.

NOTE - The reference temperature is chosen to be $23,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ because practical considerations require that most calibrations be carried out at, or near, this temperature.

5 Principe de l'étalonnage en champ libre 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'entre eux devant être réciproque.

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

5.1.1 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones

Considérons deux microphones couplés acoustiquement dans des conditions de champ libre. 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 champ libre 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 champ libre de chacun des trois microphones.

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 dans des conditions de champ libre et le produit des efficacités en champ libre 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, dans des conditions de champ libre identiques. Le rapport des deux tensions de sortie est alors égal au rapport des deux efficacités en champ libre. Ainsi, à partir du produit et du rapport des efficacités en champ libre des deux microphones, on peut déduire une expression de l'efficacité en champ libre pour chacun d'eux.

NOTE - Pour obtenir le rapport des efficacités en champ libre, une méthode de comparaison directe peut être utilisée et la source sonore auxiliaire peut être un autre transducteur ou un troisième microphone ayant des caractéristiques mécaniques ou acoustiques 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:

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

où

\underline{p} est la pression acoustique aux bornes acoustiques (membrane) du microphone;
 \underline{U} est la tension aux bornes électriques du microphone;
 \underline{q} est le flux de vitesse à travers les bornes acoustiques (membrane) du microphone;
 \underline{i} est le courant à travers les bornes électriques du microphone;
 $z_{11} = \underline{Z}_b$ est l'impédance électrique du microphone quand la membrane est bloquée;
 $z_{22} = \underline{Z}_a$ est l'impédance acoustique du microphone quand il n'est pas chargé électriquement;
 $z_{12} = z_{21} = \underline{M}_p \underline{Z}_a$ est égal aux impédances de transfert inverse et direct, \underline{M}_p étant l'efficacité en pression du microphone.

5 Principles of free-field 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 shall 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 under free-field conditions. 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 free-field sensitivities of the two coupled microphones can be determined. Using pair-wise combinations of the microphones (1), (2) and (3), three such mutually independent products are available, from which an expression for the free-field sensitivity of each of the three microphones can be derived.

5.1.2 General principles using two microphones and an auxiliary sound source

First, let the two microphones be connected acoustically under free-field conditions, and the product of the free-field 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 under identical free-field conditions. The ratio of the two output voltages will then equal the ratio of the two free-field sensitivities. Thus, from the product and the ratio of the free-field sensitivities of the two microphones, an expression for the free-field sensitivity of each of the two microphones can be derived.

NOTE - In order to obtain the ratio of free-field sensitivities, a direct comparison method may be used, and the auxiliary sound source may be another transducer or 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:

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

where

p is the sound pressure at the acoustic terminals (diaphragm) of the microphone;
 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;
 $Z_{11} = Z_e$ is the electrical impedance of the microphone when the diaphragm is blocked;
 $Z_{22} = Z_a$ is the acoustic impedance of the microphone when the electrical terminals are unloaded;
 $Z_{12} = Z_{21} = M_p Z_a$ is equal to the reverse and the forward transfer impedances, M_p being the pressure sensitivity of the microphone.

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

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

qui constituent les équations de réciprocité du microphone.

Quand la pression acoustique \underline{p} n'est pas uniforme sur toute la surface de la membrane, comme c'est le cas aux fréquences élevées quand le microphone est soumis à une onde plane progressive, l'emplacement des bornes acoustiques est donné au moyen du transducteur ponctuel équivalent au microphone. Dans ce cas, l'équation (1) est également valable pour le microphone réel avec une interprétation spéciale de \underline{p} (voir 5.4 et 5.5).

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, connecté à une impédance de charge. Pour mesurer sa tension à circuit ouvert, une impédance petite par rapport à l'impédance de charge est placée 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 celle qui résulte de la pression acoustique sur le microphone; la tension à circuit ouvert est alors égale en module à la tension d'étalonnage.

5.4 Caractéristiques en champ libre d'un microphone récepteur

Considérons un microphone soumis à une onde plane progressive de pression acoustique \underline{p}_o . Le circuit équivalent au microphone est donné par la figure 1, où \underline{p}'_o est la pression acoustique quand la membrane est bloquée et \underline{p} la pression acoustique réellement appliquée aux bornes acoustiques du microphone. $Z_{a,r}$ est l'impédance acoustique de rayonnement du microphone.

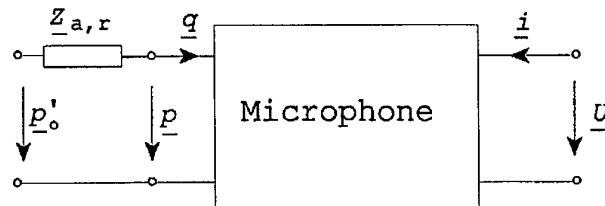


Figure 1 - Circuit équivalent pour un microphone récepteur dans un champ acoustique

\underline{p}'_o est relié à \underline{p}_o par:

$$\frac{\underline{p}'_o}{\underline{p}_o} = \underline{S}(f,\theta)$$

où $\underline{S}(f,\theta)$, facteur de diffraction, est fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence de l'onde acoustique sur la membrane du microphone.

$\underline{S}(f,\theta)$ dépend de la configuration géométrique du microphone.

Equations (1) may then be rewritten as:

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

which constitute the equations of reciprocity for the microphone.

When the sound pressure p is not uniform over the surface of the diaphragm, as will be the case at high frequencies when the microphone is located in a plane progressive wave, the location of the acoustic terminals is given through the equivalent point-transducer simulating the microphone. In this case, equation (1) will also be valid for the real microphone through a special interpretation of p , see 5.4 and 5.5.

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 which is small compared with the load impedance is connected in series with 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 Free field receiving characteristics of a microphone

Let a microphone be placed in a progressive plane wave of sound pressure p_o . The equivalent circuit of the microphone is given in figure 1, where p'_o is the sound pressure when the diaphragm is blocked and p the actual sound pressure at the acoustic terminals of the microphone. $Z_{a,r}$ is the acoustic radiation impedance of the microphone.

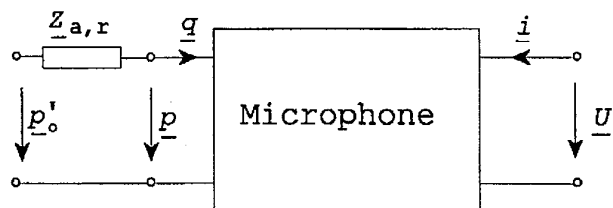


Figure 1 – Equivalent circuit for a receiving microphone in a sound field

Let p'_o be related to p_o through:

$$\frac{p'_o}{p_o} = S(f, \theta)$$

where $S(f, \theta)$, the scattering factor, is a function of frequency and angle of incidence of the sound wave impinging on the diaphragm of the microphone.

$S(f, \theta)$ depends on the geometrical configuration of the microphone.

Comme $p = p'_o - Z_{a,r} q$, les équations (1a) du circuit à deux accès équivalent au microphone peuvent s'écrire:

$$\begin{aligned} U &= Z_a i + M_p Z_a q \\ p'_o &= M_p Z_a i + (Z_a + Z_{a,r}) q \end{aligned} \quad (2)$$

et, à partir de la définition de base, l'efficacité en champ libre est donnée par:

$$M_r = \left(\frac{U}{p_o} \right)_{i,o} = M_p \frac{Z_a}{Z_a + Z_{a,r}} S(f,\theta) \quad (3)$$

La relation (3) montre que la différence entre l'efficacité en pression et l'efficacité en champ libre est déterminée non seulement par la géométrie du microphone au travers du facteur de diffraction $S(f,\theta)$, mais aussi par la relation entre l'impédance acoustique du microphone et l'impédance de rayonnement.

5.5 Caractéristiques en champ libre d'un microphone émetteur

Soit un microphone utilisé comme émetteur dans des conditions de champ libre. Le circuit équivalent à ce microphone est donné par la figure 2.

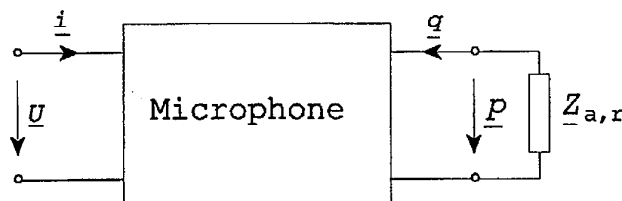


Figure 2 - Circuit équivalent pour un microphone émetteur dans des conditions de champ libre

Comme $p = -Z_{a,r} q$, les équations (1) du circuit à deux accès équivalent au microphone peuvent être écrites:

$$\begin{aligned} U &= Z_a i + M_p Z_a q \\ 0 &= M_p Z_a i + (Z_a + Z_{a,r}) q \end{aligned} \quad (4)$$

de sorte que

$$-q = \frac{M_p Z_a}{Z_a + Z_{a,r}} i = \frac{M_r}{S(f,\theta)} i$$

On peut déduire du principe général de réciprocité que le transducteur ponctuel équivalent au microphone se comporte, en un point éloigné, distant de d , comme une source simple ayant un débit acoustique $-q S(f,\theta) = M_r i$, de sorte que la pression acoustique p_o produite est alors:

$$p_o = j \frac{\rho f}{2d} M_r i e^{-\gamma d} e^{j\omega t} \quad (5)$$

où

$\gamma = \alpha + j\beta$ est l'exposant linéique de propagation acoustique.

NOTE - La démonstration de l'équation (5) donnée ci-dessus est faite à partir d'une représentation du microphone par un modèle à constantes localisées (voir équation (1)). Une démonstration plus rigoureuse peut être obtenue en utilisant une forme intégrale pour les équations du microphone.

As $p = p'_o - Z_{a,r} q$, the two-port equations of the microphone (1a) can be written as:

$$\begin{aligned} U &= Z_a i + M_p Z_a q \\ p'_o &= M_p Z_a i + (Z_a + Z_{a,r}) q \end{aligned} \quad (2)$$

and thus, from the basic definition, the free-field sensitivity is given by:

$$M_f = \left(\frac{U}{p_o} \right)_{i=0} = M_p \frac{Z_a}{Z_a + Z_{a,r}} S(f, \theta) \quad (3)$$

Equation (3) shows that the difference between the pressure and the free-field sensitivity is determined not only by the geometry of the microphone through the scattering factor $S(f, \theta)$ but also by the relation between the acoustic impedance of the microphone and the radiation impedance.

5.5 Free-field transmitting characteristics of a microphone

Let a microphone be used as a transmitter under free-field conditions. The equivalent circuit of the microphone is given in figure 2.

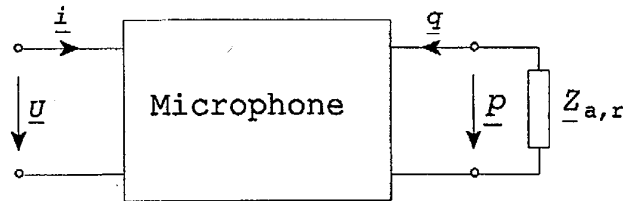


Figure 2 – Equivalent circuit for a transmitting microphone under free-field conditions

As $p = -Z_{a,r} q$, the two-port equations of the microphone (1) can be written as:

$$\begin{aligned} U &= Z_a i + M_p Z_a q \\ 0 &= M_p Z_a i + (Z_a + Z_{a,r}) q \end{aligned} \quad (4)$$

so that:

$$-q = \frac{M_p Z_a}{Z_a + Z_{a,r}} i = \frac{M_f}{S(f, \theta)} i$$

From the general principle of reciprocity, it can be deduced that, at a remote point, the equivalent point-transducer will act as a simple source of strength $-q S(f, \theta) = M_f i$ and the sound pressure p_o at the distance d between this point and the equivalent point-transducer will then be:

$$p_o = j \frac{\rho f}{2d} M_f i e^{-\gamma d} e^{j\omega t} \quad (5)$$

where

$\gamma = \alpha + j\beta$ is the complex propagation coefficient.

NOTE - The derivation of equation (5) given above is based on a lumped parameter representation of the microphone (see equation (1)). A more rigorous derivation can be obtained by using an integral form of representation of the equations of the microphone.

5.6 Procédure de la réciprocité

Soit deux microphones (1) et (2) d'efficacités en champ libre $M_{t,1}$ et $M_{t,2}$ dont les axes principaux sont confondus et placés face à face dans un champ libre. Un courant i_1 traversant les bornes électriques du microphone (1) produira, à une distance d du centre acoustique du microphone, une pression acoustique p_o , dans des conditions de champ libre, donnée par l'équation (5). Lorsqu'on introduit le microphone (2) dans le champ sonore et en supposant qu'aucune interaction n'a lieu entre les deux microphones, la tension à circuit ouvert du microphone (2) sera:

$$U_2 = M_{t,2} p_o = j \frac{\rho f}{2d_{12}} M_{t,1} M_{t,2} i_1 e^{-\gamma d_{12}}$$

d_{12} étant la distance entre les centres acoustiques des microphones (1) et (2).

Le produit des efficacités en champ libre est donc donné par:

$$M_{t,1} M_{t,2} = j \frac{2d_{12}}{\rho f} \frac{U_2}{i_1} e^{\gamma d_{12}} \quad (6)$$

NOTE - Le membre de droite de l'équation (6) est le quotient de l'impédance électrique de transfert du système par l'impédance acoustique de transfert entre les positions des centres acoustiques en l'absence des microphones.

5.7 Expressions finales de l'efficacité en champ libre

5.7.1 Méthode utilisant trois microphones

L'impédance électrique de transfert U_2/i_1 (voir 5.6) est notée $Z_{e,12}$ avec des expressions similaires pour les autres couples de microphones. L'expression finale de l'efficacité en champ libre du microphone (1) est:

$$M_{t,1} = \left(\frac{2}{\rho f} \frac{d_{12} d_{31}}{d_{23}} \frac{Z_{e,12} Z_{e,31}}{Z_{e,23}} e^{\gamma(d_{12} + d_{31} - d_{23})} \right)^{1/2} \quad (7)$$

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

Si on ne s'intéresse qu'au module de l'efficacité en champ libre, il suffit de déterminer le module de chaque impédance électrique de transfert et de remplacer γ par α .

L'argument de l'efficacité en champ libre de chaque microphone peut être déterminé à partir de l'argument de chaque impédance électrique de transfert et de γ , en tenant compte de considérations physiques destinées à lever l'ambiguïté de 180° sur la valeur de l'argument.

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 champ libre est:

$$M_{t,1} = \left(\frac{M_{t,1}}{M_{t,2}} \frac{2d_{12}}{\rho f} Z_{e,12} e^{\gamma d_{12}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

où le rapport des deux efficacités en champ libre est mesuré par comparaison à la source auxiliaire (voir 5.1.2).

Si on ne s'intéresse qu'au module de l'efficacité en champ libre, il suffit de déterminer le module de l'impédance électrique de transfert et le rapport des efficacités en champ libre, et de remplacer γ par α .

L'argument de l'efficacité en champ libre de chaque microphone peut être déterminé à partir de l'argument de l'impédance électrique de transfert et le rapport des efficacités en champ libre et de γ , en tenant compte de considérations physiques destinées à lever l'ambiguïté de 180° sur la valeur de l'argument.

5.6 Reciprocity procedure

Let the microphones (1) and (2) with the free-field sensitivities $M_{f,1}$ and $M_{f,2}$ be situated in a free-field facing each other and with coincident principal axes. A current i_1 through the electrical terminals of microphone (1) will produce a sound pressure p_o given by equation (5) at a distance d from the acoustic centre of the microphone under free-field conditions. When introducing microphone (2) into the sound field and assuming no interaction takes place between the two microphones, the open-circuit voltage of microphone (2) will be:

$$U_2 = M_{f,2} p_o = j \frac{\rho f}{2d_{12}} M_{f,1} M_{f,2} I_1 e^{-\gamma d_{12}}$$

d_{12} being the distance between the acoustic centres of microphone (1) and (2).

Thus, the product of the free-field sensitivities is given by:

$$M_{f,1} M_{f,2} = -j \frac{2d_{12}}{\rho f} \frac{U_2}{I_1} e^{\gamma d_{12}} \quad (6)$$

NOTE - The right hand side of equation (6) is the ratio of the electrical transfer impedance of the system and the acoustical transfer impedance between the positions of the acoustic centres in the absence of the microphones.

5.7 Final expressions for the free-field sensitivity

5.7.1 Method using three microphones

Let the electrical transfer impedance U_2/I_1 (see 5.6) be denoted by $Z_{e,12}$ with similar expressions for other pairs of microphones. The final expression for the free-field sensitivity of microphone (1) is:

$$M_{f,1} = \left(\frac{2}{\rho f} \frac{d_{12} d_{31}}{d_{23}} \frac{Z_{e,12} Z_{e,31}}{Z_{e,23}} e^{\gamma(d_{12} + d_{31} - d_{23})} \right)^{1/2} \quad (7)$$

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

If only the modulus of the free-field sensitivity is of interest, only the modulus of each electrical transfer impedance need be determined and α can be substituted for γ .

The phase angle of the free-field sensitivity for each microphone can be determined from the phase angles of the electrical transfer impedances and γ combined, with physical considerations to resolve the 180° phase ambiguity in this 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 free-field sensitivity is:

$$M_{f,1} = \left(\frac{M_{f,1}}{M_{f,2}} \frac{2d_{12}}{\rho f} Z_{e,12} e^{\gamma d_{12}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

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

If only the modulus of the free-field sensitivity is of interest, only the modulus of the electrical transfer impedance and the ratio of the free-field sensitivities need be determined, and α can be substituted for γ .

The phase angle of the free-field sensitivity for each microphone can be determined from the phase angle of the electrical transfer impedance, the ratio of free-field sensitivities and γ combined, with physical considerations to resolve the 180° phase ambiguity in this expression.

6 Grandeurs d'influence sur l'efficacité en champ libre

6.1 Généralités

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

6.2 Tension de polarisation

L'efficacité d'un microphone étalon de laboratoire 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

Conformément à 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 feront référence 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 Conditions acoustiques

L'efficacité en champ libre d'un microphone dépend de la configuration géométrique du boîtier contenant le préamplificateur. Pour cette raison, le microphone et la configuration de référence du blindage doivent être fixés sur un cylindre dont le diamètre est égal au diamètre nominal du microphone (voir tableaux 1 et 2 de la CEI 1094-1). La longueur du cylindre doit être grande par rapport au diamètre du microphone. Une longueur au moins égale à dix fois le diamètre du microphone avec une extrémité convenablement effilée est recommandée. Cette configuration doit aussi s'appliquer au microphone émetteur.

La définition de l'efficacité en champ libre fait appel à la pression acoustique d'une onde progressive plane non perturbée. Une source acoustique placée dans des conditions de champ libre engendre des ondes sphériques qui, à une distance suffisamment grande de la source, peuvent être assimilées, dans une région limitée, à des ondes planes. Aussi, la distance entre le microphone récepteur et le microphone émetteur doit être suffisamment grande pour garantir cette approximation d'onde plane dans une région suffisante autour du microphone récepteur (voir 7.4). D'un autre côté, l'influence des réflexions sur les surfaces internes d'une salle anéchoïque croît habituellement à mesure que la distance entre les microphones augmente. De plus, la fonction $S(f, \theta)$ de l'équation (3) dépend de la nature du champ acoustique et ne peut être définie sans ambiguïté que pour une onde plane progressive idéale. Par conséquent, il est recommandé de choisir avec soin les conditions métrologiques et il peut être préférable d'effectuer des étalonnages à plusieurs distances pour estimer l'incertitude d'étalonnage imputable aux variations de ces conditions.

6 Factors influencing the free-field sensitivity

6.1 General

The free-field sensitivity of a laboratory standard microphone depends on polarizing voltage and environmental conditions. Further the definition of the free-field 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 laboratory standard 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 microphone 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 Acoustic conditions

The free-field sensitivity of a microphone depends on the geometrical configuration of the housing containing the preamplifier. For this reason, the microphone and the ground-shield configuration shall be attached to a cylinder whose diameter is equal to the nominal diameter of the microphone, see table 1 and table 2 in IEC 1094-1. The length of the cylinder shall be long compared to the diameter of the microphone. A minimum length of ten times the diameter of the microphone with a gradually tapered termination is recommended. This arrangement shall also apply to the transmitter microphone.

The definition of the free-field sensitivity of a microphone refers to the sound pressure in an undisturbed plane progressive wave. In the far field of a sound source located under free-field conditions, spherical waves are encountered which, at a sufficient distance from the source, are approximately plane waves in a limited region. Thus, the distance between the receiver microphone and the transmitter microphone shall be great enough to ensure approximately plane waves in a suitable region around the receiver microphone (see 7.4). On the other hand, the influence of reflections from the interior surfaces of an anechoic chamber usually increases as the distance between the two microphones is increased. Also the function $S(f, \theta)$ in equation (3) depends on the character of the sound field and can only be unambiguously defined for a true plane progressive wave. Therefore, the metrological conditions should be carefully chosen and it may be preferable to carry out calibrations at more than one distance to assess the calibration uncertainty attributable to dependence on these conditions.

6.5 Position du centre acoustique d'un microphone

La position du centre acoustique d'un microphone (voir 3.3) peut être déterminée à partir des mesures de la pression acoustique produite par le microphone lorsqu'il est utilisé comme source acoustique dans un champ libre en fonction de la distance r à un point de référence du microphone choisi arbitrairement. Dans une région limitée du champ lointain, la pression acoustique corrigée de l'absorption acoustique de l'air suivra une loi en $1/r$ (r étant compté par rapport au centre acoustique du microphone). Ainsi, lorsqu'on porte sur un graphique l'inverse de la valeur de la pression acoustique mesurée en fonction de la distance à un point de référence arbitrairement choisi (pour plus de commodité le centre de la membrane), une droite peut être ajustée (par exemple par la méthode des moindres carrés) ou tracée parmi les points expérimentaux. L'intersection de cette droite avec l'axe des abscisses détermine la position du centre acoustique du microphone par rapport au point de référence. Les positions des centres acoustiques servant à déterminer d_{12} (voir 5.7) doivent correspondre à l'orientation et à la distance séparant les microphones pendant l'étalonnage en champ libre.

L'annexe A contient des informations sur des valeurs typiques de la position du centre acoustique de quelques configurations de microphones.

6.6 Influence des conditions d'environnement

6.6.1 Généralités

La dépendance générale de l'efficacité en pression en fonction des conditions d'environnement est donnée en 6.5 de la CEI 1094-2. Outre cette dépendance, l'efficacité en champ libre dépend des conditions d'environnement au travers des termes intervenant dans l'équation (3). Dans cette équation, l'impédance de rayonnement est fonction de la masse volumique et de la célérité du son. De même la fonction $S(f, \theta)$ dépend de la longueur d'onde donc de la célérité du son dans l'air.

6.6.2 Pression statique

En plus de la dépendance décrite en 6.5 de la CEI 1094-2, une dépendance supplémentaire est due à la modification du rapport entre l'impédance acoustique du microphone et l'impédance de rayonnement causée par la variation de la masse volumique de l'air en fonction de la pression statique.

L'annexe C contient des informations concernant l'influence de la pression statique sur l'efficacité en champ libre des microphones étalons de laboratoire.

6.6.3 Température du microphone

En plus de la dépendance décrite en 6.5 de la CEI 1094-2, une dépendance supplémentaire est due à la modification du rapport entre l'impédance acoustique du microphone et l'impédance de rayonnement causée par la variation de la masse volumique et de la célérité du son dans l'air en fonction de la température. Une légère dépendance est aussi due à la fonction $S(f, \theta)$ selon l'équation (3) à cause de la variation de la célérité du son dans l'air avec la température.

L'annexe C contient des informations concernant l'influence de la température sur l'efficacité en champ libre 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.

6.6.4 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 été observée pour les microphones étalons de laboratoire, à condition qu'il n'y ait pas de condensation.

6.5 *Position of the acoustic centre of a microphone*

The position of the acoustic centre of a microphone, see 3.3, can be determined from measurements of the sound pressure produced by the microphone when used as a sound source in a free field, as a function of distance r from an arbitrarily chosen reference point of the microphone. In a limited region of the far field, the sound pressure, corrected for the effect of sound attenuation in air, will follow the $1/r$ -law, r being referred to the acoustic centre of the microphone. Thus, when plotting the inverse value of the measured sound pressure as a function of the distance from an arbitrarily chosen reference point of the microphone (most conveniently the centre of the diaphragm), a straight line can be fitted (e.g. by the methods of least squares) or drawn through the plotted values. The intersection of this straight line and the abscissa axis determines the position of the acoustic centre relative to the reference point. The acoustic centres used to determine d_{12} (see 5.7) shall relate to the orientation and separation used during the free-field calibrations.

Annex A contains information on typical values for the position of the acoustic centre for some microphone configurations.

6.6 *Dependence on environmental conditions*

6.6.1 *General*

The general dependence of the pressure sensitivity on environmental conditions is given in 6.5 of IEC 1094-2. In addition to this, the free-field sensitivity further depends on environmental conditions through the relation given in equation (3). In this equation, the radiation impedance is a function of density and speed of sound. Similarly the function $S(f,\theta)$ depends on the wavelength and thus on the speed of sound in air.

6.6.2 *Static pressure*

In addition to the dependence described in 6.5 of IEC 1094-2, a further dependence is caused by the impedance relations between the acoustic impedance of the microphone and its radiation impedance due to the change in the density of air with static pressure.

Annex C contains information on the influence of static pressure on the free-field sensitivity of laboratory standard microphones.

6.6.3 *Temperature of the microphone*

In addition to the dependence described in 6.5 of IEC 1094-2, a further dependence is caused by the impedance relations between the acoustic impedance of the microphone and its radiation impedance due to the change in the density and the speed of sound in air with temperature. Also a slight dependence is caused by the function $S(f,\theta)$ according to equation (3) due to the change in the speed of sound in air with temperature.

Annex C contains information on the influence of temperature on the free-field sensitivity of laboratory standard condenser microphones.

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

6.6.4 *Humidity*

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

Conformément à l'équation (3), un léger effet peut être trouvé sur l'efficacité en champ libre à cause de l'influence de l'humidité sur la masse volumique et la célérité du son dans l'air.

NOTE - La résistance superficielle du matériau isolant entre la plaque arrière et le boîtier du microphone peut être dégradée dans des conditions d'humidité excessive, particulièrement si le matériau est contaminé (voir aussi 7.5).
La résistance superficielle a un effet notable sur l'efficacité du microphone aux basses fréquences, spécialement sur la réponse en phase.

6.6.5 Conditions atmosphériques

Pour donner les résultats d'un étalonnage, il est recommandé que l'efficacité en champ libre soit ramenée dans les conditions d'environnement 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 Composantes de l'incertitude d'étalonnage

7.1 Généralités

En plus des facteurs qui affectent l'efficacité en champ libre 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 de façon connue doivent être mesurés ou calculés avec un niveau d'exactitude aussi élevé que possible, de façon à limiter 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 sur l'incertitude de la détermination de l'efficacité en champ libre 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 champ libre. Des filtres passe-bande peuvent être utilisés pour augmenter le rapport signal sur bruit.

La présence de diaphonie d'origine électrique se traduit par un écart avec la loi en $1/r$ ayant une périodicité égale à une longueur d'onde.

7.3 Atténuation du son dans l'air

Dans un environnement réel, les ondes acoustiques se propageant en champ libre seront atténuées par la présence d'effets de relaxation moléculaires et de pertes par effet thermo-visqueux.

Cette atténuation dépend de la fréquence de l'onde acoustique, de la quantité de vapeur d'eau et de la température de l'air. Elle est déterminée par la partie réelle α , affaiblissement linéique de propagation acoustique, de l'exposant linéique d'atténuation acoustique γ de l'équation (5).

Des valeurs de l'affaiblissement linéique d'atténuation, exprimées en népers par mètre, doivent être calculées à partir des équations données dans l'annexe B.

According to equation (3) a slight effect may be found on the free-field sensitivity caused by the influence of humidity on the density and speed of sound in air.

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 7.5). The surface resistance has a noticeable effect upon the sensitivity of the microphone at low frequencies, especially on the phase response.

6.6.5 Atmospheric conditions

When reporting the results of a calibration, the free-field 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 free-field 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 upon the uncertainty in the determination of the free-field 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 free-field sensitivity. Band-pass filters may be used to improve the signal-to-noise ratio.

The presence of electrical crosstalk results in apparent deviations from the $1/r$ -law having a periodicity of one wavelength.

7.3 Attenuation of sound in air

Under practical conditions, sound waves propagating in a free field will be attenuated due to molecular relaxation effects and to thermal-viscous losses.

This attenuation depends on the frequency of the sound, the water vapour content and the temperature of the air. It is determined by the real part α , the air attenuation coefficient, of the complex propagation coefficient γ in equation (5).

Values of the air attenuation coefficient expressed in nepers per metre shall be calculated from the equations given in annex B.

7.4 *Écarts par rapport aux conditions de champ idéales*

Pendant un étalonnage, certaines prescriptions acoustiques doivent être satisfaites (voir 6.4). L'étalonnage doit être effectué en champ libre. Cette condition est obtenue le plus généralement dans une salle anéchoïque, dans laquelle le vent est absent et où le bruit transmis par voie aérienne est réduit au minimum. A cause des caractéristiques non idéales des matériaux absorbants tapissant les parois et des dimensions finies de la salle, des réflexions, fonction de la fréquence, peuvent se produire et provoquer des écarts par rapport à la loi en $1/r$ pour le module de la pression acoustique. L'amplitude de ces écarts dépendra à la fois de la distance et de la direction de la source. Pour une fréquence donnée, les écarts en fonction de la distance montreront une périodicité comprise entre une demie et une longueur d'onde selon que l'onde réfléchie est parallèle ou perpendiculaire à l'onde directe. Normalement, les plus petites écarts sont obtenus dans une région située au voisinage du centre de la salle et pour une direction qui n'est ni parallèle ni perpendiculaire à aucune des parois de la salle. Cependant, la présence d'attaches, de grillage, de câbles, de supports divers etc. peut aussi provoquer des perturbations du champ acoustique.

L'influence de ces réflexions perturbatrices ne peut être réduite à un niveau acceptable qu'en prenant le maximum de précautions lors de l'élaboration du système et de la procédure d'étalonnage.

Il est recommandé que les écarts obtenus lors de l'étalonnage par rapport à la loi de proportionnalité inverse entre la pression et la distance, si l'on exclut l'atténuation du son dans l'air, ne soient pas supérieurs à 0,05 dB dans la région entre la source et le microphone récepteur, à moins qu'une correction puisse être établie.

De plus, il est recommandé que la distance entre les deux microphones lors de l'étalonnage soit supérieure à dix fois le diamètre nominal des microphones, de manière à assurer des conditions d'ondes planes satisfaisantes dans la zone convenable autour du microphone récepteur.

7.5 *Tension de polarisation*

On peut prévoir un dispositif permettant de mesurer directement la tension de polarisation 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.

7.6 *Grandeurs physiques*

Certaines grandeurs physiques décrivant les propriétés de l'air entrent dans les expressions de calcul des efficacités des microphones ou affectent la variation de l'efficacité en fonction des conditions d'environnement. Ces grandeurs dépendent de conditions d'environnement telles que la pression statique, la température et l'humidité. Des valeurs des grandeurs physiques et leurs variations en fonction des conditions d'environnement sont données dans l'annexe F de la CEI 1094-2.

7.7 *Incertitude sur le niveau d'efficacité en champ libre*

Pour la détermination du niveau d'efficacité en champ libre, on estime qu'un étalonnage par réciprocité effectué dans des conditions bien maîtrisées permet d'atteindre une «incertitude étendue» basée sur un facteur d'application de 2 (voir le guide ISO référencé à l'article 2), meilleure que 0,2 dB dans un domaine de fréquences compris entre 1 kHz et 20 kHz pour des microphones étalons de laboratoire de type LS1P, ou entre 2 kHz et 20 kHz pour des microphones étalons de laboratoire de type LS2P.

7.4 *Deviations from ideal field conditions*

During a calibration, certain acoustic requirements shall be fulfilled (see 6.4). The calibration shall be carried out in a free field. This condition is most practically obtained in an anechoic room where wind is absent and airborne noise is minimal. Due to the non-ideal performance of the absorption material lining the walls and the finite size of the room, some frequency dependent reflections from the walls will occur and result in deviations from the $1/r$ -law for the modulus of sound pressure. The magnitude of these deviations will depend on the distance from and the direction to the source. At a given frequency, the deviations as a function of distance will show a periodicity between a half to a full wavelength, corresponding to a reflected wave in parallel or perpendicular to the direct wave. Normally, the smallest deviations are obtained in a region around the centre of the room and for a direction neither parallel nor perpendicular to any walls of the room. However, the presence of braces, grillwork, cables, supports of various kinds, etc., will also give rise to disturbances in the sound field.

The influence of these disturbing reflections can be reduced to acceptable levels only by exercising the utmost care when establishing the calibration system and procedure.

It is recommended that deviations from the inverse pressure/distance law, excluding the air attenuation, should not be greater than 0,05 dB in the region between the source and the receiver microphone during a calibration, unless a correction can be established.

Further, in order to ensure proper plane-wave conditions in a suitable region around the receiving microphone, it is recommended that the distance between the two microphones during the calibration should be greater than ten times the nominal diameter of the microphones.

7.5 *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, is valid.

7.6 *Physical quantities*

Certain physical quantities describing the properties of the air enter the expressions for calculating the sensitivities of the microphones or affect the dependence of the sensitivity upon the environmental conditions. These quantities depend on environmental conditions such as static pressure, temperature and humidity. Values of the quantities and their dependencies of environmental conditions are described in annex F of IEC 1094-2.

7.7 *Uncertainty on free-field sensitivity level*

For determining the free-field sensitivity level, it is estimated that a reciprocity calibration carried out under controlled conditions can achieve an extended uncertainty based on a coverage factor 2 (see ISO Guide referenced in clause 2) better than 0,2 dB within the frequency range 1 kHz to 20 kHz and 2 kHz to 20 kHz, for LS1P and LS2P laboratory standard microphones respectively.

Annexe A (informative)

Valeurs de la position des centres acoustiques des microphones

Tel qu'il est défini, le centre acoustique dépend de la fréquence ainsi que de l'orientation et de la distance entre le point d'observation et le transducteur. Pour des points d'observation suffisamment éloignés, la contribution de la position du centre acoustique dans l'incertitude d'étalonnage diminue. Pour de telles distances, le centre de la membrane peut être pris comme centre acoustique. Cependant, pour des distances comprises entre 150 mm et 600 mm, couramment utilisées dans la mise en oeuvre de la réciprocité, les valeurs données dans la figure et le tableau ci-dessous peuvent s'appliquer. Les valeurs de la position du centre acoustique se rapportent à l'axe principal et sont comptées par rapport à la surface de la membrane en fonction de la fréquence pour les microphones de type LS1P et LS2P. Une valeur positive signifie que le centre acoustique est en avant de la membrane. L'incertitude sur les valeurs de la figure et du tableau est estimée inférieure à 2 mm en dessous de la fréquence de résonance des microphones. A l'heure actuelle, les données correspondantes ne sont pas disponibles pour des microphones du type LSF.

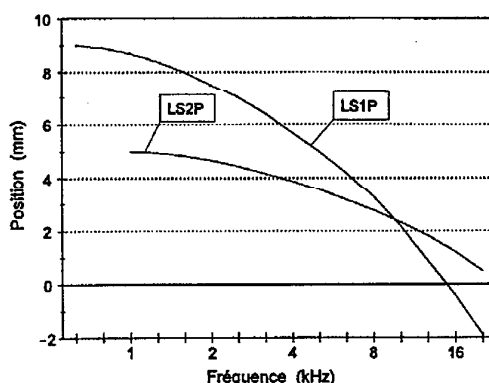


Figure A.1 – Valeurs estimées de la position du centre acoustique, comptées par rapport à la membrane, pour des microphones de type LS1P et LS2P, en incidence normale, en fonction de la fréquence, comme indiqué dans le tableau A.1

Tableau A.1 – Valeurs estimées de la position du centre acoustique, comptées par rapport à la membrane, pour des microphones de type LS1P et LS2P, en incidence normale, en fonction de la fréquence

Fréquence kHz	Distances en millimètres							
	0,63	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15
LS1P	9,0	8,9	8,7	8,4	8,0	7,5	7,0	6,4
LS2P	–	–	5,0	4,9	4,8	4,7	4,4	4,2

Fréquence kHz	Distances en millimètres							
	4,0	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0
LS1P	5,7	5,0	4,2	3,3	2,2	0,9	-0,4	-1,9
LS2P	3,9	3,6	3,2	2,8	2,3	1,8	1,2	0,5

Annex A (informative)

Values for the position of the acoustic centres of microphones

As defined, the acoustic centre depends on orientation, on frequency and on the distance of the observation point from the transducer. At sufficiently remote observation points, the effect of the acoustic centre position on the calibration uncertainty diminishes. At such distances, the centre of the diaphragm may be taken as the acoustic centre. For distances in the range 150 mm to 600 mm, normally used when carrying out reciprocity calibrations, the values given in the figure and table below may be applied. The values for the position of the acoustic centre refers to the principal axis and are given relative to the surface of the diaphragm as a function of frequency for type LS1P and LS2P microphones. A positive sign indicates that the acoustic centre is in front of the diaphragm. The uncertainty of the values in the figure and table is estimated to be less than 2 mm below the resonance frequency of the microphones. At present such data are not available for type LSF microphones.

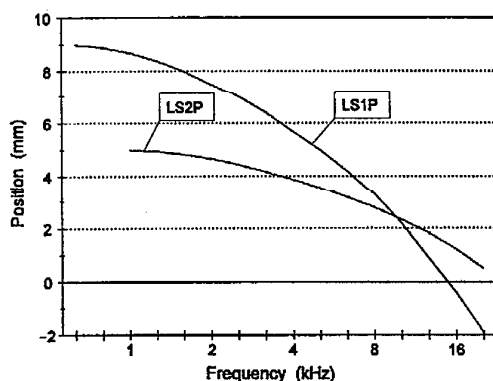


Figure A.1 – Estimated values for the position of the acoustic centres for type LS1P and LS2P microphones relative to the diaphragm and for normal incidence as function of frequency, as in table A.1

Table A.1 – Estimated values for the position of the acoustic centres for type LS1P and LS2P microphones relative to the diaphragm and for normal incidence as function of frequency

Frequency kHz	Distances in millimetres							
	0,63	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15
LS1P	9,0	8,9	8,7	8,4	8,0	7,5	7,0	6,4
LS2P	–	–	5,0	4,9	4,8	4,7	4,4	4,2

Frequency kHz	4,0	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0
	LS1P	5,7	5,0	4,2	3,3	2,2	0,9	-0,4
LS2P	3,9	3,6	3,2	2,8	2,3	1,8	1,2	0,5

Annexe B (informative)

Valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air

Des méthodes de calcul de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air sont données dans l'ISO 9613-1. Son annexe A décrit les mécanismes physiques du phénomène, et le paragraphe 5.2 et son annexe B donnent des relations pour le calcul de l'affaiblissement linéique de propagation en fonction de la fréquence, de la température, de la pression statique et de l'humidité relative. Les procédures de calcul décrites ci-dessous suivent les indications de l'ISO 9613-1.

Liste des symboles

T_{20}	= 293,15 K	température thermodynamique de référence (K);
T_{01}	= 273,16 K	température thermodynamique du point triple de l'eau (K);
T		température thermodynamique (K);
p_s		pression statique (kPa);
p_m		pression de vapeur saturante (kPa);
H		taux d'humidité relative (%);
h		fraction molaire de vapeur d'eau;
f_{rO}		fréquence de relaxation de l'oxygène (Hz);
f_{rN}		fréquence de relaxation de l'azote (Hz).

Procédure de calcul

Première étape

Déterminer la pression de vapeur saturante par:

$$\frac{p_m}{p_{s,r}} = 10^D$$

où

$$D = 4,6151 - 6,8346 \left(\frac{T_{01}}{T} \right)^{1,281}$$

Deuxième étape

Déterminer la fraction molaire de vapeur d'eau:

$$h = \frac{H}{100} \left(\frac{p_m}{p_{s,r}} \right) \left(\frac{p_{s,r}}{p_s} \right)$$

Troisième étape

Déterminer les fréquences de relaxation:

$$f_{rO} = \left(\frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left[24 \cdot 4,04 \cdot 10^6 h \left(\frac{0,2 \cdot 10^3 h}{3,91 \cdot 10^3 h} \right) \right]$$

$$f_{rN} = \left(\frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}} \left[9 \cdot 28 \cdot 10^3 h \exp \left(-4,170 \left(\left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-1/3} - 1 \right) \right) \right]$$

Annex B (informative)

Values of the air attenuation coefficients

Methods for calculating the air attenuation coefficient are given in ISO 9613-1. Its annex A describes the physical mechanisms for the phenomenon, and subclause 5.2 and annex B give formulas for calculating the attenuation coefficient as a function of frequency, temperature, static pressure and relative humidity. The calculation procedure described below follows the guidelines in ISO 9613-1.

List of symbols

T_{20}	= 293,15 K	reference thermodynamic temperature (K);
T_{01}	= 273,16 K	thermodynamic temperature of the triple-point of water (K);
T		absolute temperature (K);
p_s		static pressure (kPa);
p_m		saturation vapor pressure (kPa);
H		relative humidity (%);
h		fractional molar concentration of water vapor;
f_{fO}		oxygen relaxation frequency (Hz);
f_{fN}		nitrogen relaxation frequency (Hz).

Calculation procedure

Step 1

Determine the saturation vapor pressure through:

$$\frac{p_m}{p_{s,r}} = 10^D$$

where

$$D = 4,6151 - 6,8346 \left(\frac{T_{01}}{T} \right)^{1,261}$$

Step 2

Determine the molar concentration of water vapor:

$$h = \frac{H}{100} \left(\frac{p_m}{p_{s,r}} \right) \left(\frac{p_{s,r}}{p_s} \right)$$

Step 3

Determine the relaxation frequencies:

$$f_{fO} = \left(\frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left[24 + 4,04 \cdot 10^6 h \left(\frac{0,2 \cdot 10^3 h}{3,91 \cdot 10^3 h} \right) \right]$$

$$f_{fN} = \left(\frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[9 + 28 \cdot 10^3 h \exp \left(-4,170 \left(\left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{1/2} - 1 \right) \right) \right]$$

Quatrième étape

Déterminer l'affaiblissement linéique de propagation α en népers par mètre (Np/m):

$$\alpha = f^2 \left[18,4 \cdot 10^{-12} \left(\frac{p_s}{p_{s,t}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{5}{2}} \left(0,01275 \frac{\exp(-2239,1/T)}{f_{10} + (f^2/f_{10})} + 0,1068 \frac{\exp(-3352,0/T)}{f_{1N} + (f^2/f_{1N})} \right) \right]$$

L'exactitude des valeurs calculées de l'affaiblissement linéique de propagation est estimée à $\pm 10\%$ pour des variations des paramètres à l'intérieur des domaines suivants.

Température de l'air: de -20 °C à 50 °C
 Pression statique: inférieure à 200 kPa
 Fraction molaire de vapeur d'eau: de $0,5 \cdot 10^{-3}$ à $50 \cdot 10^{-3}$
 Rapport fréquence/pression: de $0,4\text{ Hz/kPa}$ à 10^4 Hz/kPa

Le tableau B.1 donne les valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation calculées, selon l'ISO 9613-1, dans les conditions d'ambiance les plus significatives pour des étalonnages en champ libre pratiqués dans un laboratoire.

Les valeurs tabulées, exprimées en décibels par mètre, sont égales à $8,686 \alpha$.

Tableau B.1 – Valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air (en dB/m)

f kHz	t = 21 °C, p _s = 101,325 kPa			t = 23 °C, p _s = 101,325 kPa			t = 25 °C, p _s = 101,325 kPa		
	H=25 %	H=50 %	H=80 %	H=25 %	H=50 %	H=80 %	H=25 %	H=50 %	H=80 %
1,0	0,0054	0,0048	0,0054	0,0054	0,0052	0,0059	0,0054	0,0057	0,0063
1,25	0,0075	0,0059	0,0063	0,0072	0,0062	0,0069	0,0070	0,0067	0,0076
1,6	0,0111	0,0075	0,0077	0,0104	0,0078	0,0088	0,0099	0,0082	0,0091
2,0	0,0162	0,0099	0,0093	0,0149	0,0099	0,0099	0,0140	0,0102	0,0107
2,5	0,0240	0,0134	0,0116	0,0220	0,0132	0,0121	0,0203	0,0132	0,0129
3,15	0,0365	0,0192	0,0153	0,0332	0,0184	0,0155	0,0304	0,0180	0,0161
4,0	0,0565	0,0287	0,0212	0,0514	0,0271	0,0210	0,0469	0,0259	0,0212
5,0	0,0846	0,0426	0,0299	0,0773	0,0397	0,0291	0,0706	0,0374	0,0287
6,3	0,1267	0,0649	0,0441	0,1170	0,0601	0,0421	0,1076	0,0561	0,0407
8,0	0,1882	0,1010	0,0673	0,1767	0,0933	0,0635	0,1645	0,0866	0,0605
10,0	0,2643	0,1527	0,1013	0,2539	0,1411	0,0949	0,2405	0,1308	0,0896
12,5	0,3578	0,2292	0,1535	0,3537	0,2131	0,1434	0,3429	0,1980	0,1347
16,0	0,4771	0,3541	0,2435	0,4885	0,3327	0,2275	0,4889	0,3115	0,2132
20,0	0,5929	0,5139	0,3682	0,6266	0,4901	0,3452	0,6468	0,4641	0,3240
25,0	0,7123	0,7256	0,5514	0,7737	0,7061	0,5207	0,8224	0,6794	0,4910
31,5	0,8421	1,0019	0,8244	0,9332	0,9998	0,7876	1,0166	0,9828	0,7491
40,0	0,9947	1,3445	1,2191	1,1136	1,3795	1,1847	1,2326	1,3915	1,1419
50,0	1,1758	1,7135	1,7083	1,3157	1,8007	1,6930	1,4636	1,8612	1,6594

Step 4

Determine the air attenuation coefficient α in nepers per metre (Np/m):

$$\alpha = f^2 \left[18,4 \cdot 10^{-12} \left(\frac{P_s}{P_{s,T}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{5}{2}} \left(0,01275 \frac{\exp(-2239,1/T)}{f_{10} \cdot (f^2/f_{10})} + 0,1068 \frac{\exp(-3352,0/T)}{f_{10} \cdot (f^2/f_{10})} \right) \right]$$

The accuracy of the calculated air attenuation coefficient is estimated to be $\pm 10\%$ for variations within the following ranges:

Air temperature:	-20 °C to 50 °C
Static pressure:	less than 200 kPa
Molar concentration of water vapor:	$0,5 \cdot 10^{-3}$ to $50 \cdot 10^{-3}$
Frequency-to-pressure ratio:	0,4 Hz/kPa to 10^4 Hz/kPa

Table B.1 gives values for the attenuation of sound pressure in air calculated according to ISO 9613-1 under the environmental conditions most relevant for reciprocity free-field calibrations in a laboratory.

The tabulated values are expressed in decibels per metre as $8,686 \alpha$.

Table B.1 – Values for attenuation of sound pressure in air (in dB/m)

f kHz	t = 21 °C, $p_s = 101,325$ kPa			t = 23 °C, $p_s = 101,325$ kPa			t = 25 °C, $p_s = 101,325$ kPa		
	H=25 %	H=50 %	H=80 %	H=25 %	H=50 %	H=80 %	H=25 %	H=50 %	H=80 %
1,0	0,0054	0,0048	0,0054	0,0054	0,0052	0,0059	0,0054	0,0057	0,0063
1,25	0,0075	0,0059	0,0063	0,0072	0,0062	0,0069	0,0070	0,0067	0,0076
1,6	0,0111	0,0075	0,0077	0,0104	0,0078	0,0083	0,0099	0,0082	0,0091
2,0	0,0162	0,0099	0,0093	0,0149	0,0099	0,0099	0,0140	0,0102	0,0107
2,5	0,0240	0,0134	0,0116	0,0220	0,0132	0,0121	0,0203	0,0132	0,0129
3,15	0,0365	0,0192	0,0153	0,0332	0,0184	0,0155	0,0304	0,0180	0,0161
4,0	0,0565	0,0287	0,0212	0,0514	0,0271	0,0210	0,0469	0,0259	0,0212
5,0	0,0846	0,0426	0,0299	0,0773	0,0397	0,0291	0,0706	0,0374	0,0287
6,3	0,1267	0,0649	0,0441	0,1170	0,0601	0,0421	0,1076	0,0561	0,0407
8,0	0,1882	0,1010	0,0673	0,1767	0,0933	0,0635	0,1645	0,0866	0,0605
10,0	0,2643	0,1527	0,1013	0,2539	0,1411	0,0949	0,2405	0,1308	0,0896
12,5	0,3578	0,2292	0,1535	0,3537	0,2131	0,1434	0,3429	0,1980	0,1347
16,0	0,4771	0,3541	0,2435	0,4885	0,3327	0,2275	0,4889	0,3115	0,2132
20,0	0,5929	0,5139	0,3682	0,6266	0,4901	0,3452	0,6468	0,4641	0,3240
25,0	0,7123	0,7256	0,5514	0,7737	0,7061	0,5207	0,8224	0,6794	0,4910
31,5	0,8421	1,0019	0,8244	0,9332	0,9998	0,7876	1,0166	0,9828	0,7491
40,0	0,9947	1,3445	1,2191	1,1136	1,3795	1,1847	1,2326	1,3915	1,1419
50,0	1,1758	1,7135	1,7083	1,3157	1,8007	1,6930	1,4636	1,8612	1,6594

Annexe C (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 en champ libre des microphones de type LS1P et LS2P. A l'heure actuelle, les données correspondantes ne sont pas disponibles pour les microphones de type LSF.

Une description détaillée de l'influence des conditions d'environnement sur l'efficacité en pression des microphones est donnée dans l'annexe D de la CEI 1094-2. En plus de cette influence, l'impédance de rayonnement et la diffraction autour du microphone dépendent aussi des conditions d'environnement.

Les détails de construction du microphone déterminent l'influence relative des conditions d'environnement. La célérité du son, la masse volumique et la viscosité de l'air sont considérées comme des fonctions linéaires de la température et/ou de la pression statique. Les coefficients de variation en pression et en température qui en résultent sont considérés comme étant le rapport de l'efficacité en champ libre dans les conditions de référence à l'efficacité en champ libre à la pression ou à la température considérées selon le cas. Ces exemples s'appliquent pour une efficacité déterminée pour une onde acoustique se propageant vers la membrane du microphone suivant son axe principal.

C.1 Influence de la pression statique

Des exemples de coefficient de variation en pression statique de l'efficacité en pression de microphones sont donnés à la figure D.1 de la CEI 1094-2. Une influence supplémentaire due à l'impédance de rayonnement modifie légèrement ces valeurs et le coefficient de variation en pression de l'efficacité en champ libre qui en résulte varie en fonction de la fréquence comme indiqué sur la figure C.1. En général, le coefficient de variation en pression statique dépend de détails de construction du microphone et les valeurs réelles peuvent différer considérablement pour deux microphones de construction différente bien que les deux microphones puissent appartenir au même type. En conséquence, il n'y a pas lieu d'appliquer les valeurs des coefficients de pression donnés par la figure C.1 à des microphones individuels.

La valeur en basse fréquence du coefficient de variation en pression statique se situe généralement entre $-0,01$ dB/kPa et $-0,02$ dB/kPa pour des microphones de type LS1P, et entre $-0,003$ dB/kPa et $-0,008$ dB/kPa pour des microphones de type LS2P.

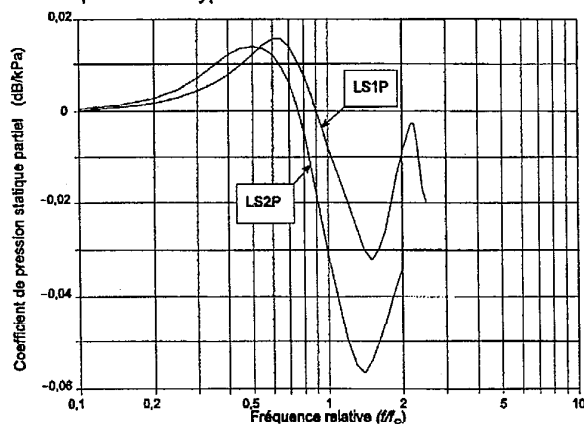


Figure C.1 – Influence de la fréquence sur le coefficient de pression statique de l'efficacité en champ libre des microphones de type LS1P et LS2P exprimée en fonction de la fréquence relative f/f_0 , f_0 étant la fréquence de résonance du microphone

Annex C (informative)

Environmental influence on the sensitivity of microphones

This annex gives information on the influence of static pressure and temperature on the free-field sensitivity of type LS1P and LS2P microphones. At present such data are not available for type LSF microphones.

A comprehensive description of the influence of the environmental conditions on the pressure sensitivity of microphones is given in annex D of IEC 1094-2. In addition to this influence, the radiation impedance and the diffraction around the microphone also depend on the environmental conditions.

Constructional details of the microphone determine the relative influence of the environmental conditions. The speed of sound, the density and the viscosity of air are considered linear functions of temperature and/or static pressure. The resulting static pressure and temperature coefficients of the microphone are then considered to be determined by the ratio of the free-field sensitivity at reference conditions to the free-field sensitivity at the relevant static pressure and temperature respectively. The examples apply to the free-field sensitivity for sound propagation along the principal axis toward the front of diaphragm.

C.1 Dependence on static pressure

Examples of the static pressure coefficient referring to the pressure sensitivity of microphones are shown in figure D.1 of IEC 1094-2. The additional influence from the radiation impedance will modify this figure slightly and the resulting static pressure coefficient referring to the free-field sensitivity generally varies with frequency as shown in figure C.1. In general, the static pressure coefficient depends on constructional details of the microphone and the actual values may differ considerably for two microphones of different manufacture although the microphones may belong to the same type. Consequently, the static pressure coefficients shown on figure C.1 should not be applied to individual microphones.

The low-frequency value of the static pressure coefficient generally lies between -0,01 dB/kPa and -0,02 dB/kPa for LS1P microphones, and between -0,003 dB/kPa and -0,008 dB/kPa for LS2P microphones.

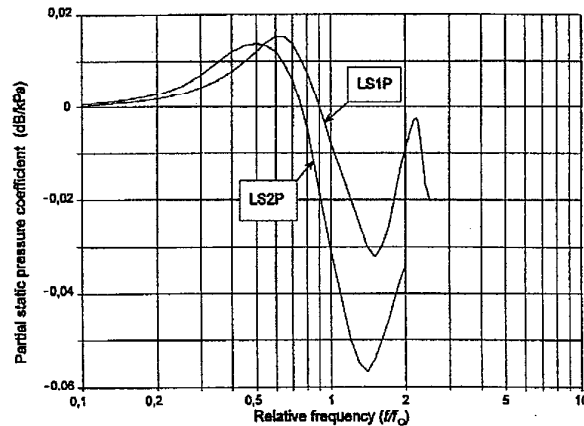


Figure C.1 – General frequency dependence of the static pressure coefficient for the free-field sensitivity of LS1P and LS2P microphones as a function of relative frequency f/f_0 , f_0 being the resonance frequency of the microphone

C.2 Influence de la température

Des exemples de coefficient de variation en température de l'efficacité en pression de microphones sont donnés à la figure D.2 de la CEI 1094-2. Une influence supplémentaire sur l'air entourant le microphone due aux variations de température modifie légèrement ces valeurs et le coefficient de variation en température de l'efficacité en champ libre qui en résulte varie en fonction de la fréquence comme indiqué sur la figure C.2.

L'influence de la température sur la célérité du son, c'est-à-dire sur la longueur d'onde, affecte aussi le facteur de diffraction $S(f, \theta)$ (voir équation (3)). Cet effet dépend de l'angle d'incidence de l'onde acoustique et peut prendre des valeurs importantes aux fréquences élevées pour certains angles où l'efficacité est minimale.

En plus de l'influence sur l'air enfermé dans la cavité arrière et l'air entourant le microphone, les variations de température affectent aussi les composantes mécaniques du microphone. L'effet principal sera généralement une modification de la tension de la membrane, donc une variation constante de l'efficacité dans toute la gamme de fréquences où l'élasticité est prépondérante ainsi qu'une légère modification de la fréquence de résonance.

En général, le coefficient de variation en température dépend de détails de construction du microphone et les valeurs réelles peuvent différer considérablement pour deux microphones de construction différente bien que les deux microphones puissent appartenir au même type. En conséquence, il n'y a pas lieu d'appliquer les valeurs des coefficients de température partiels C_t donnés par la figure C.2 à des microphones individuels.

La valeur en basse fréquence du coefficient de température se situe généralement entre $-0,005$ dB/K et $+0,005$ dB/K pour les deux types de microphones LS1P et LS2P.

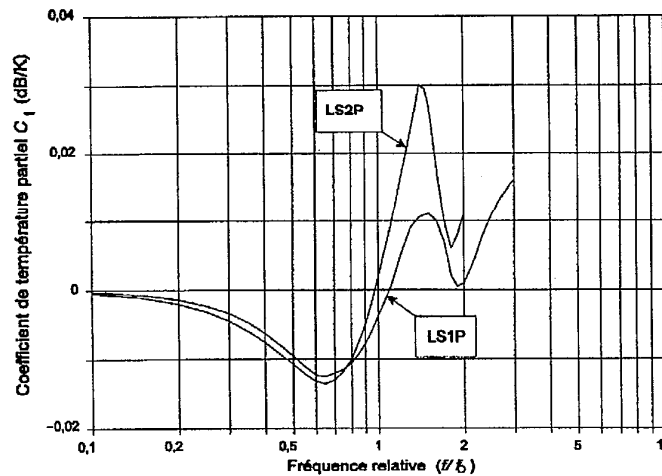


Figure C.2 – Variation générale de la composante C_t du coefficient de température des microphones LS1P et LS2P provoquée par les variations de l'impédance acoustique de l'air enfermé dans la cavité arrière ainsi que de l'air entourant le microphone en fonction de la fréquence relative f/f_0 , f_0 étant la fréquence de résonance du microphone

C.2 Dependence on temperature

Examples of the temperature coefficient referring to the pressure sensitivity of microphones are shown in figure D.2 of IEC 1094-2. For the free-field sensitivity, the additional influence from temperature variations in the surrounding air will modify this figure slightly and the resulting temperature coefficient referring to the free-field sensitivity generally varies with frequency as shown in figure C.2.

The influence of temperature on the speed of sound, i.e. on the wavelength, also affects the scattering factor $S(f, \theta)$ (see equation (3)). This effect will depend on the angle of sound incidence and may lead to high values at high frequencies at certain angles of minimum sensitivity.

In addition to the influence on the enclosed and surrounding air, temperature variations affect the mechanical parts of the microphone. The main effect generally will be a change in the tension of the diaphragm and thus results in a constant change in sensitivity in the stiffness controlled range and a slight change in resonance frequency.

In general, the temperature coefficient depends on constructional details of the microphone and the actual values may differ considerably for two microphones of different manufacture although the microphones may belong to the same type. Consequently the partial temperature coefficients C_1 shown on figure C.2 should not be applied to individual microphones.

The low-frequency value of the temperature coefficient generally lies in the range $\pm 0,005$ dB/K for both LS1P and LS2P microphones.

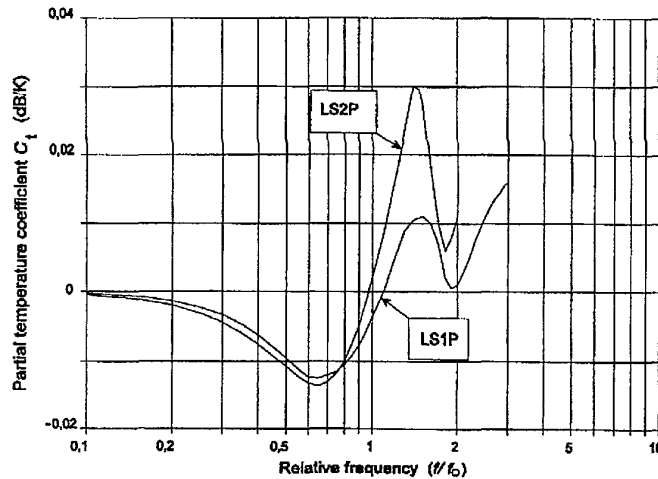


Figure C.2 – General frequency dependence of that part C_1 of the temperature coefficient for LS1P and LS2P microphones caused by the variation in the impedance of the enclosed and the surrounding air with dependence shown as a function of the relative frequency f/f_0 , f_0 being the resonance frequency of the microphone