
**Acoustique — Atténuation du son lors de
sa propagation à l'air libre —**

Partie 1:

Calcul de l'absorption atmosphérique

Sample Document

Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors —

Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere

get full document from standards.iteh.ai



Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 9613-1 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 43, *Acoustique*, sous-comité SC 1, *Bruit*.

L'ISO 9613 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Acoustique — Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre*:

- *Partie 1: Calcul de l'absorption atmosphérique*
- *Partie 2: Méthode générale de calcul*

Les annexes A, B, C, D, E et F de la présente partie de l'ISO 9613 sont données uniquement à titre d'information.

© ISO 1993

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation
Case Postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse

Imprimé en Suisse

Introduction

L'objet de la présente Norme internationale est la spécification de méthodes de calcul de l'atténuation de sons se propageant à l'air libre, dans l'objectif de prévoir le niveau sonore ambiant à distance donnée de différentes sources sonores.

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

Page blanche

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

Acoustique — Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre —

Partie 1: Calcul de l'absorption atmosphérique

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 9613 prescrit une méthode analytique de calcul de l'atténuation, par absorption atmosphérique, d'un son produit par une source quelconque et se propageant en atmosphère libre dans diverses conditions météorologiques.

Pour les sons purs, l'atténuation par absorption atmosphérique est exprimée par un coefficient d'atténuation qui est fonction de quatre paramètres: fréquence du son, et température, humidité et pression de l'air. Les coefficients d'atténuation calculés, en décibels par kilomètre, sont présentés sous forme de tableaux pour différents intervalles de valeurs des paramètres communément utilisés pour la prévision de la propagation en atmosphère libre, c'est-à-dire

- fréquence de 50 Hz à 10 kHz,
- température de -20 °C à $+50\text{ °C}$,
- humidité relative de 10 % à 100 %, et
- pression de 101,325 kPa (une atmosphère).

Des formules sont également fournies pour le calcul sur des plages de valeurs plus larges adaptées à des applications particulières, par exemple le calcul aux fréquences ultrasonores pour la modélisation acoustique sur maquette, et à basses pressions, pour la propagation depuis la haute altitude vers le sol.

Pour les bruits à large bande analysés au moyen de filtres de fraction d'octave (par exemple de tiers d'octave), la méthode prescrite pour le calcul de l'atténuation par absorption atmosphérique est déduite de celle qui est décrite pour les sons purs, que l'on applique aux fréquences centrales des filtres. L'annexe D décrit une autre méthode de calcul possible,

par intégration spectrale. Le bruit peut avoir un spectre à large bande sans composantes fréquentielles discrètes ou comporter à la fois des composantes à large bande et des composantes discrètes.

La présente partie de l'ISO 9613 s'applique à une atmosphère caractérisée par l'uniformité des conditions météorologiques. La méthode prescrite peut également servir à la détermination des corrections à apporter à des valeurs mesurées du niveau de pression acoustique, pour tenir compte de la variation des pertes par absorption atmosphérique en fonction des conditions météorologiques. La généralisation de cette méthode à des atmosphères non homogènes est étudiée en annexe C, notamment pour ce qui concerne les variations des conditions météorologiques avec l'altitude.

La présente partie de l'ISO 9613 prend en compte les principaux mécanismes d'absorption intervenant dans une atmosphère exempte de brouillard ou de polluants atmosphériques en quantité significative. Le calcul des mécanismes d'atténuation autres que l'absorption atmosphérique, par exemple la réfraction ou la réflexion sur le sol est décrit dans l'ISO 9613-2.

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de l'ISO 9613. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente partie de l'ISO 9613 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 2533:1975, *Atmosphère Type*.

ISO 266:1975, *Acoustique — Fréquences normales pour les mesurages*.

CEI 225:1966, *Filtres de bande d'octave, de demi-octave et de tiers d'octave destinés à l'analyse des bruits et des vibrations*.

3 Symboles

| | |
|----------|--|
| f | fréquence du son, en hertz |
| f_m | fréquence centrale, en hertz |
| h | fraction molaire de vapeur d'eau, en pourcentage |
| p_r | pression atmosphérique ambiante de référence, en kilopascals |
| p_i | amplitude de la pression acoustique initiale, en pascals |
| p_t | amplitude de la pression acoustique, en pascals |
| p_0 | amplitude de la pression acoustique de référence (20 μ Pa) |
| p_a | pression atmosphérique ambiante, en kilopascals |
| s | distance de propagation du son, en mètres |
| T | température atmosphérique ambiante, en kelvins |
| T_0 | température atmosphérique de référence, en kelvins |
| α | coefficient d'atténuation des sons purs, en décibels par mètre |

NOTE 1 Pour des raisons de commodité, l'expression abrégée «coefficient d'atténuation» sera employée dans la présente partie de l'ISO 9613 pour désigner α .

| | |
|--------------|---|
| δL_t | atténuation par absorption atmosphérique, en décibels |
|--------------|---|

4 Conditions atmosphériques de référence

4.1 Composition

L'absorption atmosphérique est fonction de la composition de l'air et notamment de sa teneur en vapeur d'eau, qui peut varier considérablement. Au niveau de la mer et pour un air non pollué et sec, les fractions molaires ou volumiques des trois principaux consti-

tuants de l'air, l'azote, l'oxygène et le dioxyde de carbone, fixés normalement, sont respectivement égales à 0,780 84, 0,209 476 et 0,009 314 (voir ISO 2533). Dans l'air sec, la fraction restante (0,009 37) se compose de constituants traces mineurs qui n'ont pas d'influence significative sur l'absorption atmosphérique. On peut admettre pour le calcul que ces fractions molaires normales restent valables jusqu'à au moins 50 km au-dessus du niveau de la mer. Par contre, la fraction molaire de vapeur d'eau, qui est un facteur d'influence déterminant de l'absorption atmosphérique, subit des fluctuations sensibles au voisinage du sol et varie de plus de deux ordres de grandeur entre les altitudes 0 et 10 km.

4.2 Température et pression atmosphériques

Dans la présente partie de l'ISO 9613, la pression atmosphérique ambiante de référence, p_r , est celle de l'atmosphère internationale normalisée au niveau moyen de la mer, c'est-à-dire 101,325 kPa. La température atmosphérique de référence de l'air, T_0 , choisie est de 293,15 K (20 °C) puisque c'est à cette température qu'ont été obtenus les résultats les plus fiables sur lesquels s'appuie la présente partie de l'ISO 9613.

5 Coefficient d'atténuation des sons purs par absorption atmosphérique

5.1 Expression générale de l'atténuation

La propagation d'un son pur dans l'atmosphère sur une distance s s'accompagne d'une décroissance exponentielle de l'amplitude de la pression acoustique, p_t , à partir de la valeur initiale p_i . Cette décroissance résulte des mécanismes d'absorption atmosphérique décrits dans la présente partie de l'ISO 9613 et s'effectue selon la loi suivante, qui s'applique aux ondes sonores planes en champ libre:

$$p_t = p_i \exp(-0,115 1\alpha s) \quad \dots (1)$$

NOTE 2 Le terme $\exp(-0,115 1\alpha s)$ représente la base e des logarithmes népériens élevée à la puissance indiquée entre parenthèses, avec $0,115 1 = 1/[10 \lg(e^2)]$.

5.2 Atténuation des niveaux de pression acoustique

L'atténuation par absorption atmosphérique, $\delta L_t(f)$, en décibels, du niveau de pression acoustique d'un son pur de fréquence f , c'est-à-dire la différence entre le niveau initial au point $s = 0$ et le niveau à la distance s , est donnée par

$$\delta L_t(f) = 10 \lg(p_i^2/p_t^2) \quad \text{dB} = \alpha s \quad \dots (2)$$

6 Méthode de calcul des coefficients d'atténuation des sons purs

6.1 Paramètres de calcul

Les paramètres acoustiques et atmosphériques considérés, c'est-à-dire la fréquence du son, la température atmosphérique ambiante, la fraction molaire de vapeur d'eau et la pression atmosphérique ambiante, ainsi que leurs symboles et unités sont donnés à l'article 3.

NOTES

3 Dans un échantillon spécifique d'air humide, la fraction molaire de vapeur d'eau est le rapport, en pourcentage, du nombre de kilomoles de vapeur d'eau (c'est-à-dire la quantité de matière) au nombre total de kilomoles d'air sec et de vapeur d'eau. D'après la loi d'Avogadro, elle est aussi égale au quotient de la pression partielle de vapeur d'eau par la pression atmosphérique.

4 La fraction molaire de vapeur d'eau est comprise entre 0,2 % et 2 % environ, dans les conditions météorologiques habituelles au voisinage du niveau moyen de la mer, mais elle devient très inférieure à 0,01 % aux altitudes supérieures à 10 km.

6.2 Formules

Comme précisé en annexe A, l'atténuation par absorption atmosphérique s'exprime en fonction des deux fréquences de relaxation, f_{rO} et f_{rN} , qui sont respectivement celles de l'oxygène et de l'azote. Les valeurs de f_{rO} et f_{rN} , en hertz, doivent être calculées d'après les équations

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4,04 \times 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right) \quad \dots (3)$$

et

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \times \left[9 + 280h \exp \left\{ -4,170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \right] \quad \dots (4)$$

Le coefficient d'atténuation α , en décibels par mètre, doit être calculé d'après l'équation

$$\alpha = 8,686f^2 \left(\left[1,84 \times 10^{-11} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \right] + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \right) \times$$

$$\times \left\{ 0,01275 \left[\exp \left(\frac{-2239,1}{T} \right) \right] \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right) \right]^{-1} + 0,1068 \left[\exp \left(\frac{-3352,0}{T} \right) \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right) \right]^{-1} \right\} \quad \dots (5)$$

Les valeurs de f_{rO} et f_{rN} sont données par les formules (3) et (4).

Dans les équations (3) à (5), $p_r = 101,325$ kPa et $T_0 = 293,15$ K.

Les équations (3) à (5) résument sous une forme adaptée au calcul l'ensemble des formules données dans l'annexe A qui expriment la contribution des différents mécanismes mis en jeu dans l'absorption atmosphérique.

6.3 Calcul du coefficient d'atténuation

Pour calculer le coefficient d'atténuation des sons purs, il suffit d'appliquer les équations (3) à (5) pour des valeurs données des paramètres. Les valeurs mesurées de la température et de la pression atmosphériques sont parfois exprimées dans d'autres unités que celles qui sont spécifiées dans l'article 3, mais il est facile de se procurer des tables de conversion permettant d'obtenir les valeurs en kelvins et kilopascals. Les valeurs de l'humidité, par contre, sont rarement exprimées en fraction molaire de vapeur d'eau. L'annexe B donne des indications sur la conversion en fraction molaire de l'humidité relative, de la température de rosée, ou d'autres mesures de l'humidité de l'air.

Les méthodes qui permettent d'établir une relation, par approximation, entre une atmosphère réelle non homogène et l'atmosphère uniforme à laquelle s'appliquent les équations de 6.2 font l'objet d'une discussion dans l'annexe C.

6.4 Tableau des valeurs du coefficient d'atténuation

Le tableau 1 donne les valeurs du coefficient d'atténuation des sons purs calculées d'après les équations (3) à (5) à des températures, humidités et fréquences données et à la pression normale de 1 atm (101,325 kPa). Ces valeurs sont cependant exprimées en décibels par kilomètre, unité adaptée à l'étude de la propagation du son sur des distances de l'ordre de quelques kilomètres. La notation scientifique adoptée permet d'exprimer les valeurs obtenues pour les basses fréquences avec une bonne précision. Pour calculer les valeurs du coefficient d'atténuation qui correspondent à des conditions données, il convient

d'appliquer les équations (3) à (5) et non de procéder par interpolation pour les valeurs intermédiaires ou par extrapolation pour les valeurs sortant des limites du tableau 1.

NOTES

5 Pour des raisons de commodité, les fréquences indiquées dans le tableau 1 sont les fréquences normales adoptées pour les filtres de tiers d'octave (voir ISO 266 et CEI 225). Toutefois, les coefficients d'atténuation du tableau 1 ont été calculés pour les fréquences centrales exactes f_m , en hertz, dont l'expression générale en base 10 est

$$f_m = (1000) (10^{3b/10})^k \quad \dots (6)$$

où 1 000 Hz est la fréquence de référence exacte et b une fraction rationnelle désignant la largeur de bande des filtres de fraction d'octave (par exemple, $b = 1/3$ pour un filtre de tiers d'octave). Pour le tableau 1, l'exposant k est un entier allant de -13 à $+10$ et correspondant aux fréquences normales comprises entre 50 Hz et 10 kHz. Pour les fréquences ultrasonores exactes des intervalles de tiers d'octave compris entre 10 kHz et 1 MHz, il est admis d'utiliser l'équation (6), k allant de $+10$ à $+30$.

6 Toutes les humidités relatives indiquées en tête de colonne dans le tableau 1 sont définies, quelle que soit la température, par rapport à la pression de vapeur saturante au-dessus d'une surface d'eau liquide (voir annexe B). La pression de vapeur saturante a été calculée d'après les formules utilisées pour établir les Tables météorologiques internationales [2] (voir annexe B).

7 Précision du calcul des coefficients d'atténuation des sons purs sur différents intervalles de valeurs des paramètres

7.1 Précision de $\pm 10 \%$

On estime que le coefficient d'atténuation des sons purs est calculé avec une précision de $\pm 10 \%$ lorsque les paramètres prennent des valeurs comprises dans les intervalles suivants:

fraction molaire de vapeur d'eau: 0,05 % à 5 %

température de l'air: 253,15 K à 323,15 K ($-20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $+50 \text{ }^\circ\text{C}$)

pression atmosphérique: inférieure à 200 kPa (2 atm)

rapport fréquence/pression: 4×10^{-4} Hz/Pa à 10 Hz/Pa (40 Hz/atm à 1 MHz/atm)

NOTE 7 Les combinaisons de fractions molaires de vapeur d'eau et de températures qui conduisent à une humidité relative supérieure à 100 % en 7.1 à 7.3 sont exclues des estimations de précision correspondantes.

7.2 Précision de $\pm 20 \%$

On estime que le coefficient d'atténuation des sons purs est calculé avec une précision de $\pm 20 \%$ lorsque les paramètres prennent des valeurs comprises dans les intervalles suivants:

fraction molaire de vapeur d'eau: 0,005 % à 0,05 %, et supérieure à 5 %

température de l'air: 253,15 K à 323,15 K ($-20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $+50 \text{ }^\circ\text{C}$)

pression atmosphérique: inférieure à 200 kPa (2 atm)

rapport fréquence/pression: 4×10^{-4} Hz/Pa à 10 Hz/Pa

7.3 Précision de $\pm 50 \%$

On estime que le coefficient d'atténuation des sons purs est calculé avec une précision de $\pm 50 \%$ lorsque les paramètres prennent des valeurs comprises dans les intervalles suivants, qui correspondent aux conditions atmosphériques régnant aux altitudes inférieures à 10 km:

fraction molaire de vapeur d'eau: inférieure à 0,005 %

température de l'air: supérieure à 200 K ($-73 \text{ }^\circ\text{C}$)

pression atmosphérique: inférieure à 200 kPa (2 atm)

rapport fréquence/pression: 4×10^{-4} Hz/Pa à 10 Hz/Pa

8 Calcul de l'atténuation par absorption atmosphérique des bruits à large bande analysés au moyen de filtres de fraction d'octave

8.1 Description générale du problème et méthodes de calcul

8.1.1 Les précédents articles de la présente partie de l'ISO 9613 traitent de l'influence de l'absorption atmosphérique sur la réduction du niveau d'un son pur se propageant dans l'atmosphère. Dans la pratique, toutefois, la plupart des spectres de bruit s'étendent sur une large bande de fréquences et sont normalement analysés au moyen de filtres de fraction d'octave qui fournissent des niveaux de pression acoustique par bandes de fréquence.

Tableau 1 — Coefficients d'atténuation atmosphérique des sons purs, en décibels par kilomètre, à une pression atmosphérique normale de 1 atm (101,325 kPa)

| (a) Température atmosphérique: -20 °C | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fréquence normale Hz | Humidité relative, % | | | | | | | | | | |
| | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 50 | $5,89 \times 10^{-1}$ | $5,09 \times 10^{-1}$ | $4,18 \times 10^{-1}$ | $2,85 \times 10^{-1}$ | $2,11 \times 10^{-1}$ | $1,68 \times 10^{-1}$ | $1,42 \times 10^{-1}$ | $1,25 \times 10^{-1}$ | $1,14 \times 10^{-1}$ | $1,05 \times 10^{-1}$ | $9,92 \times 10^{-2}$ |
| 63 | $7,56 \times 10^{-1}$ | $7,04 \times 10^{-1}$ | $6,02 \times 10^{-1}$ | $4,21 \times 10^{-1}$ | $3,08 \times 10^{-1}$ | $2,41 \times 10^{-1}$ | $2,00 \times 10^{-1}$ | $1,73 \times 10^{-1}$ | $1,55 \times 10^{-1}$ | $1,42 \times 10^{-1}$ | $1,33 \times 10^{-1}$ |
| 80 | $9,24 \times 10^{-1}$ | $9,35 \times 10^{-1}$ | $8,46 \times 10^{-1}$ | $6,19 \times 10^{-1}$ | $4,55 \times 10^{-1}$ | $3,52 \times 10^{-1}$ | $2,86 \times 10^{-1}$ | $2,43 \times 10^{-1}$ | $2,14 \times 10^{-1}$ | $1,94 \times 10^{-1}$ | $1,79 \times 10^{-1}$ |
| 100 | 1,08 | 1,18 | 1,15 | $9,02 \times 10^{-1}$ | $6,75 \times 10^{-1}$ | $5,21 \times 10^{-1}$ | $4,19 \times 10^{-1}$ | $3,50 \times 10^{-1}$ | $3,03 \times 10^{-1}$ | $2,69 \times 10^{-1}$ | $2,45 \times 10^{-1}$ |
| 125 | 1,20 | 1,43 | 1,49 | 1,28 | $9,98 \times 10^{-1}$ | $7,76 \times 10^{-1}$ | $6,22 \times 10^{-1}$ | $5,14 \times 10^{-1}$ | $4,39 \times 10^{-1}$ | $3,84 \times 10^{-1}$ | $3,44 \times 10^{-1}$ |
| 160 | 1,30 | 1,64 | 1,83 | 1,77 | 1,45 | 1,16 | $9,30 \times 10^{-1}$ | $7,66 \times 10^{-1}$ | $6,48 \times 10^{-1}$ | $5,61 \times 10^{-1}$ | $4,96 \times 10^{-1}$ |
| 200 | 1,37 | 1,82 | 2,15 | 2,33 | 2,06 | 1,70 | 1,39 | 1,15 | $9,70 \times 10^{-1}$ | $8,34 \times 10^{-1}$ | $7,31 \times 10^{-1}$ |
| 250 | 1,43 | 1,95 | 2,42 | 2,93 | 2,83 | 2,46 | 2,06 | 1,73 | 1,46 | 1,26 | 1,09 |
| 315 | 1,46 | 2,05 | 2,63 | 3,49 | 3,70 | 3,43 | 3,00 | 2,57 | 2,20 | 1,90 | 1,65 |
| 400 | 1,49 | 2,12 | 2,79 | 3,99 | 4,60 | 4,59 | 4,23 | 3,74 | 3,27 | 2,85 | 2,50 |
| 500 | 1,52 | 2,17 | 2,91 | 4,38 | 5,45 | 5,86 | 5,72 | 5,29 | 4,76 | 4,23 | 3,76 |
| 630 | 1,55 | 2,22 | 3,00 | 4,68 | 6,17 | 7,10 | 7,39 | 7,19 | 6,71 | 6,13 | 5,55 |
| 800 | 1,59 | 2,27 | 3,08 | 4,92 | 6,75 | 8,22 | 9,07 | 9,31 | 9,09 | 8,60 | 7,98 |
| 1 000 | 1,65 | 2,34 | 3,16 | 5,11 | 7,21 | 9,14 | 1,06 × 10 | 1,15 × 10 | 1,17 × 10 | 1,16 × 10 | 1,11 × 10 |
| 1 250 | 1,74 | 2,43 | 3,27 | 5,28 | 7,57 | 9,88 | 1,19 × 10 | 1,35 × 10 | 1,44 × 10 | 1,48 × 10 | 1,47 × 10 |
| 1 600 | 1,88 | 2,58 | 3,42 | 5,48 | 7,90 | 1,05 × 10 | 1,30 × 10 | 1,52 × 10 | 1,69 × 10 | 1,80 × 10 | 1,86 × 10 |
| 2 000 | 2,10 | 2,80 | 3,65 | 5,73 | 8,24 | 1,10 × 10 | 1,39 × 10 | 1,66 × 10 | 1,90 × 10 | 2,10 × 10 | 2,24 × 10 |
| 2 500 | 2,44 | 3,15 | 4,00 | 6,10 | 8,66 | 1,16 × 10 | 1,47 × 10 | 1,78 × 10 | 2,08 × 10 | 2,35 × 10 | 2,58 × 10 |
| 3 150 | 2,99 | 3,69 | 4,55 | 6,66 | 9,26 | 1,23 × 10 | 1,55 × 10 | 1,90 × 10 | 2,24 × 10 | 2,57 × 10 | 2,88 × 10 |
| 4 000 | 3,86 | 4,56 | 5,42 | 7,54 | 1,02 × 10 | 1,32 × 10 | 1,66 × 10 | 2,02 × 10 | 2,40 × 10 | 2,78 × 10 | 3,14 × 10 |
| 5 000 | 5,24 | 5,94 | 6,80 | 8,92 | 1,16 × 10 | 1,46 × 10 | 1,81 × 10 | 2,19 × 10 | 2,59 × 10 | 3,00 × 10 | 3,41 × 10 |
| 6 300 | 7,42 | 8,12 | 8,98 | 1,11 × 10 | 1,38 × 10 | 1,69 × 10 | 2,04 × 10 | 2,42 × 10 | 2,83 × 10 | 3,27 × 10 | 3,71 × 10 |
| 8 000 | $1,09 \times 10$ | $1,16 \times 10$ | $1,24 \times 10$ | $1,46 \times 10$ | $1,72 \times 10$ | $2,03 \times 10$ | $2,39 \times 10$ | $2,78 \times 10$ | $3,20 \times 10$ | $3,65 \times 10$ | $4,11 \times 10$ |
| 10 000 | $1,64 \times 10$ | $1,71 \times 10$ | $1,79 \times 10$ | $2,01 \times 10$ | $2,27 \times 10$ | $2,58 \times 10$ | $2,94 \times 10$ | $3,33 \times 10$ | $3,76 \times 10$ | $4,22 \times 10$ | $4,70 \times 10$ |

| (b) Température atmosphérique: -15 °C | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fréquence normale Hz | Humidité relative, % | | | | | | | | | | |
| | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 50 | $5,73 \times 10^{-1}$ | $4,25 \times 10^{-1}$ | $3,21 \times 10^{-1}$ | $2,12 \times 10^{-1}$ | $1,64 \times 10^{-1}$ | $1,39 \times 10^{-1}$ | $1,24 \times 10^{-1}$ | $1,14 \times 10^{-1}$ | $1,07 \times 10^{-1}$ | $1,02 \times 10^{-1}$ | $9,68 \times 10^{-2}$ |
| 63 | $7,93 \times 10^{-1}$ | $6,18 \times 10^{-1}$ | $4,72 \times 10^{-1}$ | $3,05 \times 10^{-1}$ | $2,28 \times 10^{-1}$ | $1,88 \times 10^{-1}$ | $1,66 \times 10^{-1}$ | $1,52 \times 10^{-1}$ | $1,42 \times 10^{-1}$ | $1,35 \times 10^{-1}$ | $1,30 \times 10^{-1}$ |
| 80 | 1,06 | $8,85 \times 10^{-1}$ | $6,93 \times 10^{-1}$ | $4,46 \times 10^{-1}$ | $3,24 \times 10^{-1}$ | $2,60 \times 10^{-1}$ | $2,24 \times 10^{-1}$ | $2,02 \times 10^{-1}$ | $1,87 \times 10^{-1}$ | $1,77 \times 10^{-1}$ | $1,70 \times 10^{-1}$ |
| 100 | 1,34 | 1,23 | 1,01 | $6,60 \times 10^{-1}$ | $4,71 \times 10^{-1}$ | $3,68 \times 10^{-1}$ | $3,08 \times 10^{-1}$ | $2,71 \times 10^{-1}$ | $2,48 \times 10^{-1}$ | $2,32 \times 10^{-1}$ | $2,21 \times 10^{-1}$ |
| 125 | 1,62 | 1,65 | 1,44 | $9,79 \times 10^{-1}$ | $6,95 \times 10^{-1}$ | $5,32 \times 10^{-1}$ | $4,35 \times 10^{-1}$ | $3,74 \times 10^{-1}$ | $3,34 \times 10^{-1}$ | $3,08 \times 10^{-1}$ | $2,89 \times 10^{-1}$ |
| 160 | 1,88 | 2,11 | 1,99 | 1,45 | 1,04 | $7,86 \times 10^{-1}$ | $6,30 \times 10^{-1}$ | $5,31 \times 10^{-1}$ | $4,64 \times 10^{-1}$ | $4,18 \times 10^{-1}$ | $3,86 \times 10^{-1}$ |
| 200 | 2,08 | 2,57 | 2,63 | 2,10 | 1,55 | 1,17 | $9,32 \times 10^{-1}$ | $7,72 \times 10^{-1}$ | $6,63 \times 10^{-1}$ | $5,87 \times 10^{-1}$ | $5,32 \times 10^{-1}$ |
| 250 | 2,24 | 2,99 | 3,32 | 2,97 | 2,30 | 1,76 | 1,40 | 1,15 | $9,73 \times 10^{-1}$ | $8,47 \times 10^{-1}$ | $7,56 \times 10^{-1}$ |
| 315 | 2,35 | 3,33 | 3,98 | 4,05 | 3,34 | 2,64 | 2,11 | 1,73 | 1,45 | 1,25 | 1,10 |
| 400 | 2,43 | 3,59 | 4,56 | 5,27 | 4,73 | 3,89 | 3,17 | 2,61 | 2,19 | 1,88 | 1,65 |
| 500 | 2,50 | 3,78 | 5,03 | 6,52 | 6,43 | 5,61 | 4,70 | 3,93 | 3,32 | 2,85 | 2,49 |
| 630 | 2,55 | 3,93 | 5,39 | 7,67 | 8,35 | 7,81 | 6,83 | 5,85 | 5,01 | 4,33 | 3,78 |
| 800 | 2,61 | 4,05 | 5,66 | 8,65 | 1,03 × 10 | 1,04 × 10 | 9,62 | 8,53 | 7,46 | 6,53 | 5,74 |
| 1 000 | 2,67 | 4,15 | 5,87 | 9,44 | 1,21 × 10 | 1,32 × 10 | 1,30 × 10 | 1,21 × 10 | 1,09 × 10 | 9,69 | 8,63 |
| 1 250 | 2,77 | 4,28 | 6,07 | 1,01 × 10 | 1,37 × 10 | 1,60 × 10 | 1,67 × 10 | 1,63 × 10 | 1,53 × 10 | 1,40 × 10 | 1,28 × 10 |
| 1 600 | 2,92 | 4,44 | 6,28 | 1,06 × 10 | 1,49 × 10 | 1,84 × 10 | 2,05 × 10 | 2,11 × 10 | 2,07 × 10 | 1,97 × 10 | 1,83 × 10 |
| 2 000 | 3,14 | 4,67 | 6,54 | 1,10 × 10 | 1,59 × 10 | 2,05 × 10 | 2,39 × 10 | 2,60 × 10 | 2,67 × 10 | 2,64 × 10 | 2,54 × 10 |
| 2 500 | 3,49 | 5,03 | 6,92 | 1,15 × 10 | 1,68 × 10 | 2,22 × 10 | 2,69 × 10 | 3,05 × 10 | 3,27 × 10 | 3,37 × 10 | 3,37 × 10 |
| 3 150 | 4,04 | 5,59 | 7,49 | 1,22 × 10 | 1,78 × 10 | 2,37 × 10 | 2,95 × 10 | 3,45 × 10 | 3,84 × 10 | 4,10 × 10 | 4,25 × 10 |
| 4 000 | 4,92 | 6,47 | 8,38 | 1,31 × 10 | 1,89 × 10 | 2,52 × 10 | 3,18 × 10 | 3,79 × 10 | 4,34 × 10 | 4,78 × 10 | 5,11 × 10 |
| 5 000 | 6,31 | 7,86 | 9,78 | 1,46 × 10 | 2,04 × 10 | 2,71 × 10 | 3,41 × 10 | 4,12 × 10 | 4,79 × 10 | 5,40 × 10 | 5,91 × 10 |
| 6 300 | 8,52 | 1,01 × 10 | 1,20 × 10 | 1,68 × 10 | 2,27 × 10 | 2,96 × 10 | 3,70 × 10 | 4,47 × 10 | 5,24 × 10 | 5,98 × 10 | 6,65 × 10 |
| 8 000 | $1,20 \times 10$ | $1,36 \times 10$ | $1,55 \times 10$ | $2,03 \times 10$ | $2,63 \times 10$ | $3,32 \times 10$ | $4,09 \times 10$ | $4,90 \times 10$ | $5,74 \times 10$ | $6,58 \times 10$ | $7,39 \times 10$ |
| 10 000 | $1,75 \times 10$ | $1,91 \times 10$ | $2,10 \times 10$ | $2,59 \times 10$ | $3,19 \times 10$ | $3,89 \times 10$ | $4,67 \times 10$ | $5,51 \times 10$ | $6,40 \times 10$ | $7,30 \times 10$ | $8,21 \times 10$ |