

# norme française

**NF ISO 226**

Février 2004

Indice de classement : **S 30-003****ICS : 13.140**

Acoustique

## Lignes isosoniques normales

E : Acoustics — Normal equal-loudness-level contoursb

D : Akustik — Normalkurven gleicher Lautstärke

### **Norme française homologuée**

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 20 janvier 2004 pour prendre effet le 20 février 2004.

Remplace la norme homologuée NF ISO 226, d'août 1987.

### **Correspondance**

Le présent document reproduit intégralement la Norme internationale ISO 226:2003.

### **Analyse**

Le présent document spécifie les combinaisons de niveau de pression acoustique et de fréquences de sons purs continus qui sont perçus comme isosoniques par des auditeurs humains.

### **Descripteurs**

**Thésaurus International Technique** : acoustique, audiométrie, perception auditive, ligne isosonique, onde sonore, pression sonore, fréquence acoustique, seuil d'audition, définition, spécification.

### **Modifications**

Par rapport au document remplacé, il a été procédé à la révision des lignes isosoniques.

### **Corrections**



**Membres de la commission de normalisation**

Président : M MEYER-BISCH

Secrétariat : MME RAMIREZ — AFNOR

M	ARAN	CHU BORDEAUX HOPITAL PELLEGRIN
M	ARCE	BUREL & KJAER FRANCE
M	AUFFRET	MAURICE AUFFRET BUREAU D'ETUDES
M	CABARET	CRAM LANGUEDOC ROUSSILLON
M	CARME	TECHNOFIRST SA
M	CHALMET	UTE
M	DANCER	ISL
M	GELIS	UFS SCIENCES PHARMACEUTIQUES
M	HATON	LORIA
M	JACQUES	
M	LAFONT	01DB-STELL
M	LEGROS	LAUTM
M	LOUIT	DRT — DION RELATIONS TRAVAIL
M	MEYER-BISCH	
M	MONFORT	FRANCE TELECOM R&D
M	MONNET	MFP MICHELIN
M	PERDEREAU	LNE
M	PREVEL	CIMENTS CALCIA
M	ROSTOLLAND	INSTITUT LINGUISTIQUE PHONETIQUE
MME	ZEME RAMIREZ	EDF GDF SCAST

***Avant-propos national****Références aux normes françaises*

*La correspondance entre la norme mentionnée à l'article «Références normatives» et la norme française identique est la suivante :*

*ISO 266 : NF EN ISO 266 (indice de classement : S 30-002)*

<b>Sommaire</b>	Page
<b>Avant-propos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>v</b>
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>4</b> <b>Formules pour la détermination des lignes isosoniques normales</b> .....	<b>2</b>
<b>4.1</b> <b>Obtention du niveau de pression acoustique à partir du niveau de sonie</b> .....	<b>2</b>
<b>4.2</b> <b>Obtention du niveau de sonie à partir du niveau de pression acoustique</b> .....	<b>3</b>
<b>Annexe A</b> (normative) <b>Lignes isosoniques normales pour des sons purs dans des conditions d'écoute en champ libre</b> .....	<b>5</b>
<b>Annexe B</b> (normative) <b>Tableaux des lignes isosoniques normales pour des sons purs dans des conditions d'écoute en champ libre</b> .....	<b>6</b>
<b>Annexe C</b> (informative) <b>Notes sur l'obtention des lignes isosoniques normales</b> .....	<b>9</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>17</b>

## 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 Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. 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.

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

L'ISO 226 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 43, *Acoustique*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 226:1987), dont elle constitue une révision technique.

## Introduction

Les courbes qui définissent la combinaison de sons purs en termes de fréquence et de niveau de pression acoustique, perçus comme étant d'une intensité équivalente, c'est-à-dire isosoniques, expriment une propriété essentielle du système auditif humain et sont d'une importance fondamentale en psychoacoustique. De telles lignes isosoniques, ainsi que des données sur le seuil d'audition dans des conditions d'écoute en champ libre et en champ diffus étaient spécifiées dans l'ISO 226:1987.

NOTE 1 Il est également possible de déterminer les niveaux d'isotonie pour des bandes de bruits. Cependant, seules les lignes isosoniques pour les sons purs sont spécifiées dans la présente norme parce que les données disponibles pour les bandes de bruit sont insuffisantes. Néanmoins, il est possible d'appliquer la présente Norme internationale aux bandes de bruit d'un tiers d'octave.

Lors de la révision technique de la présente Norme internationale il a été décidé de séparer les données liminaires (seuils d'audition) et supra-liminaires en deux documents séparés parce que les données sur les niveaux d'isotonie disponibles n'étaient pas suffisantes et parce que les seuils d'audition représentent un besoin. Les valeurs de seuils étaient spécifiées dans l'ISO 389-7:1996, *Acoustique — Zéro de référence pour l'étalonnage d'équipements audiométriques — Partie 7: Niveau liminaire de référence dans des conditions d'écoute en champ libre et en champ diffus*, et constituent une partie de la série des Normes internationales relatives aux valeurs de zéro de référence pour l'étalonnage d'équipements audiométriques. Les lignes isosoniques sont présentées dans la présente Norme internationale. Elles sont révisées par rapport aux données de l'ISO 226:1987.

NOTE 2 L'ISO 389-7:1996 est actuellement en cours de révision pour aligner les données avec la présente édition de l'ISO 226.



# Acoustique — Lignes isosoniques normales

## 1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie les combinaisons de niveaux de pression acoustique et de fréquences de sons purs continus qui sont perçus comme isosoniques par des auditeurs humains. Les spécifications sont basées sur les conditions suivantes:

- a) le champ acoustique en l'absence de l'auditeur consiste en une onde plane progressive libre;
- b) la source de bruit fait directement face à l'auditeur;
- c) les signaux sonores sont des sons purs;
- d) le niveau de pression acoustique est mesuré en la position du centre de la tête de l'auditeur en l'absence de ce dernier;
- e) l'écoute est binaurale;
- f) les auditeurs sont des sujets otologiquement normaux âgés de 18 ans à 25 ans inclusivement.

Les données sont présentées sous forme graphique dans l'Annexe A et sous forme numérique dans l'Annexe B pour les fréquences normales de tiers d'octave comprises entre 20 Hz et 12 500 Hz inclusivement, en conformité avec l'ISO 266.

## 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 266, *Acoustique — Fréquences normales*

## 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

### 3.1

#### **sujet otologiquement normal**

personne en état de santé normal, ne présentant aucun signe ou symptôme d'affections otologiques, dont le conduit auditif externe n'est pas obstrué de cérumen, qui n'a subi antérieurement aucune exposition anormale au bruit, qui ne prend pas de médicaments potentiellement ototoxiques et dont les antécédents familiaux ne souffrent d'aucune perte auditive

### 3.2

#### **champ acoustique libre**

champ acoustique dont les limites de la pièce exercent un effet négligeable sur les ondes sonores

**3.3**  
**niveau de sonie**  
 valeur exprimée en phones qui a une valeur numérique égale au niveau de pression acoustique en décibels d'un son de référence, consistant en une onde plane progressive libre, d'incidence frontale, de fréquence 1 000 Hz, dont l'intensité est jugée égale à celle du son donné

**3.4**  
**relation d'isophonie**  
 courbe ou fonction exprimant pour un son pur d'une fréquence donnée, la relation entre son niveau de sonie et son niveau de pression acoustique

**3.5**  
**ligne isophonique**  
 sur un graphique ayant comme coordonnées la fréquence et le niveau de pression acoustique, ligne joignant les points dont les coordonnées représentent des sons purs jugés de même intensité

**3.6**  
**ligne isophonique normale**  
 ligne isophonique correspondant au jugement moyen de sujets otologiquement normaux âgés de 18 ans à 25 ans inclusivement

NOTE La méthode pour l'obtention des lignes isophoniques normales est décrite dans l'Annexe C.

**3.7**  
**seuil d'audition**  
 niveau d'un son pour lequel, dans des conditions spécifiées, un sujet donne 50 % de réponses correctes de détection au cours d'essais répétés

**4 Formules pour la détermination des lignes isophoniques normales**

**4.1 Obtention du niveau de pression acoustique à partir du niveau de sonie**

Le niveau de pression acoustique  $L_p$  d'un son pur de fréquence  $f$ , qui a un niveau de sonie  $L_N$ , est donné par:

$$L_p = \left( \frac{10}{\alpha_f} \lg A_f \right) \text{dB} - L_U + 94 \text{ dB} \tag{1}$$

où

$$A_f = 4,47 \times 10^{-3} \times (10^{0,025L_N} - 1,15) + \left[ 0,4 \times 10^{\left( \frac{T_f + L_U}{10} - 9 \right)} \right]^{\alpha_f}$$

$T_f$  est le seuil d'audition;

$\alpha_f$  est l'exposant de la perception du son;

$L_U$  est la valeur de la fonction de transfert linéaire normalisée à 1 000 Hz.

Les valeurs de toute ces grandeurs sont données au Tableau 1.

L'Équation (1) s'applique, à chaque fréquence, aux valeurs comprises entre la valeur limite inférieure de 20 phon et les valeurs limites supérieures suivantes:

- 20 Hz à 4 000 Hz:                    90 phon
- 5 000 Hz à 12 500 Hz:            80 phon

L'Équation (1) est uniquement informative pour des niveaux de sonie inférieurs à 20 phon parce qu'il manque des données expérimentales entre 20 phon et les seuils d'audition. De même pour les niveaux de sonie compris entre 90 phon et 100 phon, de 20 Hz à 1 000 Hz, parce que les données disponibles à 100 phon proviennent d'un seul institut.

#### 4.2 Obtention du niveau de sonie à partir du niveau de pression acoustique

Le niveau de sonie,  $L_N$ , d'un son pur de fréquence  $f$ , qui a une pression acoustique  $L_p$ , est donné par:

$$L_N = (40 \lg B_f) \text{ phon} + 94 \text{ phon} \quad (2)$$

où

$$B_f = \left[ 0,4 \times 10^{\left( \frac{L_p + L_U}{10} - 9 \right)} \right]^{\alpha_f} - \left[ 0,4 \times 10^{\left( \frac{T_f + L_U}{10} - 9 \right)} \right]^{\alpha_f} + 0,005 \ 135$$

et  $T_f$ ,  $\alpha_f$  et  $L_U$  sont les mêmes qu'en 4.1.

Les limitations s'appliquant à l'Équation (2) sont les mêmes que pour l'Équation (1).

**Tableau 1 — Paramètres de l'Équation (1) utilisés pour calculer les lignes isosoniques normales**

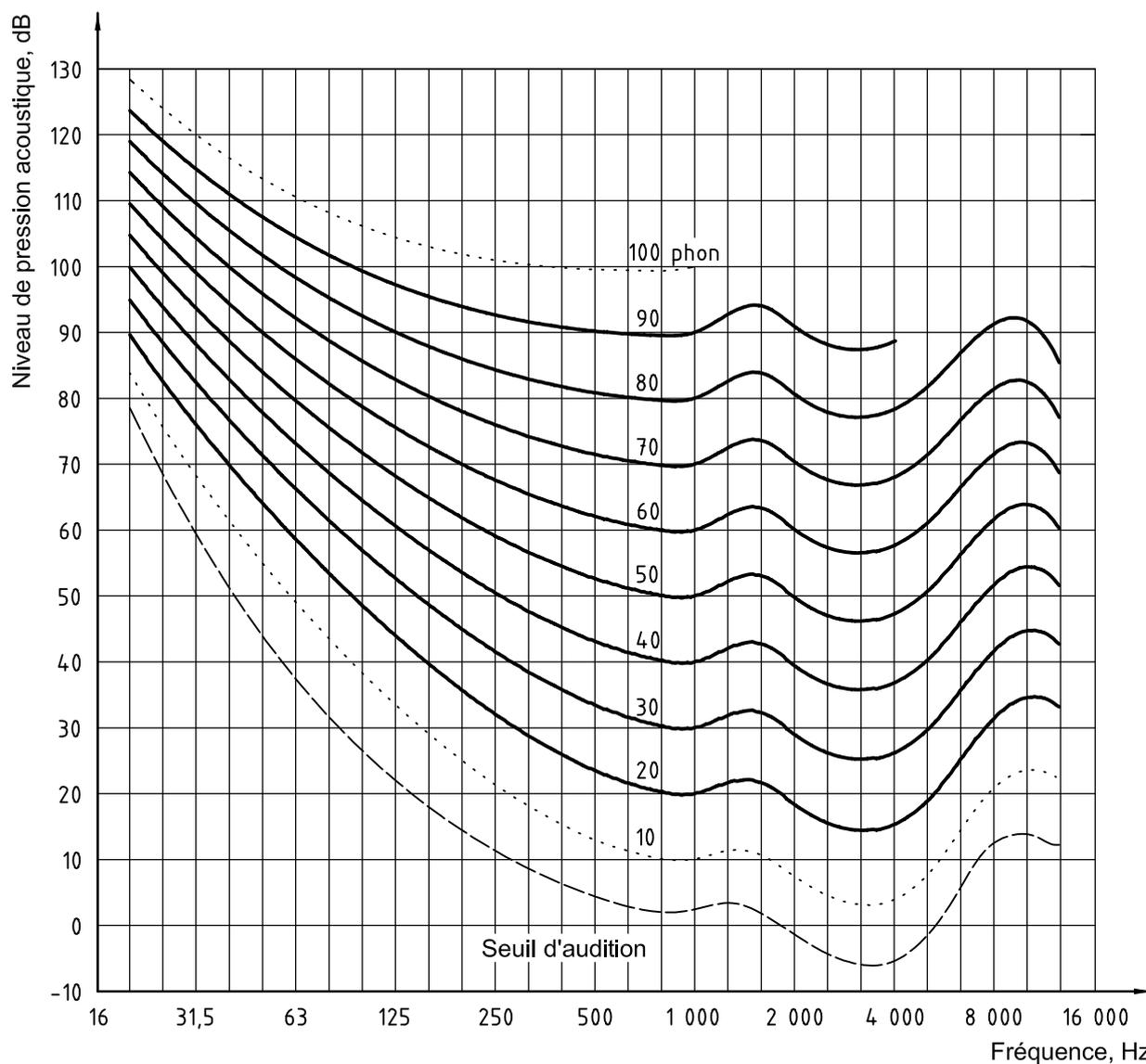
Fréquence, $f$ Hz	$\alpha_f$	$L_U$ dB	$T_f$ dB
20	0,532	-31,6	78,5
25	0,506	-27,2	68,7
31,5	0,480	-23,0	59,5
40	0,455	-19,1	51,1
50	0,432	-15,9	44,0
63	0,409	-13,0	37,5
80	0,387	-10,3	31,5
100	0,367	-8,1	26,5
125	0,349	-6,2	22,1
160	0,330	-4,5	17,9
200	0,315	-3,1	14,4
250	0,301	-2,0	11,4
315	0,288	-1,1	8,6
400	0,276	-0,4	6,2
500	0,267	0,0	4,4
630	0,259	0,3	3,0
800	0,253	0,5	2,2
1 000	0,250	0,0	2,4

Tableau 1 (suite)

Fréquence, $f$ Hz	$\alpha_f$	$L_U$ dB	$T_f$ dB
1 250	0,246	-2,7	3,5
1 600	0,244	-4,1	1,7
2 000	0,243	-1,0	-1,3
2 500	0,243	1,7	-4,2
3 150	0,243	2,5	-6,0
4 000	0,242	1,2	-5,4
5 000	0,242	-2,1	-1,5
6 300	0,245	-7,1	6,0
8 000	0,254	-11,2	12,6
10 000	0,271	-10,7	13,9
12 500	0,301	-3,1	12,3

## Annexe A (normative)

### Lignes isosoniques normales pour des sons purs dans des conditions d'écoute en champ libre



NOTE 1 Le seuil d'audition dans des conditions d'écoute en champ libre,  $T_f$ , est indiqué par la ligne en trait discontinu.

NOTE 2 La ligne à 10 phon est représentée par une courbe en trait pointillé à cause du manque de données expérimentales entre 20 phon et les seuils d'audition. En outre, la ligne de 100 phon est également représentée par une courbe en trait pointillé parce que les données disponibles à ce niveau de sonie proviennent d'un seul institut.

**Figure A.1 — Lignes isosoniques normales des sons purs**  
(écoute binaurale en champ libre, incidence frontale)

**Annexe B**  
(normative)

**Tableaux des lignes isosoniques normales pour des sons purs dans des conditions d'écoute en champ libre**

**Tableau B.1 — Niveau de pression acoustique correspondant à un niveau de sonie donné pour des sons purs, dans l'intervalle de fréquence compris entre 20 Hz et 12 500 Hz**

Niveau de sonie phon	Niveau de pression acoustique, dB									
	Fréquence, Hz									
	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
10	(83,8)	(75,8)	(68,2)	(61,1)	(55,0)	(49,0)	(43,2)	(38,1)	(33,5)	(28,8)
20	89,6	82,7	76,0	69,6	64,0	58,6	53,2	48,4	43,9	39,4
30	94,8	88,5	82,4	76,5	71,3	66,2	61,2	56,8	52,6	48,4
40	99,9	93,9	88,2	82,6	77,8	73,1	68,5	64,4	60,6	56,7
50	104,7	99,1	93,7	88,5	84,0	79,6	75,4	71,6	68,2	64,7
60	109,5	104,2	99,1	94,2	90,0	85,9	82,1	78,7	75,6	72,5
70	114,3	109,2	104,4	99,8	95,9	92,2	88,6	85,6	82,9	80,2
80	119,0	114,2	109,6	105,3	101,7	98,4	95,2	92,5	90,1	87,8
90	123,7	119,2	114,9	110,9	107,5	104,5	101,7	99,3	97,3	95,4
100	(128,4)	(124,2)	(120,1)	(116,4)	(113,4)	(110,6)	(108,2)	(106,2)	(104,5)	(103,0)

**Tableau B.1 (suite)**

Niveau de sonie phon	Niveau de pression acoustique, dB									
	Fréquence, Hz									
	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600
10	(24,8)	(21,3)	(18,1)	(15,1)	(13,0)	(11,2)	(10,0)	10,0	(11,3)	(10,4)
20	35,5	32,0	28,7	25,7	23,4	21,5	20,1	20,0	21,5	21,4
30	44,8	41,5	38,4	35,5	33,4	31,5	30,1	30,0	31,6	32,0
40	53,4	50,4	47,6	45,0	43,1	41,3	40,1	40,0	41,8	42,5
50	61,7	59,0	56,5	54,3	52,6	51,1	50,0	50,0	52,0	52,9
60	69,9	67,5	65,4	63,5	62,1	60,8	59,9	60,0	62,2	63,2
70	77,9	75,9	74,2	72,6	71,5	70,5	69,8	70,0	72,3	73,5
80	85,9	84,3	82,9	81,7	80,9	80,2	79,7	80,0	82,5	83,7
90	93,9	92,6	91,6	90,8	90,2	89,8	89,6	90,0	92,6	94,0
100	(101,8)	(101,0)	(100,3)	(99,8)	(99,6)	(99,5)	(99,4)	100,0	—	—

Tableau B.1 (suite)

Niveau de sonie phon	Niveau de pression acoustique, dB								
	Fréquence, Hz								
	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000	12 500
10	(7,3)	(4,5)	(3,0)	(3,8)	(7,5)	(14,3)	(21,0)	(23,4)	(22,3)
20	18,2	15,4	14,3	15,1	18,6	25,0	31,5	34,4	33,0
30	28,8	26,0	25,0	26,0	29,4	35,5	41,7	44,6	42,5
40	39,2	36,5	35,6	36,6	40,0	45,8	51,8	54,3	51,5
50	49,6	46,9	46,1	47,1	50,5	56,1	61,8	63,8	60,1
60	60,0	57,3	56,4	57,6	60,9	66,4	71,7	73,2	68,6
70	70,3	67,6	66,8	68,0	71,3	76,6	81,5	82,5	77,0
80	80,6	77,9	77,1	78,3	81,6	86,8	91,4	91,7	85,4
90	90,9	88,2	87,4	88,7	—	—	—	—	—
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—

NOTE Les valeurs entre parenthèses sont données à titre d'information.

Tableau B.2 — Niveau de sonie correspondant à un niveau de pression acoustique donné pour des sons purs, dans l'intervalle de fréquence compris entre 20 Hz et 12 500 Hz

Niveau de pression acoustique dB	Niveau de sonie, phon									
	Fréquence, Hz									
	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	(4,3)	(7,3)	(11,1)
40	—	—	—	—	—	—	(7,5)	(11,6)	(16,0)	20,7
50	—	—	—	—	(6,0)	(10,9)	(16,5)	21,9	26,9	31,9
60	—	—	—	(8,9)	(15,2)	21,8	28,4	34,2	39,3	44,1
70	—	—	(12,1)	20,6	28,2	35,5	42,2	47,8	52,5	56,8
80	(4,4)	(15,9)	26,2	35,7	43,6	50,7	57,0	62,0	66,1	69,8
90	20,8	32,7	43,3	52,7	60,1	66,5	72,1	76,4	79,9	82,9
100	40,3	51,7	61,8	70,4	77,1	82,7	87,5	(91,0)	(93,8)	(96,1)
110	61,1	71,6	80,7	88,5	(94,3)	(99,0)	—	—	—	—
120	82,2	(91,7)	(99,8)	—	—	—	—	—	—	—

Tableau B.2 (suite)

Niveau de pression acoustique dB	Niveau de sonie, phon									
	Fréquence, Hz									
	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	(5,5)	(7,3)	(8,9)	(10,0)	10,0	(8,8)	(9,6)
20	(6,2)	(8,9)	(11,8)	(14,5)	(16,7)	(18,6)	(19,9)	20,0	(18,6)	(18,7)
30	(14,6)	(18,0)	21,3	24,4	26,6	28,5	29,9	30,0	28,4	28,1
40	24,8	28,4	31,8	34,7	36,9	38,7	40,0	40,0	38,2	37,6
50	36,0	39,6	42,7	45,4	47,3	48,9	50,0	50,0	48,1	47,3
60	47,9	51,2	53,9	56,3	57,9	59,2	60,1	60,0	57,9	56,9
70	60,2	63,0	65,3	67,2	68,5	69,5	70,3	70,0	67,8	66,7
80	72,6	74,9	76,7	78,2	79,1	79,9	80,4	80,0	77,6	76,4
90	85,2	86,9	88,2	89,2	89,8	(90,2)	(90,5)	90,0	87,4	86,1
100	(97,7)	(98,9)	(99,7)	—	—	—	—	100,0	—	—
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tableau B.2 (suite)

Niveau de pression acoustique dB	Niveau de sonie, phon								
	Fréquence, Hz								
	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000	12 500
0	—	(6,1)	(7,4)	(6,8)	—	—	—	—	—
10	(12,5)	(15,1)	(16,2)	(15,4)	(12,3)	(6,0)	—	—	—
20	21,8	24,3	25,3	24,5	21,3	(15,3)	(9,1)	(7,1)	(8,1)
30	31,2	33,8	34,7	33,8	30,6	24,8	(18,6)	(15,9)	(17,0)
40	40,8	43,4	44,2	43,2	40,0	34,4	28,3	25,5	27,3
50	50,4	53,0	53,8	52,8	49,6	44,1	38,2	35,6	38,3
60	60,1	62,7	63,5	62,4	59,2	53,8	48,3	46,0	49,9
70	69,8	72,4	73,2	72,0	68,8	63,6	58,4	56,7	61,7
80	79,5	82,1	82,9	81,7	78,5	73,4	68,5	67,4	73,6
90	89,2	—	—	—	—	—	78,6	78,2	—
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—

NOTE Les valeurs entre parenthèses sont données à titre d'information.

## Annexe C (informative)

### Notes sur l'obtention des lignes isosoniques normales

#### C.1 Données expérimentales

Les lignes isosoniques normales des sons purs dans des conditions d'écoute en champ libre spécifiées dans l'ISO 226 sont obtenues à partir des résultats de douze études expérimentales indépendantes, données dans les références [1] à [12]. Dans la plupart des cas, les conditions expérimentales comme le stimuli et les caractéristiques du sujet ont satisfait aux conditions d'essais normales (voir référence [13]). Les écarts par rapport à ces conditions d'essais normales peuvent être considérés comme négligeables. De brèves descriptions de ces recherches sont données au Tableau C.1.

#### C.2 Obtention de l'Équation (1) et de l'Équation (2)

Les lignes isosoniques sont représentées sur un graphique bidimensionnel qui comprend un axe de fréquence et un axe de pression acoustique. Puisque les données expérimentales pour tracer les lignes sont discrètes, les données doivent être lissées et interpolées de manière appropriée. À cette fin, les relations d'isonomie ont été modélisées à l'aide d'une fonction. Les valeurs des paramètres de cette fonction sont obtenues en ajustant la fonction aux données expérimentales à l'aide de la méthode des moindres carrés.

L'interpolation le long de l'axe du niveau de pression acoustique était basée sur un modèle de fonction de sonie. Une fonction de sonie indique l'intensité d'un son en fonction du niveau de pression acoustique du son. Bien que plusieurs fonctions aient été proposées comme le modèle de fonction de sonie d'un son pur,  $l$ , c'est la fonction suivante qui a été appliquée ici:

$$l = c(p^{2\theta} - p_t^{2\theta}) \quad (\text{C.1})$$

où

$c$  est une constante dimensionnelle;

$p$  est la pression acoustique d'un son pur;

$\theta$  est l'exposant du processus de perception de la sonie;

$p_t$  est le seuil d'audition exprimé en pression acoustique.

Cette fonction a été donnée dans les références [14] et [15], et est connue pour décrire la fonction de sonie d'un son pur en l'absence de bruit qui masque très bien en dépit de sa forme simple (voir référence [16]).

De plus, dans la référence [17] il a été démontré que l'évaluation de la sonie comprend deux processus différents: l'un est un «processus de perception de la sonie» et l'autre est un «processus d'affectation du nombre». En se basant sur cette idée, il a proposé un modèle en deux étapes dans lequel les résultats des deux processus sont décrits par des transformations de puissance distinctes. En outre, dans un système auditif réel, le son émis par une source sonore est transformé par une fonction de transfert linéaire, telle que la fonction de transfert liée à la tête ou les fonctions de transfert de l'oreille externe, de l'oreille moyenne et la partie mécanique linéaire de l'oreille interne. La fonction de transfert linéaire indique une vaste fonction de transfert entre une source sonore et l'étape qui précède le processus de perception de la sonie. Conformément à ces idées, le processus d'évaluation de la sonie est composé de trois parties:

- une fonction de transfert linéaire,
- la perception de la sonie, et
- l'affectation du nombre.

La Figure C.1 représente un bloc-diagramme qui décrit ce modèle. La réponse de sonie basée sur ce modèle et la fonction de sonie de l'Équation (C.1) est donnée par l'équation suivante:

$$l = b \left[ c \left\{ (Up)^{2\alpha} - (Up_t)^{2\alpha} \right\} \right]^\beta \tag{C.2}$$

où

- $U$  est une fonction linéaire étendue;
- $c$  et  $\alpha$  sont respectivement une constante dimensionnelle étendue et un exposant relatif au «processus de perception de la sonie»;
- $b$  et  $\beta$  sont respectivement une constante dimensionnelle étendue et un exposant relatif au «processus d'affectation du nombre»;
- $p$  et  $p_t$  sont définis dans l'Équation (C.1).



**Figure C.1 — Bloc-diagramme du modèle de processus d'évaluation de la sonie**

Outre la pression acoustique, la relation d'isosonie le long de l'axe de la fréquence doit également être exprimée par une fonction. Lorsque la sonie d'un son pur de 1 000 Hz est égale à la sonie d'un son pur de  $f$ -Hz, l'équation suivante peut être dérivée de l'Équation (C.2):

$$P_f^2 = \frac{1}{U_f^2} \left[ \left( p_r^{2\alpha_r} - p_{tr}^{2\alpha_r} \right) + \left( U_f p_{tf} \right)^{2\alpha_f} \right]^{1/\alpha_f} \tag{C.3}$$

où

- $p_f$  est la pression acoustique d'un son pur de  $f$ -Hz lorsque sa sonie est égale à celle d'un son pur de 1 000 Hz avec une pression acoustique  $p_r$ ;
- $p_{tf}$  est le seuil d'audition à la fréquence  $f$ -Hz;
- $p_{tr}$  est le seuil d'audition à 1 000 Hz;
- $\alpha_f$  et  $\alpha_r$  sont respectivement les exposants pour des sons purs de  $f$ -Hz et 1 000 Hz;
- $U_f$  est une grandeur de la fonction de transfert linéaire normalisée à 1 000 Hz.

Cela qui signifie que, à 1 000 Hz  $U$  est fixé à 1. Dans ces déductions, il est supposé que les variables du «processus d'affectation du nombre»,  $b$  et  $\beta$ , ne dépendent pas de la fréquence. A l'aide de ces équations, il est possible de calculer le niveau de pression acoustique d'un son pur de  $f$ -Hz dont la sonie est égale à celle d'un son pur de 1 000 Hz.

L'Équation (C.3) peut être transformée en Équation (1) en remplaçant respectivement les variables

$$p_f^2, p_r^2, p_{tf}^2, p_{tr}^2 \text{ et } U_f^2$$

par

$$p_f^2 = p_0^2 10^{L_f/10}, p_r^2 = p_0^2 10^{L_N/10}, p_{tf}^2 = p_0^2 10^{T_f/10}, p_{tr}^2 = p_0^2 10^{T_r/10} \text{ et } U_f^2 = 10^{L_U/10},$$

respectivement, où  $p_0$  est 20  $\mu$ Pa, et 0,25 est substitué à  $\alpha_f$  et la valeur seuil de 2,4 dB est substituée à  $T_r$ .

Il est possible de déduire l'Équation (2) de l'Équation (C.3) en effectuant les mêmes remplacements.

L'exposant  $\alpha_f$ , qui est l'exposant à 1 000 Hz, est fixé à 0,25 pour la raison suivante. La valeur réelle obtenue à l'aide de la méthode AME (Estimation de la Magnitude Absolue) était 0,27 (0,54 pour la pression acoustique) (voir référence [15]). Mais la sonie obtenue par une expérience d'AME semble adaptée au résultat du modèle en deux étapes. L'exposant 0,27 correspond en fait à  $\alpha_f \beta$  dans les équations, où  $\beta = 1,08$ . Cette valeur de  $\beta$  a été déterminée dans la référence [18]. Il est par conséquent supposé que l'exposant à 1 000 Hz est 0,25 (= 0,27/1,08).

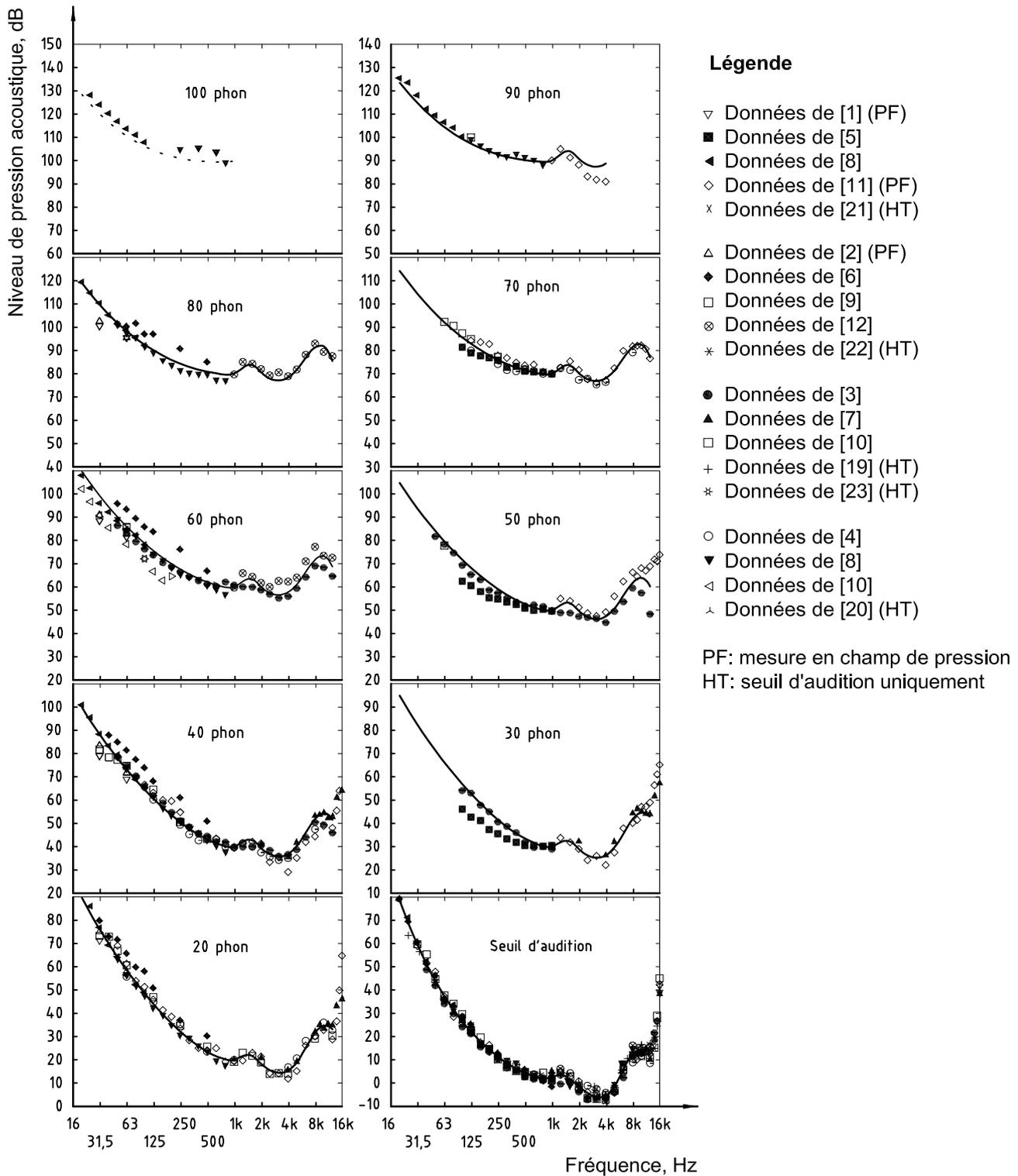
### C.3 Dérivation des paramètres dépendants de la fréquence, indiqués au Tableau 1

Il est possible de tracer les lignes isosoniques si les valeurs des paramètres qui dépendent de la fréquence,  $\alpha_f$ ,  $L_U$  et  $T_f$  de l'Équation (1) sont disponibles. Les valeurs ont été calculées à partir des données expérimentales conformément à la procédure suivante.

- À l'exception de deux études (références [19, 21]) où des valeurs moyennes ont été utilisées, les seuils d'audition de 20 Hz à 12 500 Hz (références [3-9, 11, 12, 20, 22, 23]) ont été représentés en prenant la moyenne des résultats des de chaque étude individuelles pour chaque fréquence, puis lissés et interpolés par une fonction cubique B-spline. Les valeurs résultantes sont indiquées sous  $T_f$  au Tableau 1. Le nombre de sujet n'a pas été pris en compte dans le calcul dans le calcul de la fonction spline.
- L'Équation (1) a été adaptée aux principaux résultats des études individuelles (références [1-12]) pour chaque fréquence à l'aide de la méthode des moindres carrés pour estimer  $\alpha_f$  et  $L_U$ . Les valeurs obtenues de  $\alpha_f$  ont été alors lissées et interpolées par une fonction cubique B-spline. Les valeurs résultantes sont indiquées sous  $\alpha_f$  au Tableau 1.
- Les valeurs de  $L_U$  ont alors été à nouveau estimées en utilisant l'Équation (1) avec les valeurs de  $\alpha_f$ . Les nouvelles valeurs de  $L_U$  ainsi estimées ont été lissées puis interpolées par une fonction cubique B-spline. Les valeurs résultantes sont indiquées sous  $L_U$  au Tableau 1.

### C.4 Comparaison entre les lignes isosoniques normales et les données expérimentales

L'estimation des lignes a été réalisée pour un intervalle de fréquence allant de 20 Hz à 12 500 Hz, parce que les données disponibles au-dessus de 12 500 Hz montrent une grande variabilité. La Figure C.2 représente les données issues des références [1] à [12] et [19] à [23], ainsi que les lignes isosoniques normales ajustées et la courbe des seuils d'audition.



NOTE 1 Les données mesurées dans le champ de pression (PF) concernent uniquement les basses fréquences [voir aussi Tableau C.1 et sa note b)].

NOTE 2 Les symboles représentent les données expérimentales; les lignes sont calculées conformément à l'Équation (1).

**Figure C.2 — Lignes isononiques normales pour un son pur dans des conditions d'écoute en champ libre pour une audition normale**

Tableau C.1 — Études des lignes isosoniques normales pour des sons purs

Étude	Référence [1]	Référence [2]	Référence [3]	Référence [4]
<b>Année</b>	1983	1984	1989	1989
<b>Pays</b>	Danemark	Danemark	Allemagne	Japon
<b>Champ acoustique</b>	Champ de pression <sup>b</sup>	Champ de pression <sup>b</sup>	Champ libre	Champ libre
<b>Intervalle mesuré<sup>a</sup></b>	20 phon: 2 à 63 Hz 40 phon: 2 à 63 Hz 60 phon: 2 à 63 Hz 80 phon: 8 à 63 Hz 100 phon: 31,5 à 63 Hz	20 phon: 2 à 63 Hz 40 phon: 2 à 63 Hz 60 phon: 2 à 63 Hz 80 phon: 4 à 63 Hz 100 phon: 16 à 63 Hz	Seuil: 40 à 15 000 Hz 30 phon: 100 à 1 000 Hz 40 phon: 50 à 12 500 Hz 50 phon: 50 à 12 500 Hz 60 phon: 50 à 12 500 Hz	Seuil: 63, 125, 250 à 12 500 Hz 20 phon: 63, 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000 à 12 500 Hz 40 phon: 125, 250 à 4 000, 8 000 Hz 70 phon: 125, 250 à 4 000, 8 000 Hz
<b>Nombre de sujets (âge)</b>	14 (18 à 25)	20 (18 à 25)	13 à 49 (17 à 25)	9 à 32 (19 à 25)
<b>Méthode expérimentale</b>	Méthode séquentielle du maximum de vraisemblance randomisé	Méthode séquentielle du maximum de vraisemblance randomisé	Méthode des stimuli constants	Méthode des stimuli constants
<b>Son de référence</b>	63 Hz à un niveau fixe	63 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe
<b>Niveau du son d'essai</b>	Choisi de manière aléatoire de $\mu$ et $\mu \pm \sigma^c$	Choisi de manière aléatoire de $\mu$ , $\mu \pm \sigma$ à $\mu \pm 2\sigma^c$	7 niveaux séparés de 5 dB chacun.	9 niveaux séparés de 1,5 dB à 4,5 dB chacun.
<b>Durée d'un son</b>	2 s	2 s	1 s	1 s
<b>Ordre de présentation des sons</b>	Le son de référence a été présenté le premier.	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire
<b>Nombre de jugements par essai/critère de fin</b>	Lorsque l'opérateur sentait que son estimation du PSE était suffisamment précise	Lorsque les 5 niveaux possibles pour un essai donné ont déjà été présentés	7 niveaux de son d'essai $\times$ 3 fois = 21 jugements	9 niveaux de son d'essai $\times$ 20 fois = 180 jugements
<b>Estimation de PSE</b>	Estimation selon le maximum de vraisemblance	Estimation selon le maximum de vraisemblance	Quand le taux de réponses plus intenses est de 50 %	Estimation selon le maximum de vraisemblance
<b>Note</b>	Le niveau du son de référence a été déterminé individuellement à partir du résultat de la comparaison de l'isotonie entre le son de référence à 1 000 Hz et le son d'essai à 63 Hz	Le niveau du son de référence a été déterminé individuellement à partir du résultat de la comparaison de l'isotonie entre le son de référence à 1 000 Hz et le son d'essai à 63 Hz	Les niveaux du son d'essai ont été modifiés de 2,5 dB entre chaque session	

Tableau C.1 (suite)

Étude	Référence [5]	Référence [6]	Référence [7]
Année	1990	1990	1994
Pays	Allemagne	Danemark	Danemark
Champ acoustique	Champ libre	Champ libre	Champ libre
Intervalle mesuré <sup>a</sup>	Seuil: 100 Hz à 1 000 Hz 30 phon: 100 Hz à 1 000 Hz 50 phon: 100 Hz à 1 000 Hz 70 phon: 100 Hz à 1 000 Hz	Seuil: 25 Hz à 125, 250, 500, 1 000 Hz 20 phon: 31,5 Hz à 125, 250, 500 Hz 40 phon: 40 Hz à 125, 250, 500 Hz 60 phon: 50 Hz à 125, 250, 500 Hz 80 phon: 50 Hz à 125, 250, 500 Hz	Seuil: 1 000 Hz à 16 000 Hz 20 phon: 1 000 Hz à 16 000 Hz 30 phon: 1 000 Hz à 16 000 Hz 40 phon: 1 000 Hz à 16 000 Hz
Nombre de sujets (âge)	12 (21 à 25)	10 à 12 (18 à 30)	29 (18 à 25)
Méthode expérimentale	Méthode des stimuli constants	Méthode d'encadrement	Méthode d'encadrement
Son de référence	1 000 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe
Niveau du son d'essai	$\pm 1,875$ dB, $\pm 4,875$ dB, $\pm 7,875$ dB du niveau d'isotonie (référence [24])	Modifié par un pas de 2 dB	Modifié par un pas de 3 dB
Durée d'un son	1 s	1 s	1 s
Ordre de présentation des sons	Aléatoire	Aléatoire	Aléatoire
Nombre de jugements par essai/critère de fin	70 jugements (20 fois pour $\pm 1,875$ dB, 10 fois pour $\pm 4,875$ dB, 5 fois pour $\pm 7,875$ dB)	A la fin de 6 sons descendants et 5 sons ascendants	A la fin de 4 sons descendants et 4 sons ascendants
Estimation de PSE	50 % de la fonction psychométrique	Moyenne du niveau final de la séquence, sans les sons descendants initiaux	Valeur médiane du niveau final des séquences
Note		Le niveau du son d'essai initial était de 15 dB à 20 dB supérieur au niveau fixé dans l'ISO 226:1987	Le niveau du son d'essai initial était de 15 dB supérieur au niveau fixé dans l'ISO 226:1987

Tableau C.1 (suite)

Étude	Référence [8]		Référence [9]		Référence [10]	
Année	1997		1997		1999	
Pays	Danemark		Japon		Allemagne	
Champ acoustique	Champ libre	Champ de pression <sup>b</sup>	Champ libre	Champ de pression <sup>b</sup>	Champ libre	Champ de pression <sup>b</sup>
Intervalle mesuré <sup>a</sup>	Seuil: 50 Hz à 16 000 Hz 20 phon: 50 Hz à 800 Hz 40 phon: 50 Hz à 800 Hz 60 phon: 50 Hz à 800 Hz 80 phon: 50 Hz à 800 Hz 90 phon: 125 Hz à 800 Hz 100 phon: 250 Hz à 800 Hz	Seuil: 20 Hz à 100 Hz 20 phon: 20 Hz à 100 Hz 40 phon: 20 Hz à 100 Hz 60 phon: 20 Hz à 100 Hz 80 phon: 20 Hz à 100 Hz 90 phon: 20 Hz à 100 Hz 100 phon: 25 Hz à 100 Hz	Seuil: 31,5 Hz à 20 000 Hz <sup>d</sup> 20 phon: 31,5 Hz à 63, 125, 250, 500, 1 000 Hz à 4 000, 8 000, 12 500 Hz 40 phon: 31,5 Hz à 63, 125, 250, 500 Hz 50 phon: 125 Hz 60 phon: 125 Hz 70 phon: 63 Hz à 125, 250 Hz à 4 000, 8 000 Hz 90 phon: 125 Hz	60 phon: 16 Hz à 160 Hz 60 phon: 100 Hz, 200 Hz, 630 Hz, 1 000 Hz	60 phon: 100 Hz, 200 Hz, 630 Hz, 1 000 Hz	60 phon: 16 Hz à 160 Hz
Nombre de sujets (âge)	27 (19 à 25)	14 (19 à 25)	9 à 30 (19 à 25)	12 (incertain)		
Méthode expérimentale	Méthode séquentielle du maximum de vraisemblance randomisé		Méthode des stimuli constants		Méthode adaptative 1 haut-1 bas	
Son de référence	1 000 Hz à un niveau fixe	100 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe	100 Hz à un niveau fixe
Niveau du son d'essai	Choisi de manière aléatoire entre $\mu$ , $\mu \pm \sigma$ , et $\mu \pm 2\sigma$		9 niveaux séparés par 1,5 dB à 2,5 dB chacun		La valeur du pas initial était de 8 dB, puis elle était réduite de moitié jusqu'à ce que sa valeur finale soit de 2 dB à chaque seconde inversion dans les réponses	
Durée d'un son	1 s		1 s		N. A.	N. A.
Ordre de présentation des sons	Aléatoire		Aléatoire		N. A.	N. A.
Nombre de jugements par essai/critère de fin	La méthode prenait fin lorsque les cinq niveaux possibles pour un essai donné avaient déjà été présentés		9 niveaux de son d'essai $\times$ 20 fois = 180 jugements		À la fin de la séquence dont l'importance du pas est de 2 dB	
Estimation de PSE	Estimation selon le maximum de vraisemblance	Estimation selon le maximum de vraisemblance	Estimation selon le maximum de vraisemblance		N. A.	N. A.
Note		Le niveau d'isophonie individuel pour 100 Hz mesuré dans le champ libre a été utilisé comme niveau de son de référence				Le niveau d'isophonie individuel pour 100 Hz mesuré dans le champ libre a été utilisé comme niveau de son de référence

Tableau C.1 (suite)

Investigation	Référence [11]	Référence [12]
Année	2000	2002
Pays	Japon	Japon
Champ acoustique	Champ libre	
Intervalle mesuré <sup>a</sup>	Seuil: 31,5 Hz à 18 000 Hz 20 phon: 50 Hz à 16 000 Hz 30 phon: 1 000 Hz à 16 000 Hz 40 phon: 80 Hz à 15 000 Hz 50 phon: 1 000 Hz à 16 000 Hz 70 phon: 125 Hz à 12 500 Hz 90 phon: 1 000 Hz à 4 000 Hz	Seuil: 1 000 Hz à 12 500 Hz 60 phon: 1 000 Hz à 12 500 Hz 80 phon: 1 000 Hz à 6 300 Hz
Nombre de sujets (âge)	7 à 32 (18 à 25)	21 (20 à 25)
Méthode expérimentale	Méthode séquentielle du maximum de vraisemblance randomisé	Méthode séquentielle du maximum de vraisemblance randomisé
Son de référence	1 000 Hz à un niveau fixe	1 000 Hz à un niveau fixe
Niveau du son d'essai	Choisi de manière aléatoire entre $\mu$ , $\mu \pm 2$ dB, $\mu \pm 4$ dB et $\mu \pm 6$ dB <sup>c</sup>	Choisi de manière aléatoire entre $\mu$ , $\mu \pm 2$ dB, $\mu \pm 4$ dB, $\mu \pm 6$ dB et $\mu \pm 8$ dB <sup>c</sup>
Durée d'un son	1 s	1 s
Ordre dans une paire de sons	Aléatoire	Aléatoire
Nombre de jugements par essai/critère de fin	Lorsque 50 paires de sons ont été présentés	Lorsque 60 paires de sons ont été présentés
PSE estimation	Estimation selon le maximum de vraisemblance	Estimation selon le maximum de vraisemblance
Note	Les premier et second niveaux de présentation se situaient dans une fourchette de $\pm 20$ dB de la meilleure estimation de PSE donnée par l'auteur	Les premier et second niveaux de présentation se situaient dans une fourchette de $\pm 20$ dB de la meilleure estimation de PSE donnée par l'auteur

<sup>a</sup> L'intervalle mesuré «A Hz à B Hz» indique la série des fréquences centrales de tiers d'octave spécifiées dans l'ISO 266 et allant de A Hz à B Hz.

<sup>b</sup> Les expériences dans le «champ de pression» ont été réalisées dans une petite pièce spéciale dans laquelle une pression acoustique spécifiée est générée dans l'espace total. Les essais utilisant cette installation sont limitées à la zone des très basses fréquences. Des études comparatives ont confirmé que les résultats obtenus dans ces conditions expérimentales sont conformes à ceux obtenus en champ libre.

<sup>c</sup>  $\mu$  et  $\sigma$  sont la moyenne et l'écart-type estimés de la fonction psychométrique relative à la méthode de vraisemblance maximale.

<sup>d</sup> Le seuil d'audition a été traité non pas dans la référence [9] mais dans la référence [25] ainsi que dans la référence [4].

## Bibliographie

- [1] KIRK, B. Hørestyrke og genevirkning af infralyd. *Institute of Electronic Systems*, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 1983, pp. 1-111 (in Danish) ISSN 0106-0791
- [2] MØLLER, H., ANDRESEN, J. Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies. *J. Low Freq. Noise and Vib.*, **3**, 1984, pp. 78-87
- [3] BETKE, K., MELLERT, V. New measurements of equal-loudness level contours. *Proc. Inter-noise 89*. 1989, pp. 793-796
- [4] SUZUKI, S., SUZUKI, Y., KONO, S., SONE, T., KUMAGAI, M., MIURA, H. and KADO, H. Equal-loudness level contours for pure tone under free field listening condition (I) — Some data and considerations on experimental conditions. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **10**, 1989, pp. 329-338
- [5] FASTL, H., JAROSZEWSKI, A., SHORER, E. and ZWICKER, E. Equal loudness contours between 100 and 1 000 Hz for 30, 50, and 70 phon. *Acustica*, **70**, 1990, pp. 197-201
- [6] WATANABE, T. and MØLLER, H. Hearing threshold and equal loudness contours in free field at frequencies below 1 kHz. *J. Low Freq. Noise and Vib.*, **9**, 1990, pp. 135-148; WATANABE, T., MØLLER, H. Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field. *J. Low Frequency Noise Vibr.*, **9**, 1990, pp. 106-115
- [7] POULSEN, T. and THØGERSEN, L. Hearing threshold and equal loudness level contours in a free sound field for pure tones from 1 kHz to 16 kHz. *Proc. Nordic Acoust. Meeting*, 1994, pp. 195-198
- [8] LYDOLF, M. and MØLLER, H. New measurements of the threshold of hearing and equal-loudness contours at low frequencies. *Proceedings of the 8th International meeting on Low Frequency Noise and Vibration*, Gothenburg, Sweden, 1997, pp. 76-84
- [9] TAKESHIMA, H., SUZUKI, Y., KUMAGAI, M., SONE, T., FUJIMORI, T. and MIURA, H. Equal-loudness level measured with the method of constant stimuli — Equal-loudness level contours for pure tone under free-field listening condition (II). *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **18**, 1997, pp. 337-340
- [10] BELLMANN, M. A., MELLERT, V., RECKHARDT, C. and REMMERS, H. Sound and vibration at low frequencies. Joint meeting of ASA, EAA and DAGA, 1999, Berlin, Germany; *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**, 1999, p. 1297
- [11] TAKESHIMA, H., SUZUKI, Y., FUJII, H., KUMAGAI, M., ASHIHARA, K., FUJIMORI, T. and SONE, T. Equal-loudness contours measured by the randomized maximum likelihood sequential procedure. *Acustica — acta acustica*, **87**, 2001, pp. 389-399
- [12] TAKESHIMA, H., SUZUKI, Y., ASHIHARA, K. and FUJIMORI, T. Equal-loudness contours between 1 kHz and 12.5 kHz for 60 and 80 phons. *Acoust. Sci. & Tech.*, **23**, 2002, pp. 106-109
- [13] ISO/TC 43/WG 1 Threshold of hearing, Preferred test conditions for determining hearing thresholds for standardization. *Scand. Audiol.*, **25**, 1996, pp. 45-52
- [14] ZWISLOCKI, J.J. and HELLMAN, R.P. On the psychophysical law. *J. Acoust. Soc. Am.*, **32**, 1960, p. 924
- [15] LOCHNER, J.P.A. and BURGER, J.F. Form of the loudness function in the presence of masking noise. *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 1961, pp. 1705-1707
- [16] HUMES, L.E. and JESTEADT, W. Models of the effects of threshold on loudness growth and summation. *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**, 1991, pp. 1933-1943

- [17] ATTENEAVE, F. *Perception and related areas. A study of science*, 4, S. Koch Ed., McGraw Hill, New York, 1962
- [18] ZWISLOCKI, J.J. Group and individual relations between sensation magnitudes and their numerical estimates. *Perception & Psychophysics*, **33**, 1983, pp. 460-468
- [19] ROBINSON, D.W. and DADSON, M.A. A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. *British J. App. Phy.*, **7**, 1956, pp. 166-181
- [20] TERANISHI, R. Study about measurement of loudness on the problems of minimum audible sound. *Researches of the Electrotechnical laboratory*, No. 658, Tokyo, Japan, 1965
- [21] BRINKMANN, K. Audiometer-Bezugsschwelle und Freifeld-Hörschwelle. *Acustica*, **28**, 1973, pp. 147-154
- [22] VORLÄNDER, M. Freifeld-Hörshwellen von 8 kHz — 16 kHz. *Fortschritte der Akustik — DAGA '91*, Bad Honnef, DPG-GmbH, 1991, pp. 533-536
- [23] POULSEN, T. and HAN, L.A. The binaural free field hearing threshold for pure tones from 125 Hz to 16 kHz. *Acustica — acta acustica*, **86**, 2000, pp. 333-337
- [24] ZWICKER, E. *Psychoakustik*. Hochschultext, Springer, Berlin 1982
- [25] TAKESHIMA, H., SUZUKI, Y., KUMAGAI, M., SONE, T., FUJIMORI, T. and MIURA, H. Threshold of hearing for pure tone under free-field listening conditions. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **15**, 1994, pp. 159-169