



Acoustic Design

φυσικές παράμετροι των ήχων #01

Nicolas REMY

nremy@uth.gr

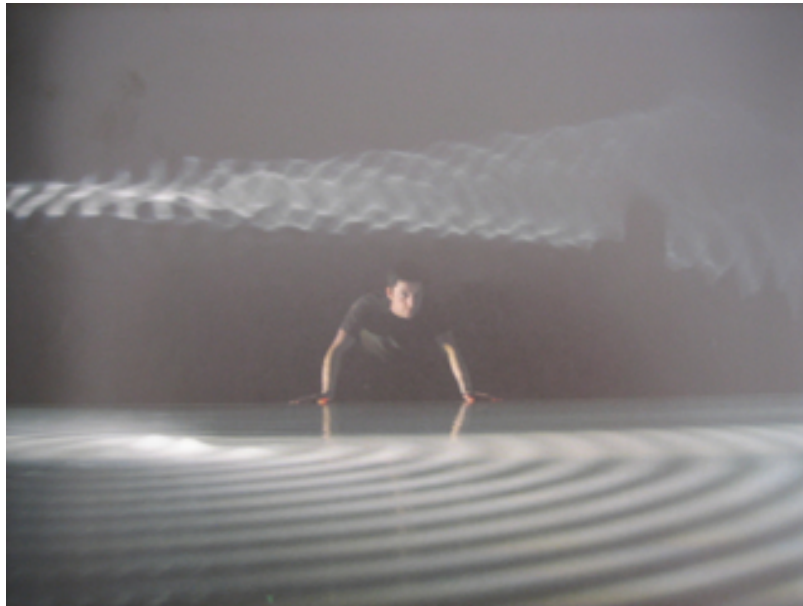




Definition - ορισμός

Sound : vibrations that travel through the air or another medium and can be heard when they reach a person's or animal's ear.

ο ήχος : **δονήσεις** που ταξιδεύουν μέσω του αέρα ή ενός άλλου **υλικού μέσου** και μπορούν να ακουστούν όταν φθάνουν σε ένα **αυτί** του ανθρώπου ή του ζώου.



Δεν υπάρχουν ήχοι χωρίς αυτά τα τρία στοιχεία:

- δονητικά φαινόμενα
- μέσο (υλικό) μετάδοσης
- ένα αυτί



Definition - ορισμός

Ερώτημα του Michelangelo ?

Ένα δέντρο πέφτει μέσα σε ένα δάσος. Εάν κανένας δεν είναι εκεί να το ακούσει, το δέντρο κάνει θόρυβο πέφτοντας;



Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου



Θυμάστε τι είναι γραμμένο πάνω στην αφίσα της ταινίας Alien;

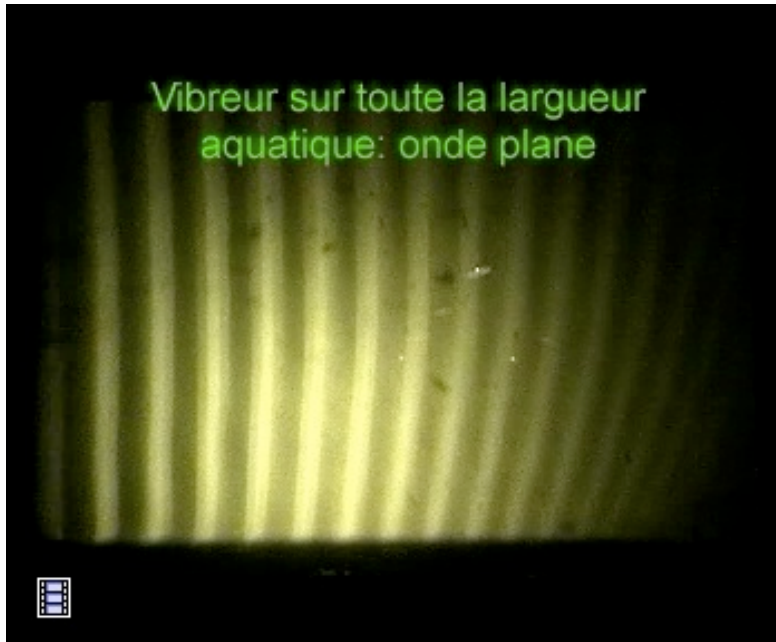


Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου

Η μετάδοση

οι ήχοι μπορούν να διαδοθούν μέσα στα ρευστά και στα αέρια αλλά επίσης μέσα στα στερεά.

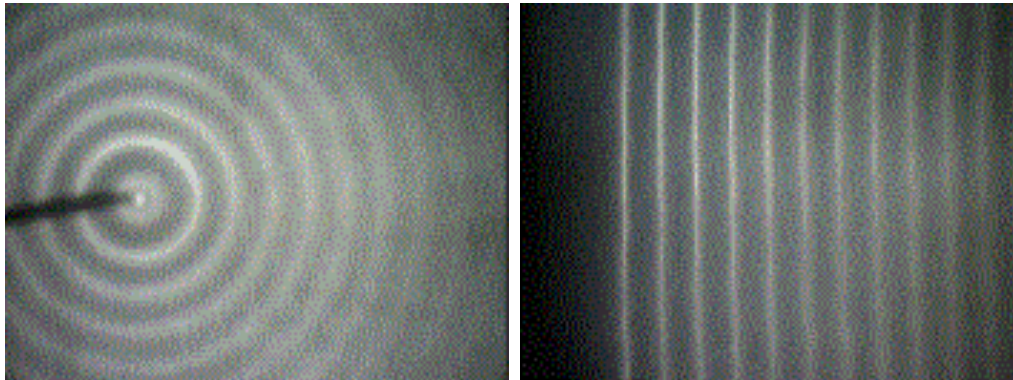
Είναι ακουστικοί κυματισμοί



Antonio Fischetti
Initiation à l'acoustique



Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου



Spherical waves

flat waves

Οι ακουστικοί κυματισμοί

Wavelength

Το μήκος κύματος

λ , m

Frequency

Η συχνότητα

f , Hz

Periode

Η περίοδος

T , s

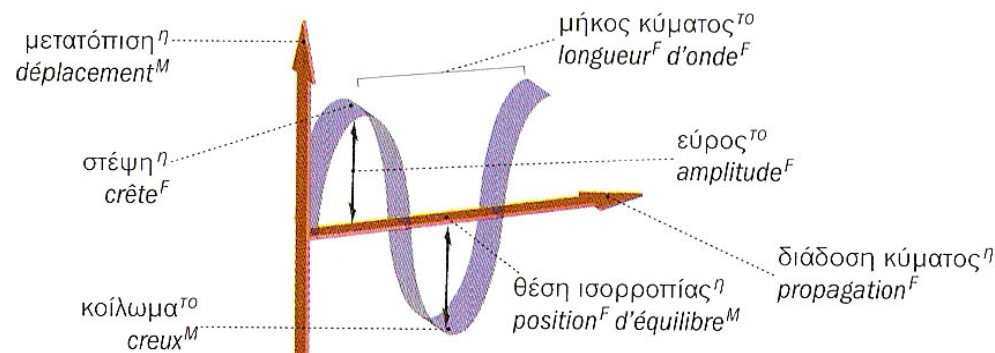
Speed of propagation

Η ταχύτητα της μετάδοσης

c , m/s

κύμα

onde



$$\lambda = c \times T$$

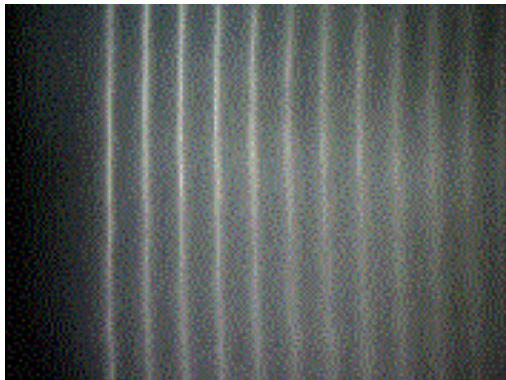
$$\lambda = c/f$$

$$f = 1/T$$





Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου



waves

What is the wavelength of a 50Hz and 8000 Hz sound ?

Ποιό είναι το μήκος κύματος ενός ήχου των 50Hz και των 10 000Hz ;

$$\lambda = c \cdot T$$

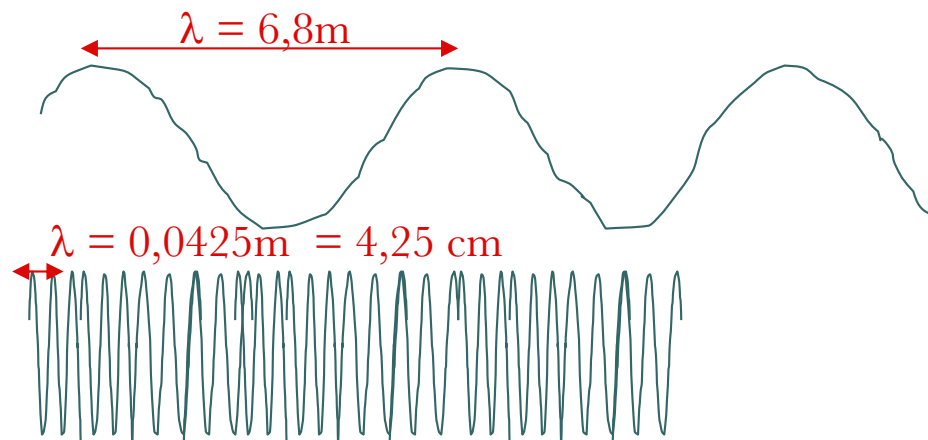
$$\lambda = c/f$$

$$f = 50\text{Hz},$$

$$\lambda = c/f = 340 / 50 = 6,8\text{m}$$

$$f = 8000 \text{ Hz}$$

$$\lambda = c / f = 340 / 8000 = 0,0425\text{m}$$

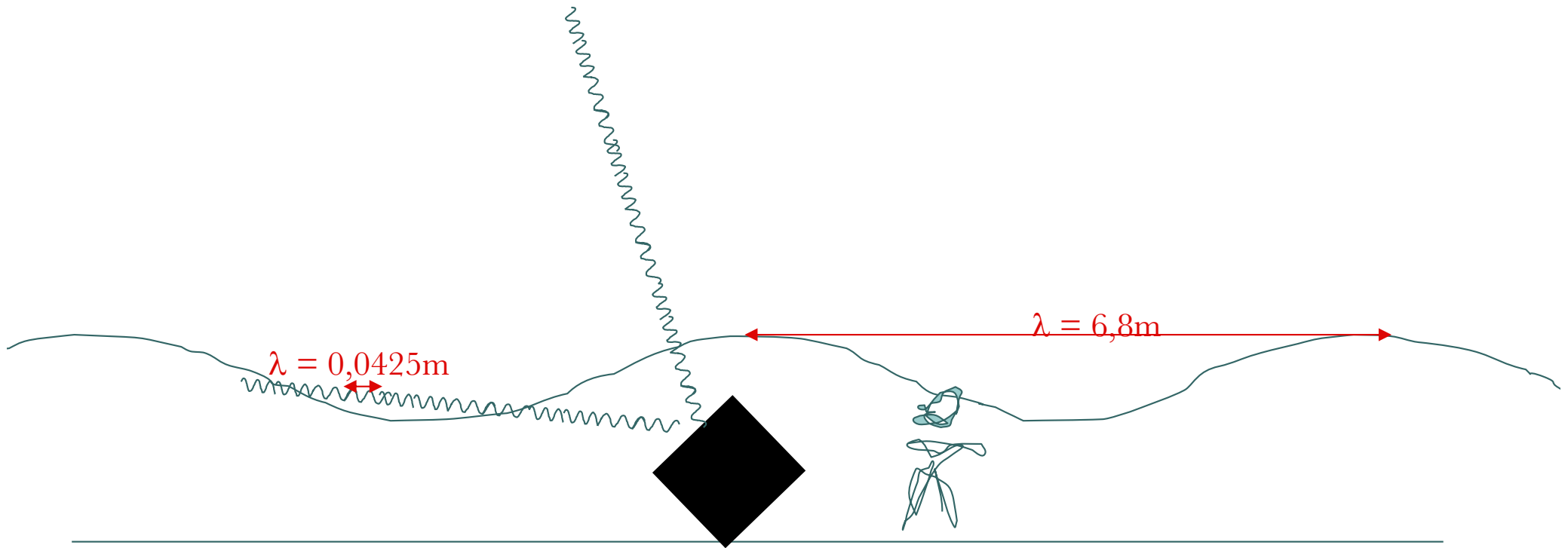


$$f = 50\text{Hz}$$

$$f = 10\ 000 \text{ Hz}$$



Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου





Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου

Speed of propagation
ταχύτητα μετάδοσης (m/s)

$$c = 331,5 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273,15}} \qquad c \approx 20 \sqrt{\Theta}$$

όπου

θ , η Θερμοκρασία σε ° C

Θ , η Θερμοκρασία σε K(Kelvin)

« Speed of sound » is also called celerity



Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου

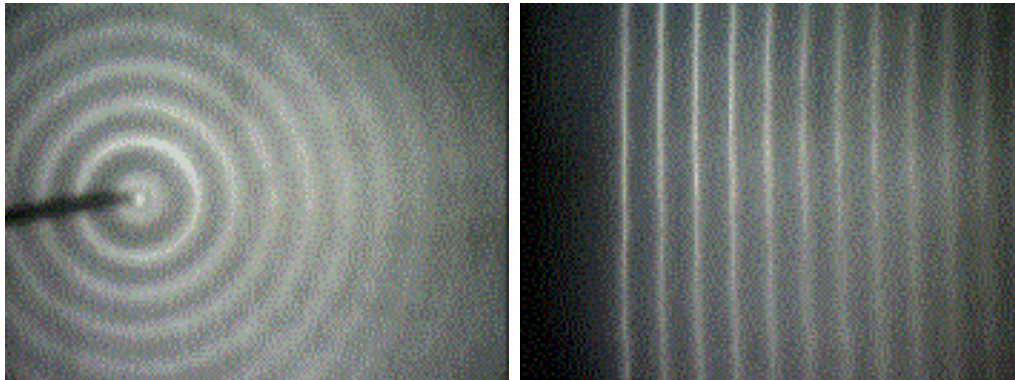
Speed of propagation
ταχύτητα μετάδοσης (m/s)

[Τα ρευστά]

ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ Kg/m ³	ΤΑΧΥΤΗΤΑ* m/s
Αέρας (20 ⁰ C)	1,21	344
Νερό (20 ⁰ C)	988	1481



Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου



Spherical waves

flat waves

Antonio Fischetti
Initiation à l'acoustique

Characteristics of sound milieu change
qualities of sounds.

Τα χαρακτηριστικά του μέσου της
μετάδοσης αλλάζουν τις ποιότητες των
ήχων



ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ Kg/m ³	ΤΑΧΥΤΗΤΑ* m/s
Αέρας (20 ⁰ C)	1,21	344
Νερό (20 ⁰ C)	988	1481
Αλουμίνιο	2700	5150
Χάλυβας	7800	5050
Μόλυβδος	11300	1250
Σκυρόδεμα (βαρύ)	2300	3400
Σοβάς	1200	2400
Ξύλο	400-900	1500-3000
Τούβλο (Πλήρες)	1800	3000
Γυαλί	2500	5100
Πυρίμαχο γυαλί	2300	5200
Πλεξιγκλάς	1150	1800
Γυψοσανίδα	760	1600
Αντεπικολλητική ξυλεία (κόντρα πλακέ)	600	3800
Μοριοσανίδα	690	2500
Συμπιεσμένο Hardboard	1000	2000
Πολυουρεθάνη	900	1330
Πολυστερίνη.	16 - 32	270-320
Πολυαιθυλένιο	930	460

*Μετάδοσης διαμήκων κυμάτων

Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου

Sound cannot travel through vacuum...

ο ήχος δεν μπορεί να διαδοθεί μέσα στο κενό.



Sonic spaceship explosion do not exist !

We use air or neutral gaz to improve insulation
Χρησιμοποιούμε το ουδέτερο αέριο ή το αέρα για
να βελτιώσουμε τη μόνωση





Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου



Όποτε υπάρχει καταιγίδα, η αστραπή και η βροντή είναι δύο ταυτόχρονα φαινόμενα.

Αυτά τα δύο φαινόμενα γίνονται αντιληπτά χωριστά σε μία κάποια απόσταση

Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου



Η ταχύτητα του ήχου μέσα στον αέρα είναι 340 m/s. Θέλει επομένως 30ms ο ήχος για να διατρέξει ένα ολόκληρο στάδιο. Αυτό θέτει πρόβλήματα στις εγκαταστάσεις των ηχητικών μηχανημάτων των εμφανίσεων (delay)

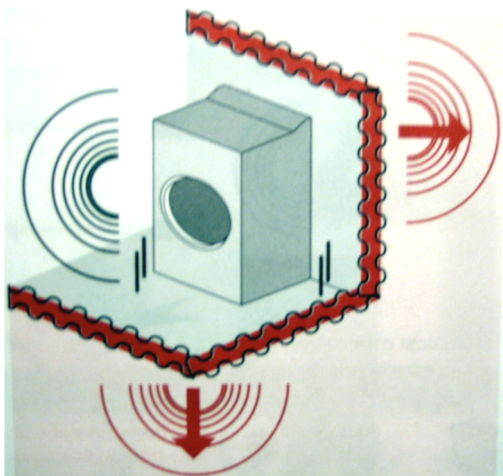


ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ Kg/m ³	ΤΑΧΥΤΗΤΑ* m/s
Αέρας (20 ⁰ C)	1,21	344
Νερό (20 ⁰ C)	988	1481
Αλουμίνιο	2700	5150
Χάλυβας	7800	5050
Μόλυβδος	11300	1250
Σκυρόδεμα (βαρύ)	2300	3400
Σοβάς	1200	2400
Ξύλο	400-900	1500-3000
Τούβλο (Πλήρες)	1800	3000
Γυαλί	2500	5100
Πυρίμαχο γυαλί	2300	5200
Πλεξιγκλάς	1150	1800
Γυψοσανίδα	760	1600
Αντεπικολλητική ξυλεία (κόντρα πλακέ)	600	3800
Μοριοσανίδα	690	2500
Συμπιεσμένο Hardboard	1000	2000
Πολυουρεθάνη	900	1330
Πολυστερίνη.	16 - 32	270-320
Πολυαιθυλένιο	930	460

*Μετάδοσης διαμήκων κυμάτων

Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου

οι ήχοι μπορούν να διαδοθούν μέσα τα στερεά.



Το δυνατό κλείσιμο μίας πόρτας εκπέμπει δύο θορύβους: ένα θόρυβο μέσα στον αέρα και ένα θόρυβο που διαδίδεται μέσα στον φέροντα οργανισμό του κτηρίου.

Physical parameters of sound φυσικές παράμετροι του ήχου

οι ήχοι μπορούν να διαδοθούν μέσα τα στερεά...

Laurie Anderson 1997



Είμαστε οι μόνοι που ακούμε την φωνή μας όπως την ακούμε. Οι άλλοι που μας ακούνε, δεν ακούνε τους ήχους που περνούν από τα οστά του κρανίου μας μέχρι το εσωτερικό αυτί.

Physiology of the ear

Φυσιολογία του αυτιού

δομή του αυτιού^η
structure^F de l'oreille^F



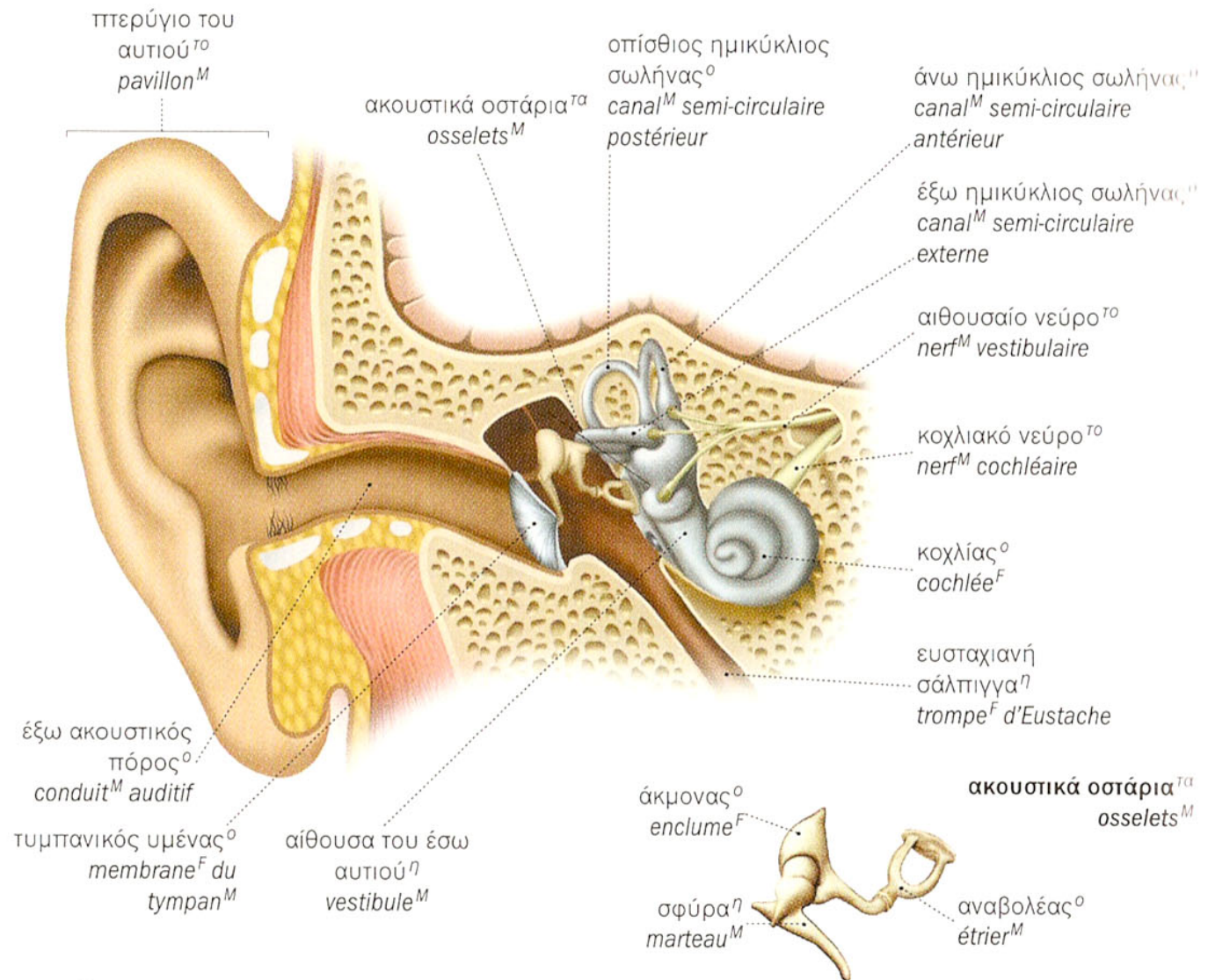
έξω αυτί^{το}
oreille^F externe



μέσο αυτί^{το}
oreille^F moyenne



έσω αυτί^{το}
oreille^F interne





3 parameters of sound

3 φυσικές παράμετροι του ήχου

The ear is sensitive to 3 different parameters of sound :

Το αυτί είναι ευαίσθητο σε 3 διαφορετικές παραμέτρους του ήχου

- Sound level

Η ηχητική πίεση

- Frequencies

Οι συχνότητες

- Timbre

Η χροιά



Sound level pressure

Η ηχητική πίεση

The ear is sensitive to variations of acoustic pressure (Pa or Pascals). It is very sensitive since the report/ratio of the acoustic pressure between the "first audible sound" and a painful sound is 1 million (10^6).

Το αυτί είναι ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της ηχητικής πίεσης (Pa ή PASCALS).

Το αυτί μπορεί να ακούσει μια πολύ μικρή ηχητική πίεση περίπου 20mP. Είναι το όριο της ακουστικότητας (auditory threshold $P_0 = 20\text{mPa}$ ou $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)

Το αυτί μπορεί επίσης να ακούσει ήχους ιδινατούς μέχρι 20 Pa. Είναι το όριο του πόνου(threshold of pain $P = 20\text{Pa}$)



Sound level pressure

Η ηχητική πίεση

Source of sound	RMS sound pressure Pa
Theoretical limit for undistorted sound at 1 atmosphere environmental pressure	101,325
1883 Krakatoa eruption	
Stun grenades	
rocket launch equipment acoustic tests	
threshold of pain	100
hearing damage during short-term effect	20
jet engine, 100 m distant	6–200
jackhammer, 1 m distant / discotheque	2
hearing damage from long-term exposure	0.6
traffic noise on major road, 10 m distant	0.2–0.6
moving automobile, 10 m distant	0.02–0.2
TV set – typical home level, 1 m distant	0.02
normal talking, 1 m distant	0.002–0.02
very calm room	0.0002–0.0006
quiet rustling leaves, calm human breathing	0.00006
auditory threshold at 2 kHz – undamaged human ears	0.00002



1 εκατομμύριο
πιθανών τιμών



Sound level pressure

Η ηχητική πίεση

As the human ear can detect sounds with a very wide range of amplitudes, sound pressure is often measured as a level on a logarithmic **decibel** scale.

The sound pressure level (SPL) or L_p is defined as

Για να μειωθεί η πιθανή ποσότητα τιμών, η ηχητική πίεση μετρείται σε μια λογαριθμική κλίμακα (decibel).

Η ηχητική πίεση (SPL) ή L_p είναι:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{\text{ref}}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right) \text{ dB}$$

where p is the **root-mean-square** sound pressure and p_{ref} is a reference sound pressure. Commonly used reference sound pressures, defined in the standard **ANSI S1.1-1994**, are **20 μPa** in air and **1 μPa** in water. Without a specified reference sound pressure, a value expressed in decibels cannot represent a sound pressure level.



Sound level pressure

Η ηχητική πίεση

Source of sound	RMS sound pressure	sound pressure level
	Pa	dB re 20 μ Pa
Theoretical limit for undistorted sound at 1 atmosphere environmental pressure	101,325	191
1883 Krakatoa eruption		approx 180 at 100 miles
Stun grenades		170-180
rocket launch equipment acoustic tests		approx. 165
threshold of pain	100	134
hearing damage during short-term effect	20	approx. 120
jet engine, 100 m distant	6–200	110–140
jackhammer, 1 m distant / discotheque	2	approx. 100
hearing damage from long-term exposure	0.6	approx. 85
traffic noise on major road, 10 m distant	0.2–0.6	80–90
moving automobile, 10 m distant	0.02–0.2	60–80
TV set – typical home level, 1 m distant	0.02	approx. 60
normal talking, 1 m distant	0.002–0.02	40–60
very calm room	0.0002–0.0006	20–30
quiet rustling leaves, calm human breathing	0.00006	10
auditory threshold at 2 kHz – undamaged human ears	0.00002	0



Sound level pressure

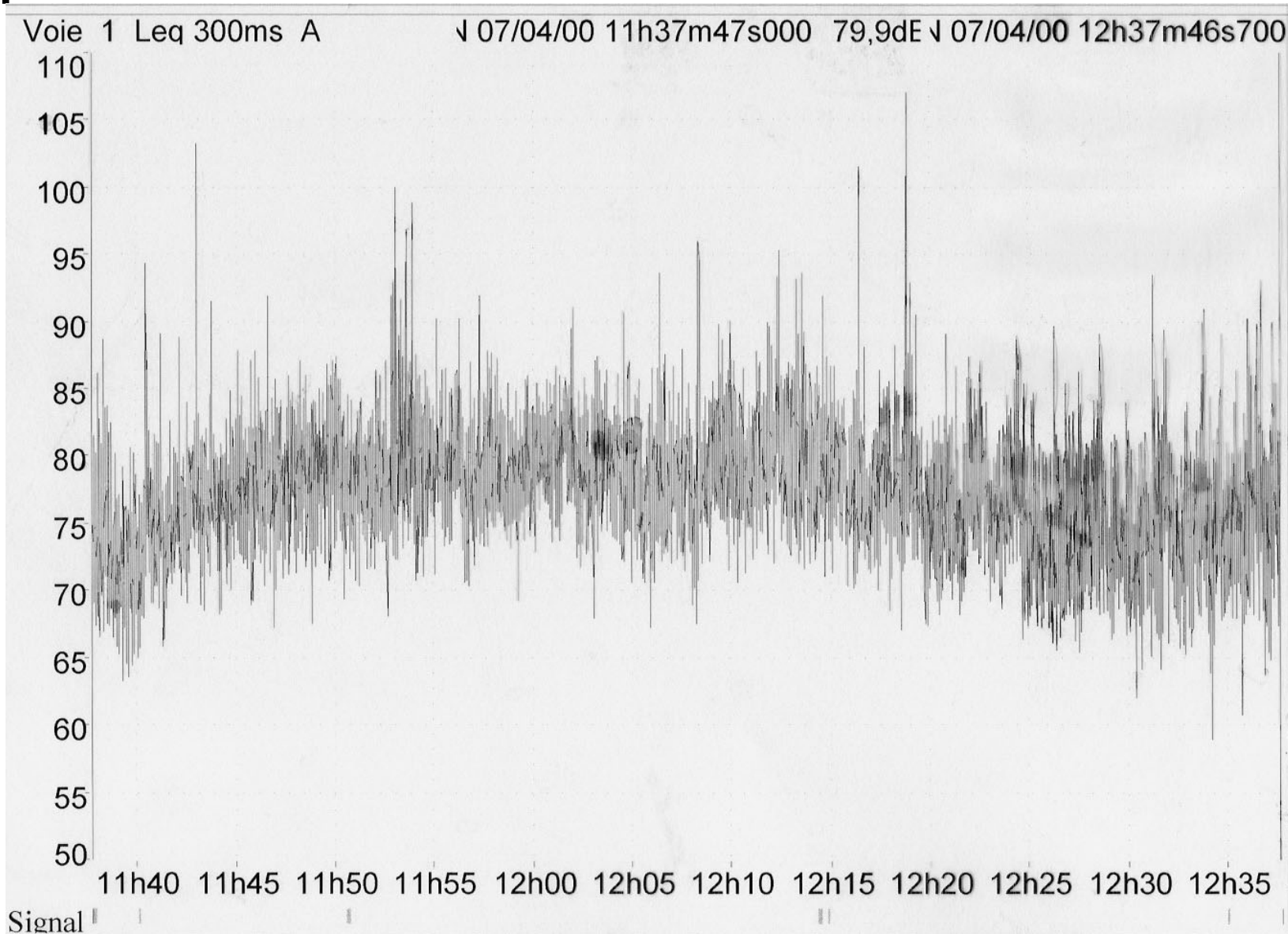
Η ηχητική πίεση





Sound level pressure

Η ηχητική πίεση

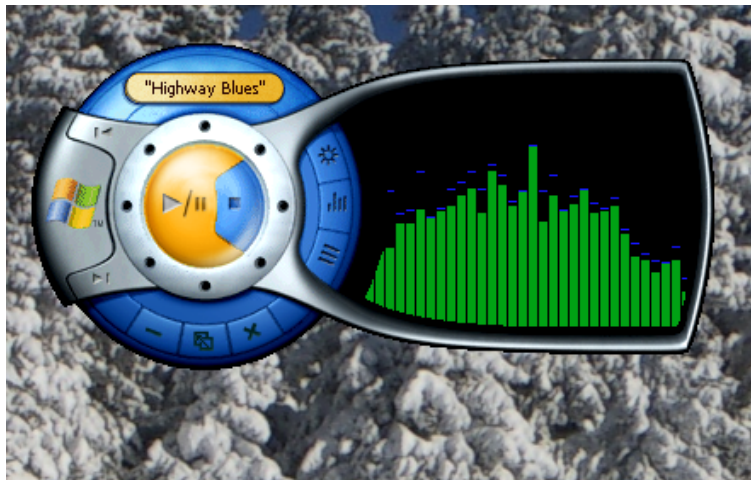


Frequencies

Συχνότητες

For humans, hearing is limited to frequencies between about 20 Hz and 20,000 Hz (20 kHz), with the upper limit generally decreasing with age.

Το αυτί είναι ευαίσθητο σε ένα μεγάλο σύνολο συχνοτήτων
Μπορεί να ακούσει πολύ χαμηλές συχνότητες (μπάσους ήχους) (20Hz) και πολύ υψηλές συχνότητες (οξείς ήχους)(20 000 Hz).



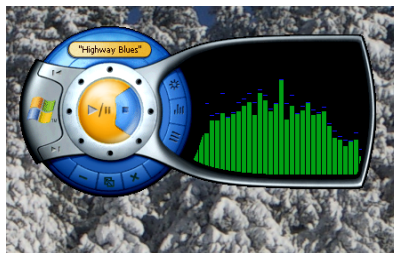
φασματική ανάλυση του ήχου



Frequencies Συχνότητες

This great field of sensitivity is divided into packages of frequencies which are ordered in a regular way for the ear. They are, for example, the octaves. When one passes from an octave to another, one has the auditive feeling that the frequencies of sound has been doubled.

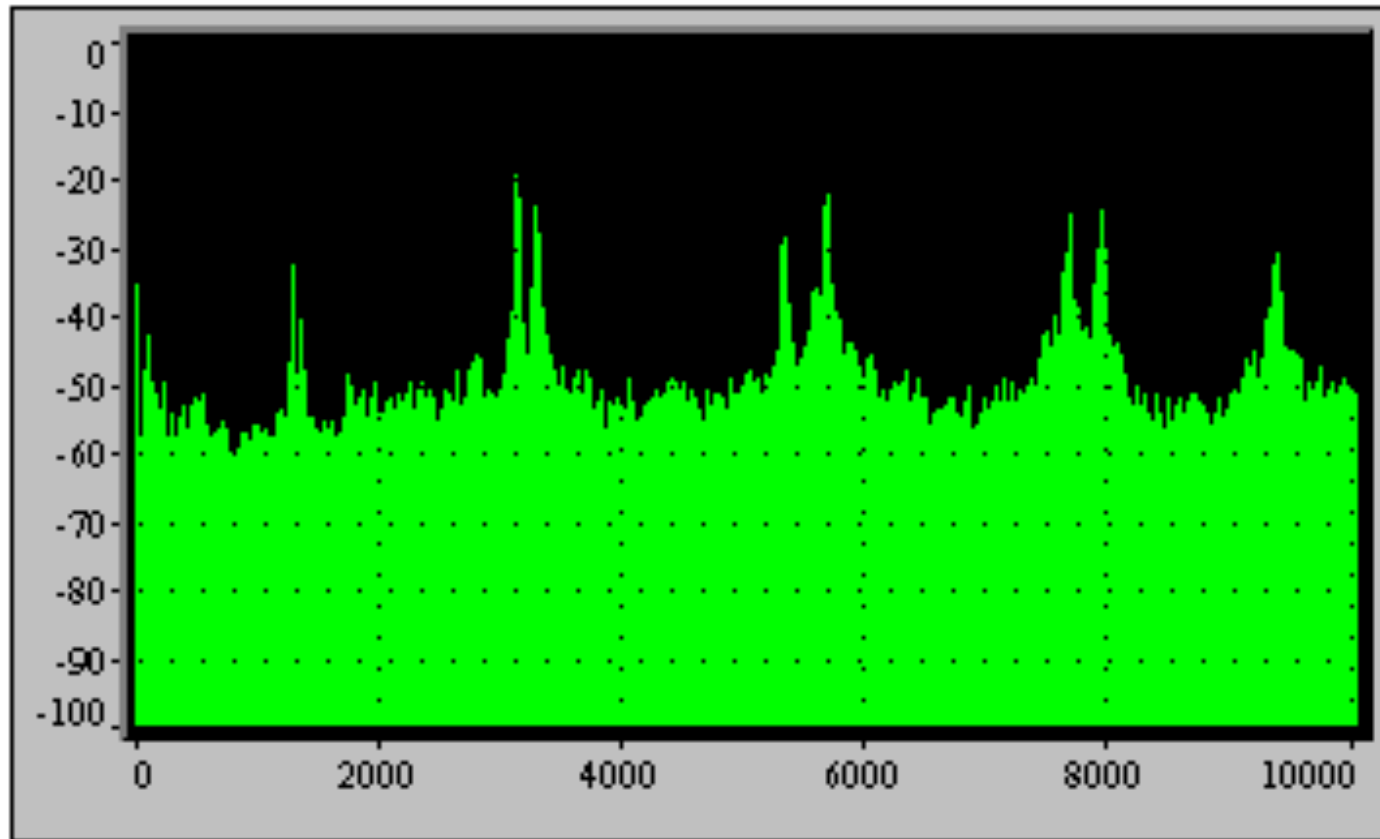
Αυτό το μεγάλο πεδίο ευαισθησίας διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων που διατάσσονται με έναν κανονικό τρόπο για το αυτί. Είναι, για παράδειγμα, οι ζώνες οκτάβας ή οι ζώνες ενός τρίτου οκτάβας.





Frequencies

Συχνότητες



Hz

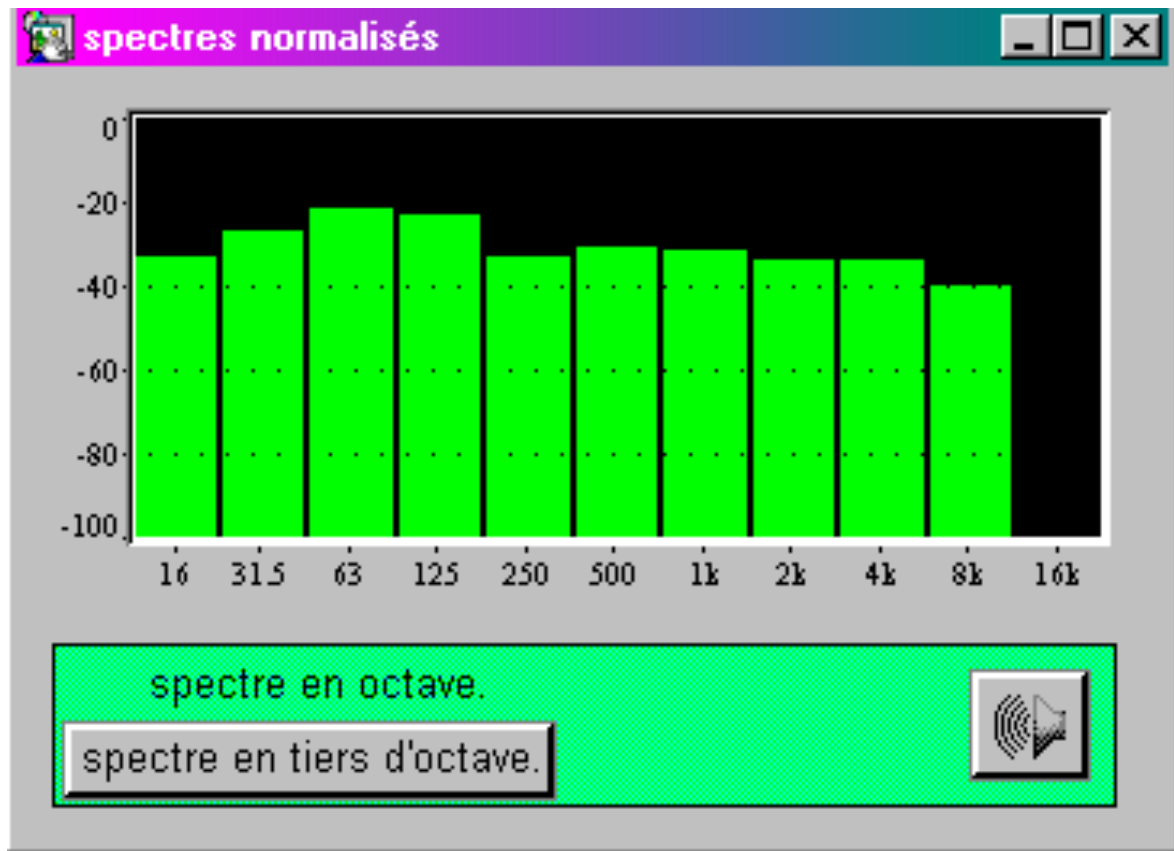
Téléphone

dans bruit de fond



Frequencies

Συχνότητες





Frequencies Συχνότητες

Παραδείγματα

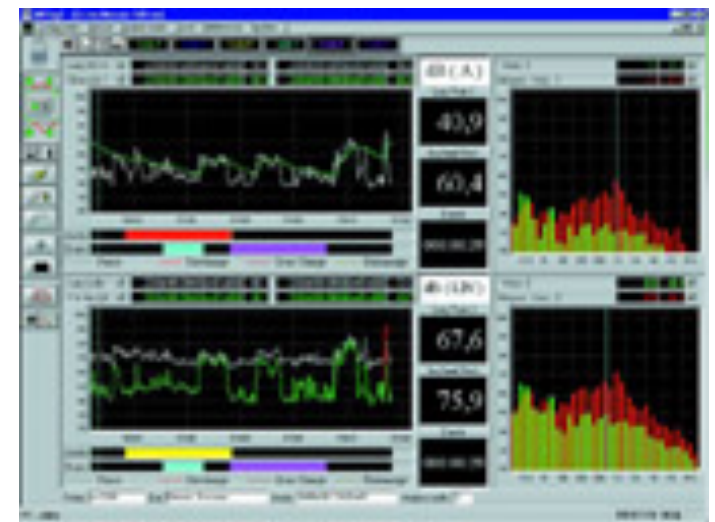
- electric generator 100-120hz
- LA from the phone 440 Hz
- human voice 300-4000 Hz
- Clavecin (το κλαβεσέν) 63-18 000 Hz





Frequencies

Συχνότητες



Ταξινόμηση των ήχων

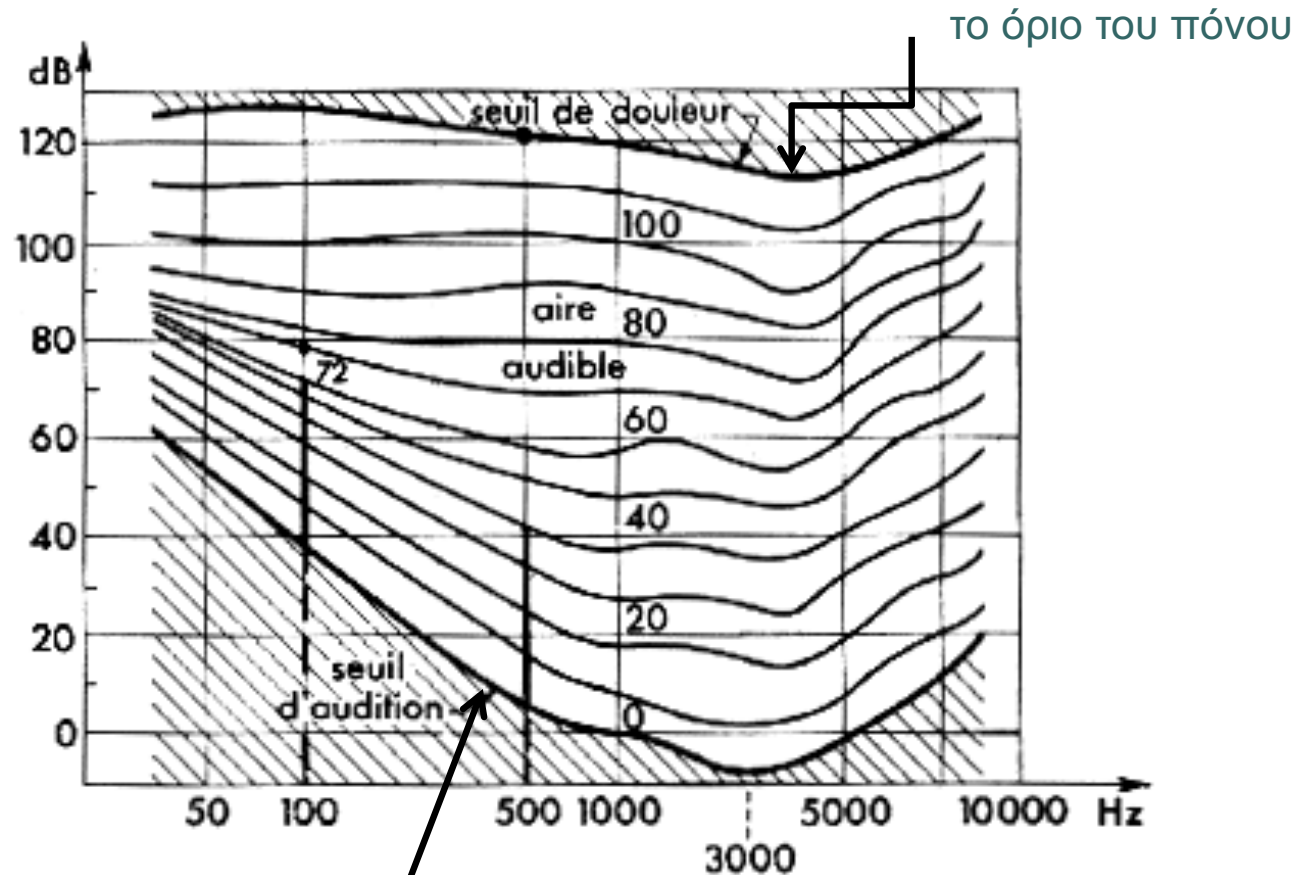
- bass sounds - μπάσους ήχους - χαμηλές συχνότητες
- medium sounds - μεσαιες συχνότητες
- trebble sound - οξείς ήχους - υψηλες συχνότητες

20-353 Hz
353-1414 Hz
1414-16000Hz



Fletcher et Munson, 1933

Οι καμπύλες τους Fletcher και Munson



το όριο της ακουσικότητας



dB(A)

A noise level expressed in decibel (dB) is not really representative of the human feeling because the ear is not very sensitive to the very low or very high frequencies (physiological reason).

Η ηχητική πίεση που εκφράζεται σε decibel (dB) δεν είναι πραγματικά αντιπροσωπευτική του ανθρώπινου αισθήματος επειδή το αυτί δεν είναι πολύ ευαίσθητο στις πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές συχνότητες (Fletcher and Munson)



dB(A)

The noise level must thus be weighted by a coefficient depend on the frequency of the emitted sound, in order to "penalize" the low registers and the treble ones compared to the mediums.

Πρέπει τότε να εφαρμόζεται ένα φίλτρο στις τιμές ντεσιμπέλ που αντιπροσωπεύει το φυσικό φίλτρο του αυτιού.

Είναι οι καμπύλες συντελεστών βαρύτητας στάθμης ηχητικής πίεσης dB(A)

dB(A)

<i>Octave (Hz)</i>	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
<i>Pondération A (dB)</i>	-15,5	-8,5	-3	0	+1	+1	-1



Sound scale in dB(A)

Ηχητική κλίμακα

Activities	dB(A)	Effects
Plane Takeoff	120	Shock, short-term deafness
Noise level limits for work	85	8H exposition*
From 30m to highway (4000 veh/h)	80	Vegetative disorders, disturb nervous
Busy street	70	Difficult comprehension of a conversation
Low traffic in town, noise inside room, vaccum cleaner	60	Disorders of the drowsiness, insomnia
Residential area, calm restaurant or office	50	
Class room, very calm apartment,	35	Zone of the sleep ; Time of recovery for the ear
Very calm apartment, rural area far away from noisy sources and without wind.	30	
Very insulated room	20	Oppression feelings
Absolute calm, level never found in « real situation « ...	10	Deaf room

* Exposition time divided by 2 si +3dB(A)

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.6

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΘΥΜΗΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ¹⁵

ΧΡΗΣΗ ΧΩΡΟΥ	L _A - dB(A)	NR- dB	NC- dB	RC- dB	ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΑΙΣΘΗΣΗ
Αίθουσα συναυλιών, μελοδράματος, στούντιο ηχογράφησης ή εκπομπής ομιλίας, μεγάλες συνεδριακές αίθουσες, μεγάλα θέατρα, υπνοδωμάτια σε ήσυχη περιοχή	20-30	10-20	10-20	15-20	Πολύ ήσυχος χώρος
Στούντιο τηλεόρασης, στούντιο ηχογράφησης, μικρά συνεδριακά αίθουσες διδασκαλίας βιβλιοθήκες, δωμάτια σε ξενοδοχεία, κατοικίες, νοσοκομειακοί θάλαμοι, διευθυντικά γραφεία	30-35	25	25	25-30	
Καθιστικά, αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, μικρές αίθουσες συσκέψεων, διδασκαλίας, βιβλιοθήκες, γραφεία, νοσοκομειακοί θάλαμοι	35-40	30	30	30	Ήσυχος χώρος
Εργαστήρια (ανάλογα με τις εργασίες), εστιατόρια, μπαρ ξενοδοχείων	40-45	35	35	35	
Εργαστήρια (ανάλογα με τις εργασίες), Χώροι υποδοχής, κτίρια αεροδρομίων, καταστήματα	45-50	40	40	40	Μέτρια θορυβώδης
Καφενεία, εστιατόρια, γραφεία σε ανοικτό χώρο	50-55	40	35-45	35-40	
Κουζίνες, σουπερμάρκετ, πλυντήρια	55-65	50-55	50-55	50	Θορυβώδης

¹⁵ AS2107-1977 Office Buildings. CIBSE Guide. Beranek(1971). ASHRAE Handbook:1991. Ελληνικός Κτιριοδομικός Κανονισμός αρθρο.12

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.7

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ

P(Pa)	L _A dB(A)	ε	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΗΓΩΝ
200	140	5	Κινητήρας jet σε απόσταση 20m
112	135	5	
63,2	130	5	
35,6	125	5	Όριο πόνου
20,0	120	4	Συναυλίες rock κοντά στα ηχεία, Δοκιμή κινητήρα jet σε απόσταση 25m
11,2	115	4	Κέντρο διασκέδασης κοντά στα ηχεία
6,32	110	4	Χώρος εφεδρικού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους χωρίς ειδικά μέτρα
3,56	105	4	Ντίσκο
2,00	100	3	Αερόσφυρα σε απόσταση 1m
1,12	95	3	Τρομπέτα σε χώρο δοκιμών
0,63	90	3	Θορυβώδες εργοστάσιο
0,36	85	3	Βαριά οδική κυκλοφορία σε απόσταση περίπου 10 μέτρων
0,200	80	2	Μηχανοστάσια, Δυνατή ομιλία σε απόσταση ενός μέτρου Χώροι συγκέντρωσης κοινού
0,112	75	2	Σύνηθες εστιατόριο
0,063	70	2	Θορυβώδες γραφείο
0,036	65	2	Κανονική ομιλία σε απόσταση ενός μέτρου

0,020	60	1	Ήσυχο γραφείο
0,0112	55	1	Κανονική ομιλία σε απόσταση ενός μέτρου
0,0063	50	1	Ήσυχο εστιατόριο
0,0036	45	1	Οικιστική περιοχή (τη νύχτα)
0,0020	40	1	Ήσυχη βιβλιοθήκη,
0,0011	35	0	Όριο εσωτερικού κατοικίας από θόρυβο οδικής κυκλοφορίας
0,00063	30	0	Ήσυχο υπνοδωμάτιο στην εξοχή
0,00036	25	0	Κανονική αναπνοή σε απόσταση ενός μέτρου
0,00020	20	0	Studio ηχογράφησης
0,00011	15	0	
0,00006	10	0	Ανηχοϊκός θάλαμος μετρήσεων
0,00004	5	0	
0,00002	0	0	Όριο ακοής



Addition - Πρόσθεση - L_p





Addition - Πρόσθεση - L_p

$$Lp_{total} = 10 \times \log\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{Lp_i}{10}}\right)$$

Παράδειγμα

30dB(A) \oplus 60dB(A) \oplus 70dB(A) \oplus 70dB(A)

$$Lp_{total} = 10 \times \log\left(10^{\frac{30}{10}} + 10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{70}{10}} + 10^{\frac{70}{10}}\right)$$

$$Lp_{total} = 10 \times \log(10^3 + 10^6 + 10^7 + 10^7)$$

$$Lp_{total} = 73,2dB(A)$$



Addition - Πρόσθεση - Lp

γραφική μέθοδος

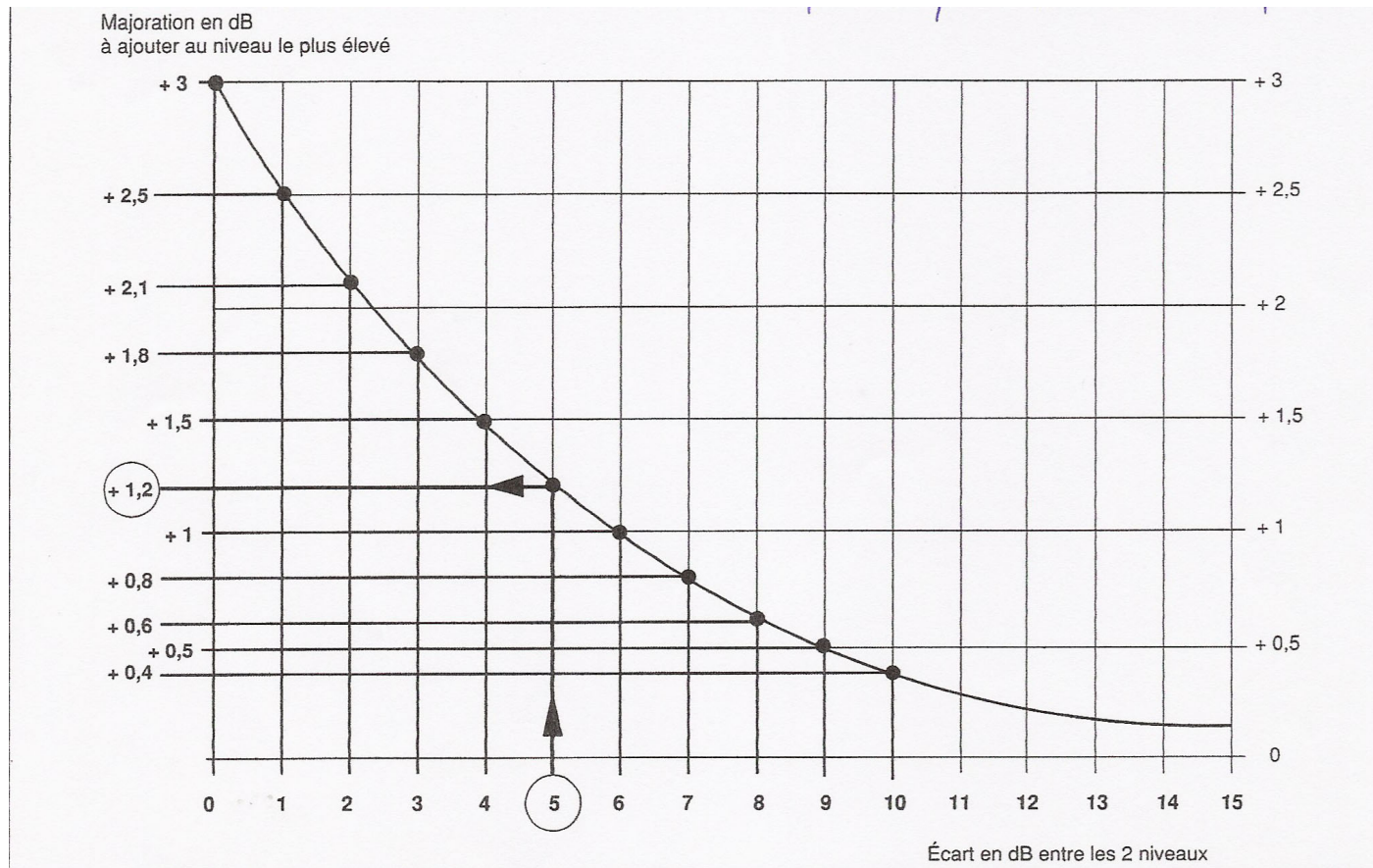


Fig. A.2 - « Addition » de deux niveaux sonores.



Addition de niveaux sonores

Πρόσθεση ηχητικών επιπέδων

γραφική μέθοδος

$$30\text{dB(A)} \oplus 60\text{dB(A)} \oplus 70\text{dB(A)} \oplus 70\text{dB(A)}$$

$$\Delta\text{dB(A)} = 30$$
$$\Rightarrow +0$$

\oplus

$$\Delta\text{dB(A)} = 0$$
$$\Rightarrow +3$$

$$60 \text{ dB(A)}$$

\oplus

$$73 \text{ dB(A)}$$

$$\Delta\text{dB(A)} = 13$$
$$\Rightarrow +0,2$$

$$73,2 \text{ dB(A)}$$

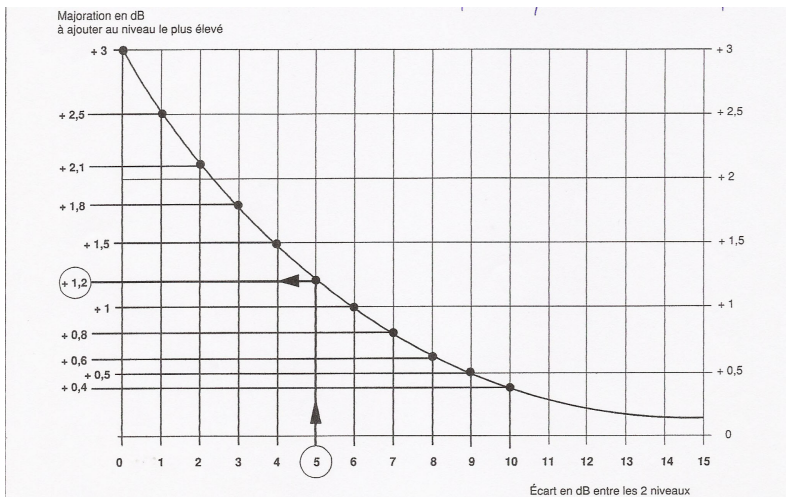



Fig. A.2 - « Addition » de deux niveaux sonores.



Τίμβρο η Χροιά



-  χροιά η [χριά] Q24 : 1α. απόχρωση: Η ~ της επιδερμίδας / του προσώπου του είναι υποκίτρινη.
β. το γνώρισμα ενός ήχου που μας επιτρέπει να τον διακρίνουμε από έναν άλλο που έχει την ίδια οξύτητα και ένταση. 2. (μτφ.) για έννοια που διατυπώνεται μάλλον υπαινικτικά παρά άμεσα: Έδωσε στο λόγο του πολιτική ~. Τα λόγια του είχαν μια ~ απειλής / ειρωνείας.

[λόγ.: 1α: αρχ. χροιά· 1β, 2: σημδ. γαλλ. ton]



Να θυμάστε

- 1 (ένα) dBA) είναι η πιό μικρή μονάδα αντιληπτή από το αυτί ... στη θεωρία, στο εργαστήριο.
- συνήθως, αισθανόμαστε μια αλλαγή της ηχητικής πίεσης εάν είναι ίση με 3dB (A)
- $60 \text{ dB(A)} \oplus 60 \text{ dB(A)} = 63 \text{ dB(A)}$
- Για να έχουμε την αίσθηση ότι η ηχητική πίεση έχει διαιρεθεί στα 2, πρέπει να την μειώσουμε κατά 10 dB(A)