



# Ακουστική των αιθουσών#01

*Nicolas REMY*

ΕΑΡΙΝΟΥ ΕΞΑΜΗΝΟΥ 2009-10

[nicola.remy@gmail.com](mailto:nicola.remy@gmail.com)

 ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Ακουστική των αιθουσών

Η ακουστική των αιθουσών έχει σκοπό να προσφέρει την καλύτερη πιθανή ποιότητα ακοής σε διάφορες αίθουσες θεαμάτων: αίθουσες συναυλιών, θέατρα, όπερα κτλ., αλλά και άλλους δημόσιους χώρους όπως χώροι υποδοχής, κλειστά γυμναστήρια, πισίνες, εστιατόρια, μπαρ...



la salle des Princes, Monaco - Système Carmen



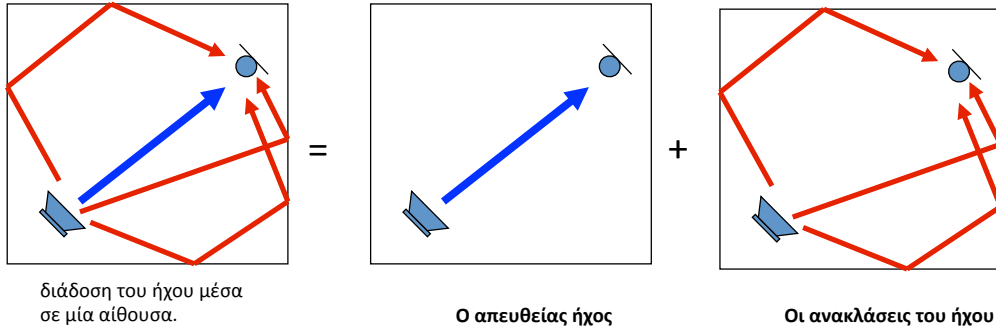
Hall de la Gare du Nord, SNCF- AREP - image N. Rémy



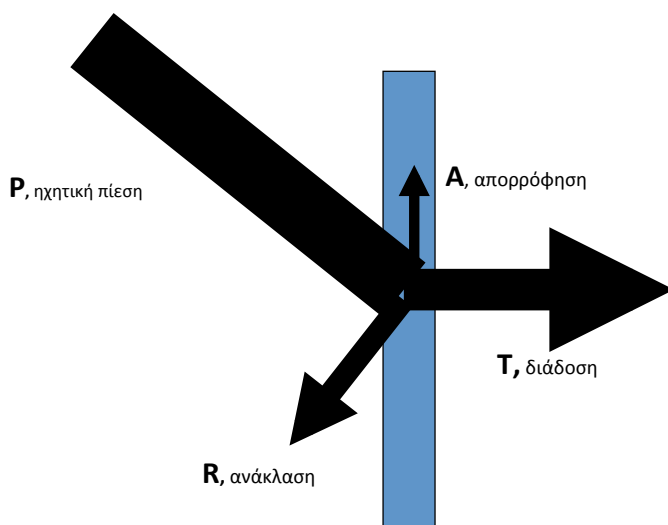
Gymnase à Grenoble, Nicolas Michelin  
[www.cyberarchi.com](http://www.cyberarchi.com)

## 1- Εισαγωγή - θεωρία

Ένας ακροατής, που βρίσκεται στον χώρο αυτό, δέχεται διαδοχικά το απευθείας ηχητικό κύμα, καθώς και εκείνα που έρχονται από τις διάφορες ανακλάσεις.



## 2- Γενική περίπτωση



$$P = A + T + R$$

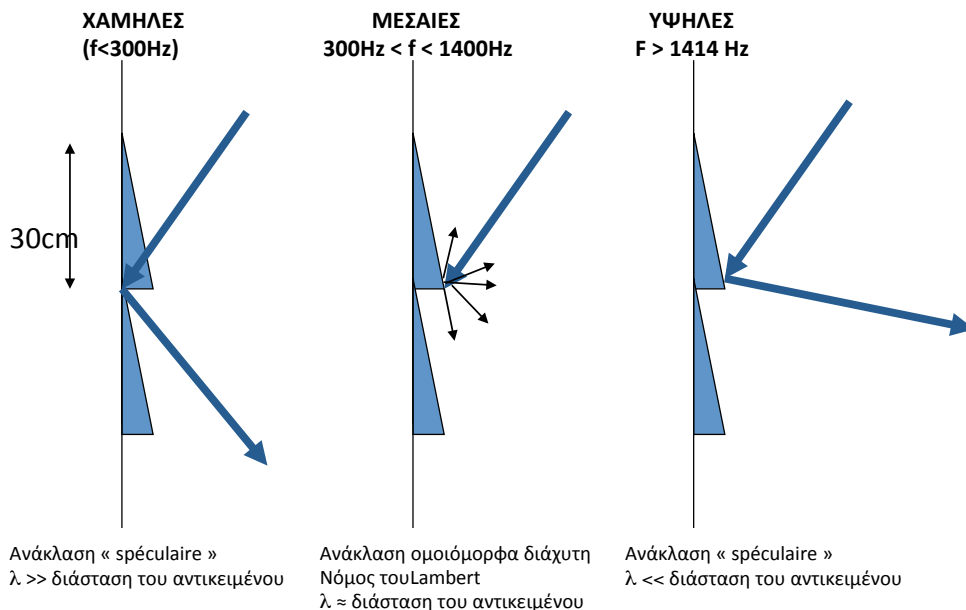
$$\frac{P}{P} = \frac{A}{P} + \frac{T}{P} + \frac{R}{P}$$

$$1 = \alpha + \tau + \rho$$

Με :  
 . α, ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης  
 η **alpha Sabine**  
 . τ, ο συντελεστής της διάδοσης  
 . ρ, ο συντελεστής της ανάκλασης

Αυτή η εξίσωση ισχύει πάντα, αλλά κυμαίνεται σε σχέση με το μήκος κύματος (συχνότητες).

## 2.1- Η ανάκλαση του ήχου



## 2.2- Η απορρόφηση του ήχου

Ο  $\alpha$  Sabine (ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης)

- Η ικανότητα του υλικού να απορροφά τον ήχο χαρακτηρίζεται από το συντελεστή ηχοαπορρόφησης  $\alpha$  του υλικού που ορίζεται ως ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που απορροφάται προς αυτή που προσπίπτει.
- Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης  $\alpha$  ενός υλικού εξαρτάται κύρια από τη δομή του.
- Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 1 ( περίπτωση τέλει απορρόφησης) και 0 ( περίπτωση τέλει ανάκλασης)
- Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης είναι συνάρτηση της συχνότητας
- Στην πράξη οι τιμές του  $\alpha$  δίνονται για τις διάφορες οκτάβες

Οκτάβα			Τρίτο Οκτάβας		
κατώτερο όριο ζώνης	κεντρική συχνότητα	ανώτερο όριο ζώνης	κατώτερο όριο ζώνης	κεντρική συχνότητα	ανώτερο όριο ζώνης
11	16	22	14.1	16	17.8
			17.8	20	22.4
			22.4	25	28.2
22	31.5	44	28.2	31.5	35.5
			35.5	40	44.7
			44.7	50	56.2
44	63	88	56.2	63	70.8
			70.8	80	89.1
			89.1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	710	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
710	1000	1420	891	1000	1122
			1122	1250	1413
			1413	1600	1778
1420	2000	2840	1778	2000	2239
			2239	2500	2818
			2818	3150	3548
2840	4000	5680	3548	4000	4467
			4467	5000	5623
			5623	6300	7079
5680	8000	11630	7079	8000	8913
			8913	10000	11220
			11220	12500	14130
11630	16000	22720	14130	16000	17780

ΠΙΝΑΚΑΣ III. Όρια και κεντρικές συχνότητες οκταβικών και τριτοκταβικών ζωνών

	συχνότητα (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ασοβάτιστος τοίχος, άβαφος	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Βαμμένος τοίχος, καλυμμένος	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Επιφάνειες μπετόν αδρές	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Λείος σοβάς σε τοίχο	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Ασβεστοκονίαμα πεταχτό 15 mm	0,08	0,15	0,31	0,50	0,61	0,71
Επένδυση ραμποτέ 16 mm με 40 mm διάκενο	0,18	0,12	0,16	0,09	0,08	0,07
Νονοραπ 10 mm με αδρή επιφάνεια και διάκενο 50 mm	0,13	0,24	0,14	0,14	0,16	0,20
Νονοραπ 8 mm, διάκενο 20 mm γεμισμένο με ηχοαπορροφητικό	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	
Μοκέτα 5 mm πάνω σε δάπεδο	0,04	0,04	0,15	0,3	0,5	0,6
Χαλί με μακρύ πέλμα σε δάπεδο	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,4
Ξύλινη πόρτα πλακάς	0,14		0,06		0,05	
Άτομα καθιστά		0,23	0,56	0,78	0,88	0,89
Καρέκλα ξύλινη	0,01		0,02		0,02	
Πολυθρόνα βαθιά με ύφασμα	0,28	0,28	0,28	0,28	0,34	0,34
Συνήθης κουρτίνα κλειστή	0,05		0,23		0,30	
Πάπλωμα ορυκτόμαλλου 40 mm	0,19	0,34	0,55	0,74	0,88	0,97
Πλάκες ορυκτόμαλλου και διάκενο 8 mm	0,12	0,25	0,83	0,87	0,64	0,52
Φύλλο αλουμινίου 0,5 mm με διάτρηση 12,5%, με διάκενο 45 mm και απορροφητικό	0,77	0,56	0,50	0,48	0,49	0,40
Αφρώδες 50 mm πάνω σε τοίχο	0,12	0,20	0,45	0,65	0,70	0,75

ΠΙΝΑΚΑΣ IV. Συντελεστές ηχοαπορρόφησης διαφόρων υλικών και διατάξεων



## 2.2- Η απορρόφηση του ήχου

Ηχοαπορρόφηση είναι η μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας (συνήθως σε θερμότητα) όταν ο ήχος διέρχεται μέσα από ένα υλικό.

Τα ηχοαπορροφητικά υλικά και διατάξεις διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες

A- Συνηχητές μεμβράνες

B- Συνηχητές κοιλότητες

Γ- Πορώδη ηχοαπορροφητικά

## 2.2- Η απορρόφηση του ήχου

### A- Συνηχητές μεμβράνες - Το εφέ της μεμβράνης

- Συνηχητές μεμβράνες : σημαντική ηχοαπορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες (< 300Hz)

Η ηχοαπορρόφηση των συνηχητών μεμβρανών είναι μέγιστη στην συχνότητα συντονισμού  $f$  που καθορίζεται από την επιφανειακή μάζα  $\rho_s$  του φύλλου και το πάχος του διάκενου  $d$  (αέρας):

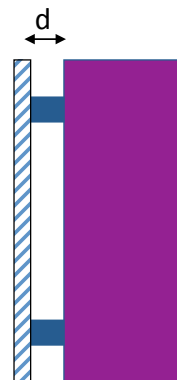
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{\rho_s d}}$$

**Παράδειγμα :**

Κοντραπλακέ  $\rho_s = 5 \text{ kg/m}^2$

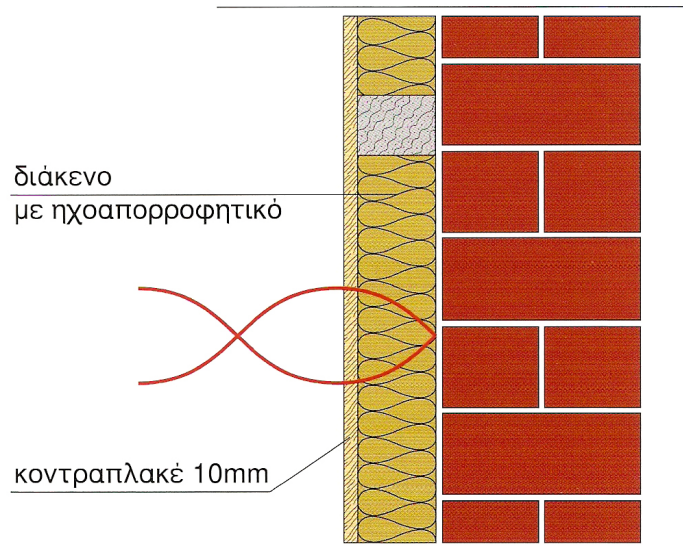
$d = 8 \text{ cm}$

$f_0 = 95 \text{ Hz}$



## 2.2- Η απορρόφηση του ήχου

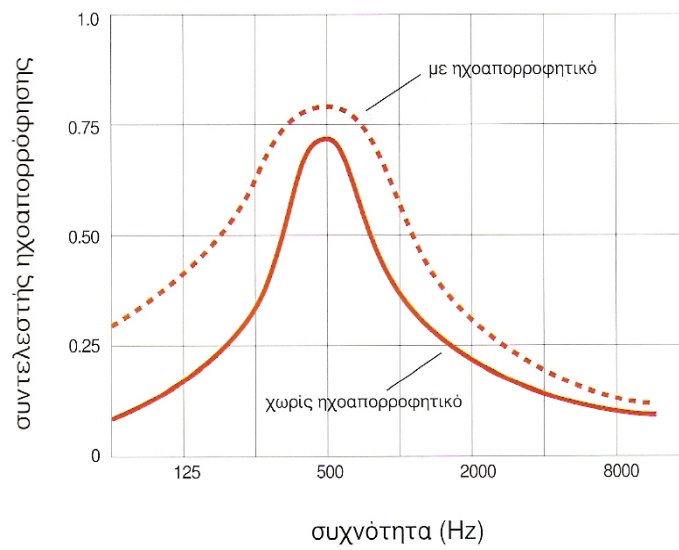
### A- Συνηχητές μεμβράνες - Το εφέ της μεμβράνης



Σχ.15. Διάταξη συνηχητή μεμβράνης

## 2.2- Η απορρόφηση του ήχου

### A- Συνηχητές μεμβράνες - Το εφέ της μεμβράνης



Σχ.16. Συντελεστής ηχοαπορρόφησης συνηχητή μεμβράνης

## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου

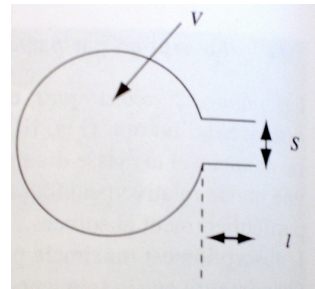
### B- Το εφέ των συνηχητών κοιλότητας

•Συνηχητές κοιλότητας : σημαντική ηχοαπορρόφηση στις **μεσαίες** συχνότητες (<  $f < 1400$  Hz)

Οι συνηχητές αυτοί αποτελούνται βασικά από μια κοιλότητα όγκου  $V$  όπου εγκλωβίζεται αέρας που επικοινωνεί με τον ελεύθερο χώρο με στενό άνοιγμα (λαιμό) διατομής  $S$  και μήκους  $L$ .

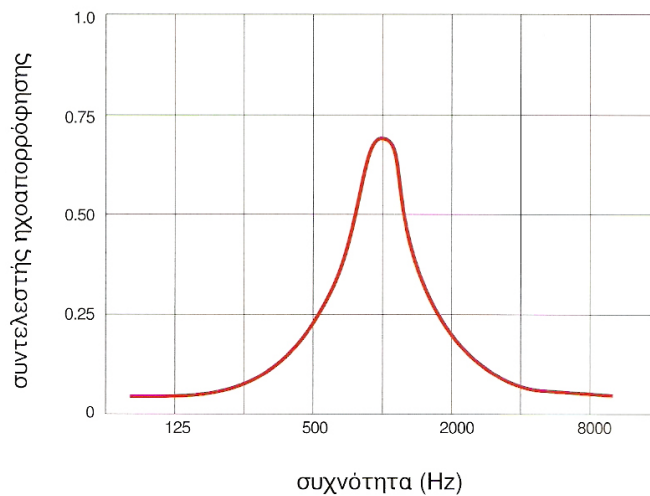
Οι συνηχητές κοιλότητας παρουσιάζουν αυξημένη ηχοαπορρόφηση σε μια συγκεκριμένη συχνότητα  $f_R$

$$f_R = \frac{320}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}$$



## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου

### B- Το εφέ των συνηχητών κοιλότητας



Σχ.18. Συντελεστής ηχοαπορρόφησης συνηχητή κοιλότητας

## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου

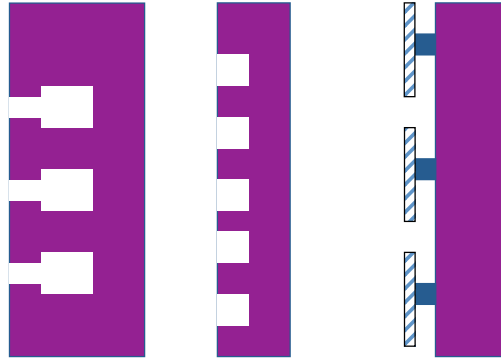
### B- Το εφέ των συνηχητών κοιλότητας

•Συνηχητές κοιλότητας : σημαντική ηχοαπορρόφηση στις **μεσαίες** συχνότητες ( $< f < 300\text{Hz}$   $< f < 1400\text{ Hz}$ ) [ *Helmholtz* resonators ]

Στην πράξη,

- οι συνηχητές μπορούν να αποτελούνται από κοιλότητες διαφορετικού μεγέθους (για να απορροφούν μία μεγαλύτερη δέσμη συχνοτήτων).

- ο λαιμός της κοιλότητας (του συνηχητή) δεν είναι απαραίτητος (τρύπια τούβλα για παράδειγμα).



## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου

### B- Το εφέ των συνηχητών κοιλότητας

•Συνηχητές κοιλότητας : σημαντική ηχοαπορρόφηση στις **μεσαίες** συχνότητες ( $< f < 300\text{Hz}$   $< f < 1400\text{ Hz}$ ) [ *Helmholtz* resonators ]

Παράδειγμα ακουστικών βάζων στα αρχαία θέατρα

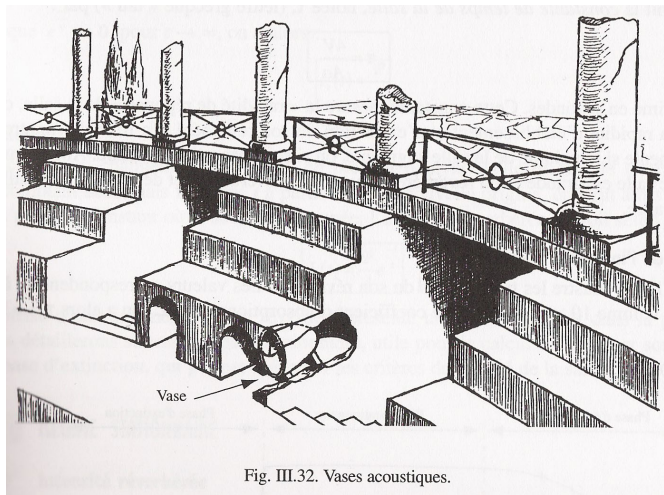


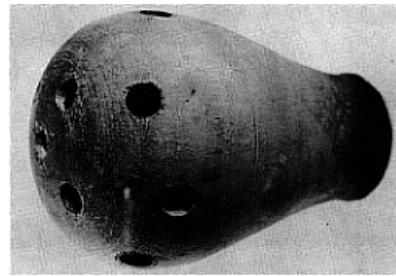
Fig. III.32. Vases acoustiques.

Cf. Antonio Fischetti, p.107

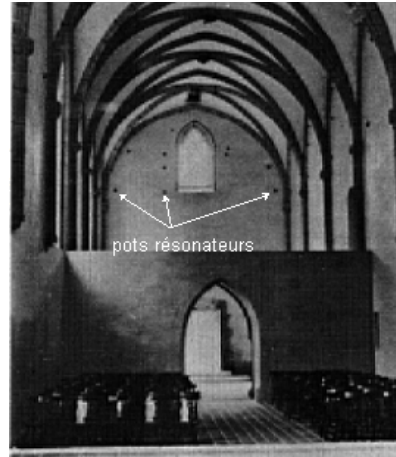




Ρεζονατέρ εν τέρρ κωίττ τού τέατρου πυνίκο-ρωμάινου τού Νόρα, εν Σαρδάινια.



Πότ ρεζονατέρ τού τσάπυλλου τού Πλετέρτζε.



Τσάπυλλο τού Πλετέρτζε, πρὸς τού Λυβλίτζανα, κωστρούττ εν 1403.

### ITALIE

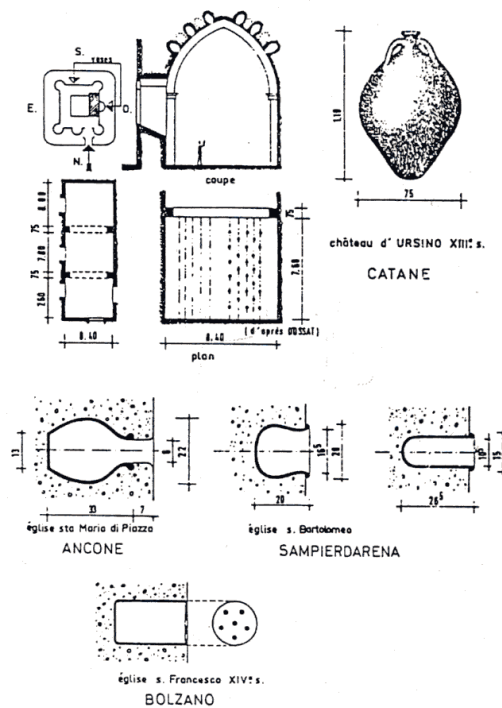
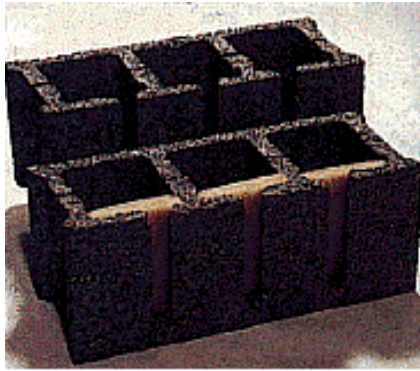


Fig. 3 - Exemples τού υαζώνων ακουστίκων ίταλίανων

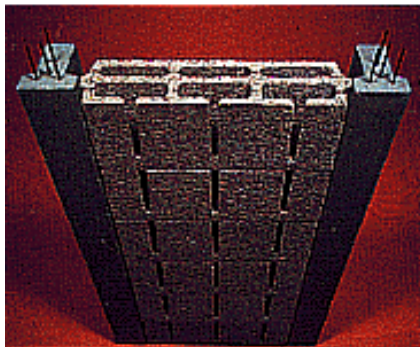
*«οί αρχιτέκτονες τής  
αρχαιότηττς δέν δέίθησαν  
παρά μόνο δύο μέσσα*

*Τήν γεωμετρία και τού αντί »*

F Canac

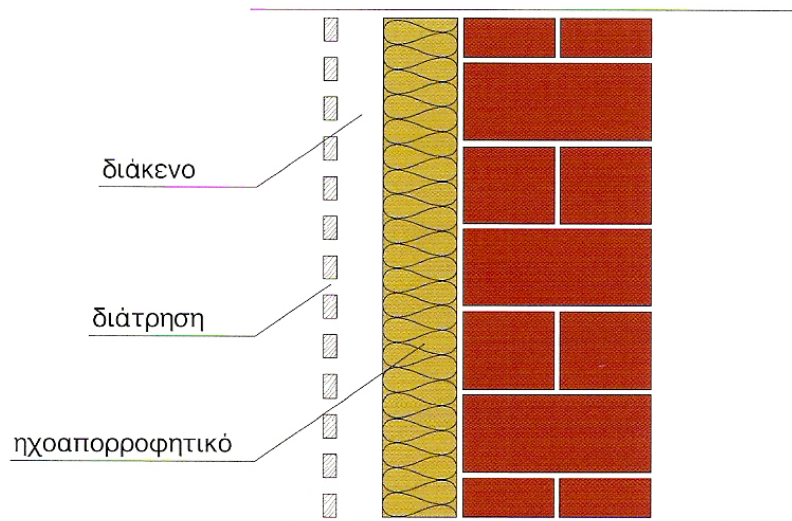


résonateur mural



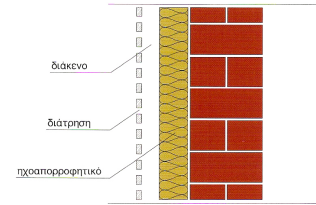
résonateurs en plafond

### 2.3- Η απορρόφηση του ήχου B- Το εφέ των συνηχητών κοιλοτήτων

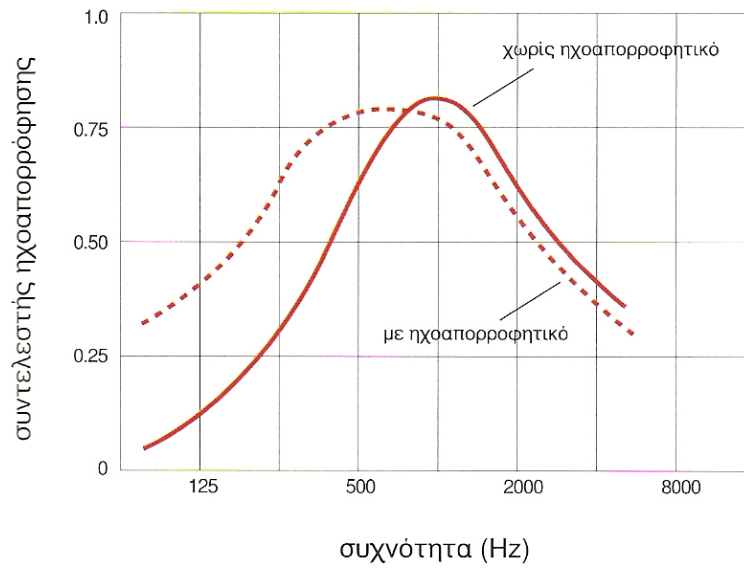


Σχ.19α. Διάταξη διάτρητου ηχοαπορροφητικού

## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου B- Το εφέ των συνηχητών κοιλοτήτων

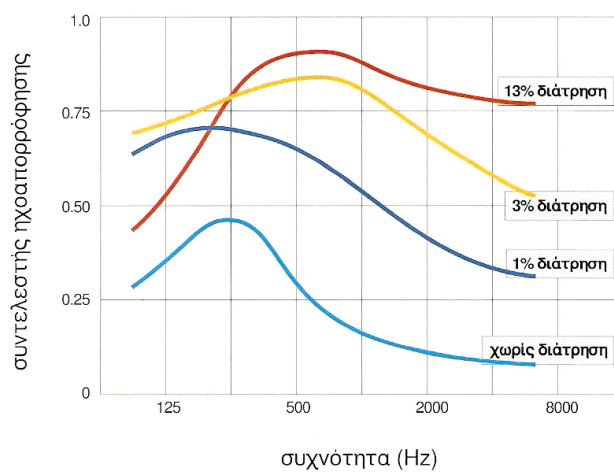


Σχ.19α. Διάταξη διάτρητου ηχοαπορροφητικού



Σχ.19β. Συντελεστής ηχοαπορρόφησης διάτρητου ηχοαπορροφητικού

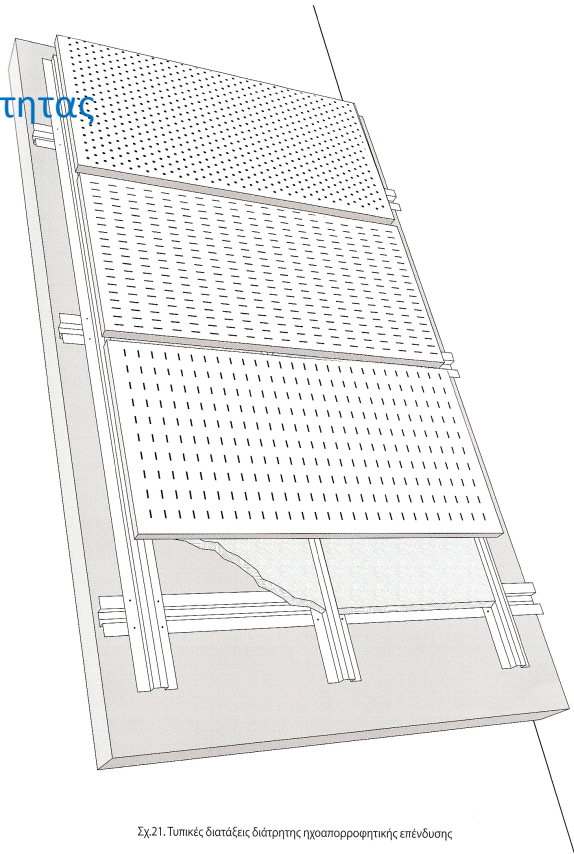
## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου B- Το εφέ των συνηχητών κοιλοτήτων



Σχ.20. Επίδραση του ποσοστού διάτρησης στον συντελεστή ηχοαπορρόφησης διάτρητης επένδυσης



2.3- Η απορρόφηση του ήχου  
B- Το εφέ των συνηχητών κοιλοτήτων



Σχ.21. Τυπικές διατάξεις διάτρητης ηχοαπορροφητικής επένδυσης

2.3- Η απορρόφηση του ήχου  
B- Το εφέ των συνηχητών κοιλοτήτων

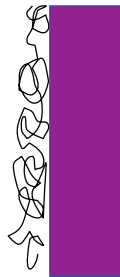




## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου Πορώδη ηχοαπορροφητικά

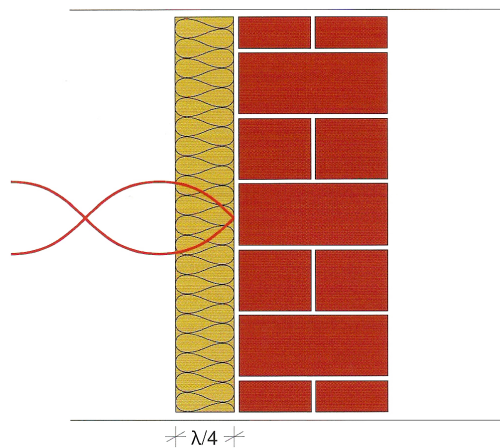
• Πορώδη ηχοαπορροφητικά: σημαντική ηχοαπορρόφηση στις υψηλές συχνότητες ( $> 1400$  Hz)

Τα πορώδη υλικά (πετροβάμβακας, υαλοβάμβακας, ινώδη) είναι υλικά με ανοικτούς πόρους. Η βασική ακουστική λειτουργία των υλικών αυτών είναι η απορρόφηση του ήχου μέσα από την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα μέσα στους πόρους.



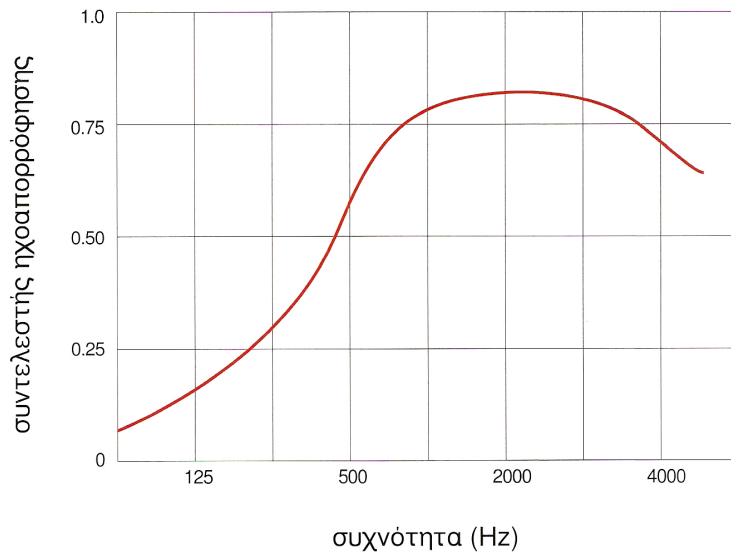
## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου Πορώδη ηχοαπορροφητικά

Για αποτελεσματική ηχοαπορρόφηση σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, θα πρέπει το πάχος του ηχοαπορροφητικού να είναι συγκρίσιμο με το  $1/4$  του μήκους κύματος στη συχνότητα αυτή. Σε αντίθετη περίπτωση η ηχοαπορρόφηση είναι χαμηλή.



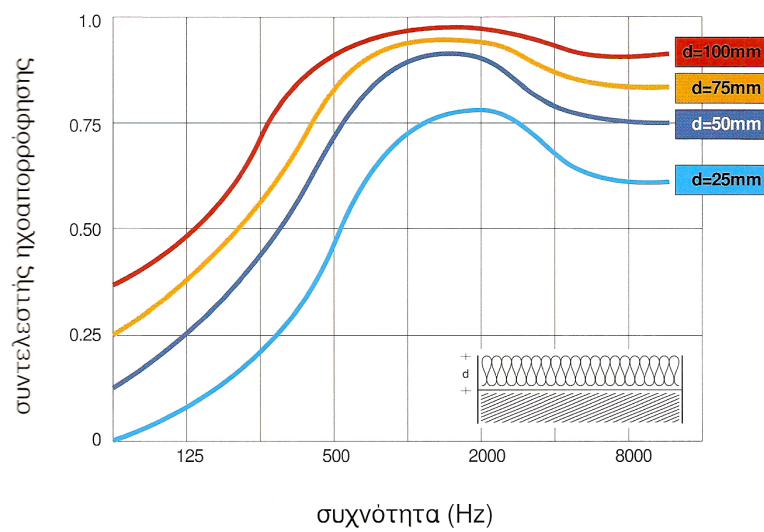
Σχ.12α. Σχέση μήκους κύματος - πάχους πορώδους

## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου Πορώδη ηχοαπορροφητικά



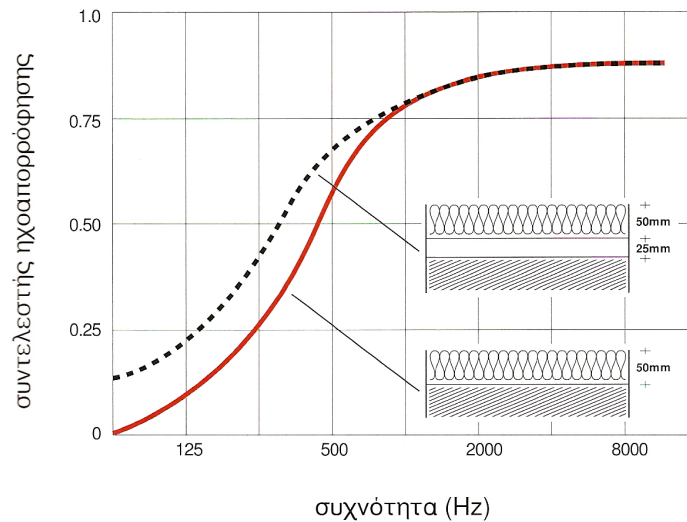
Σχ.12β. Συντελεστής ηχοαπορρόφησης πορώδους υλικού

## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου Πορώδη ηχοαπορροφητικά



Σχ.13. Επίδραση του πάχους του πορώδους υλικού στον συντελεστή ηχοαπορρόφησης

## 2.3- Η απορρόφηση του ήχου Πορώδη ηχοαπορροφητικά



Σχ.14. Επίδραση της απόστασης του πορώδους υλικού από την επιφάνεια τοποθέτησης στον συντελεστή ηχοαπορρόφησης

## 3- Ο άλφα Sabine - Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης)

Οι ικανότητες ηχοαπορρόφησης ενός υλικού εξαρτώνται από :

- 1- την δομή του
- 2- την τοποθέτησή του

Μπορούμε επίσης να συνδυάσουμε τις ικανότητες ηχοαπορρόφησης: ένα πάνελ θα απορροφήσει τις χαμηλές συχνότητες. Αν το τρυπήσουμε σε όλη την επιφάνειά του, θα απορροφήσει τις μεσαίες συχνότητες. Αν το καλύψουμε με πορώδες υλικό, θα απορροφηθούν οι υψηλές συχνότητες. Είναι λοιπόν δυνατόν , να αποκτήσουμε έναν καλό συντελεστή ηχοαπορρόφησης σε όλες τις συχνότητες.



	συχνότητα (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ασοβάτιστος τοίχος, άβαφος	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Βαμμένος τοίχος, καλυμμένος	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Επιφάνειες μπετόν αδρές	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Λείος σοβάς σε τοίχο	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Ασβεστοκονίαμα πεταχτό 15 mm	0,08	0,15	0,31	0,50	0,61	0,71
Επένδυση ραμποτέ 16 mm με 40 mm διάκενο	0,18	0,12	0,16	0,09	0,08	0,07
Νονοραπ 10 mm με αδρή επιφάνεια και διάκενο 50 mm	0,13	0,24	0,14	0,14	0,16	0,20
Νονοραπ 8 mm, διάκενο 20 mm γεμισμένο με ηχοαπορροφητικό	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	
Μοκέτα 5 mm πάνω σε δάπεδο	0,04	0,04	0,15	0,3	0,5	0,6
Χαλί με μακρύ πέλμα σε δάπεδο	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,4
Ξύλινη πόρτα πλακάς	0,14		0,06		0,05	
Άτομα καθιστά		0,23	0,56	0,78	0,88	0,89
Καρέκλα ξύλινη	0,01		0,02		0,02	
Πολυθρόνα βαθιά με ύφασμα	0,28	0,28	0,28	0,28	0,34	0,34
Συνήθης κουρτίνα κλειστή	0,05		0,23		0,30	
Πάπλωμα ορυκτόμαλλου 40 mm	0,19	0,34	0,55	0,74	0,88	0,97
Πλάκες ορυκτόμαλλου και διάκενο 8 mm	0,12	0,25	0,83	0,87	0,64	0,52
Φύλλο αλουμινίου 0,5 mm με διάτρηση 12,5%, με διάκενο 45 mm και απορροφητικό	0,77	0,56	0,50	0,48	0,49	0,40
Αφρώδες 50 mm πάνω σε τοίχο	0,12	0,20	0,45	0,65	0,70	0,75

ΠΙΝΑΚΑΣ IV. Συντελεστές ηχοαπορρόφησης διαφόρων υλικών και διατάξεων

## 4- Ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια

Η ηχοαπορροφητική ικανότητα μιας επιφάνειας δίνεται από τη σχέση

$$A = S \times \alpha$$

δηλαδή της επιφάνειας επί τον συντελεστή ηχοαπορρόφησης  $\alpha$  και εκφράζεται σε m<sup>2</sup>. (Sabines)

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2KHz	4KHz
<b>· <math>\alpha</math> σκυρόδεμα</b>	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
A ένας τοίχος(20m <sup>2</sup> )	0,4	0,8	1	1	1	1
<b>· <math>\alpha</math> πετροβάμβακας 50mm</b>	0,32	0,89	0,82	1,00	1,00	1,00
A ένας τοίχος (20 m <sup>2</sup> )	6,4	17,8	16,4	20	20	20





## 4- Ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια

Η ηχοαπορροφητική ικανότητα ενός χώρου εξαρτάται από την ηχοαπορρόφηση των επιφανειών του (τοιχοί, οροφές, δάπεδα) καθώς και από την ηχοαπορροφητική ικανότητα των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε αυτόν (έπιπλα, κουρτίνες, χαλιά, κτλ.)

Η συνολική ηχοαπορροφητική ικανότητα ενός χώρου δίνεται με την ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια :

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

## 5- Χρόνος αντήχησης, (T ή RT ή RT60) (Η διάρκεια αντήχησης)

Ο χρόνος αντήχησης ενός χώρου (για κάθε συχνότητα) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η στάθμη της ηχητικής πίεσης  $L_p$  που δημιουργείται στον χώρο από μια ηχητική πηγή κατά 60dB μετά από την παύση της

Χρησιμοποιούμε τον τύπο του Walter Clement SABINE (1900) που λέει :

$$RT60 = 0,16 \frac{V}{A}$$

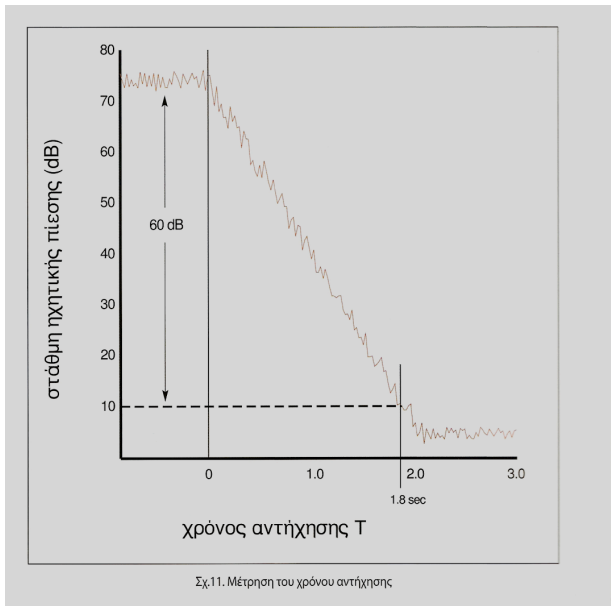
με:

V, όγκος της αίθουσας

A, Ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια

## 5- Χρόνος αντήχησης, (T ή RT ή RT60) (Η διάρκεια αντήχησης)

Walter Clement SABINE : 
$$RT60 = 0,16 \frac{V}{A}$$



## 5- Χρόνος αντήχησης, (T ή RT ή RT60) (Η διάρκεια αντήχησης)

Ο χρόνος αντήχησης ενός χώρου (για κάθε συχνότητα) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η στάθμη της ηχητικής πίεσης  $L_p$  που δημιουργείται στον χώρο από μια ηχητική πηγή κατά 60dB μετά από την παύση της

Χρησιμοποιούμε τον τύπο του Walter Clement SABINE (1900) που λέει :

$$RT60 = 0,16 \frac{V}{A}$$

με:

V, όγκος της αίθουσας

A, Ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια

Παραδείγματα :

Κάτω από την πυραμίδα του Λούβρου	10s environ
Είσοδος και αποβάθρα τρένου	1,5 à 3s
Σχολική αίθουσα	0,8s
Γυμναστήριο	2 à 4s
Αίθουσα συναυλιών	1,8 à 2,5s
Κατοικία κανονικά επιπλωμένη	0,5s
Κατοικία πολύ επιπλωμένη	0,2s

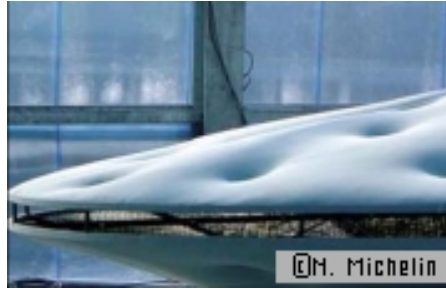
## 5- Χρόνος αντήχησης (Η διάρκεια αντήχησης)

Η τιμή του χρόνου αντήχησης ενός χώρου πρέπει να διατηρείται σε πλαίσια αποδεκτά για τις χρήσεις του χώρου αυτού. Μία χαμηλή τιμή (πολύ υπόκωφη ακουστική) όπως μία υψηλή τιμή (πολύ αντηχητική ακουστική) δεν είναι απαραίτητα και μία άνετη τιμή. Πρέπει να προσαρμόζουμε την αντήχηση στις χρήσεις.

Παράδειγμα :  
Salle de classe Tr[500-2kHz] 0,6 - 0,8s  
(cf. JOUHANEAU J. : *Acoustique des salles et sonorisation* - Paris - T1D - 1997 - 610p)



la salle des Princes, Monaco - Système Carmen, CSTB



Gymnase à Grenoble, Nicolas Michelin  
[www.cyberarchi.com](http://www.cyberarchi.com)

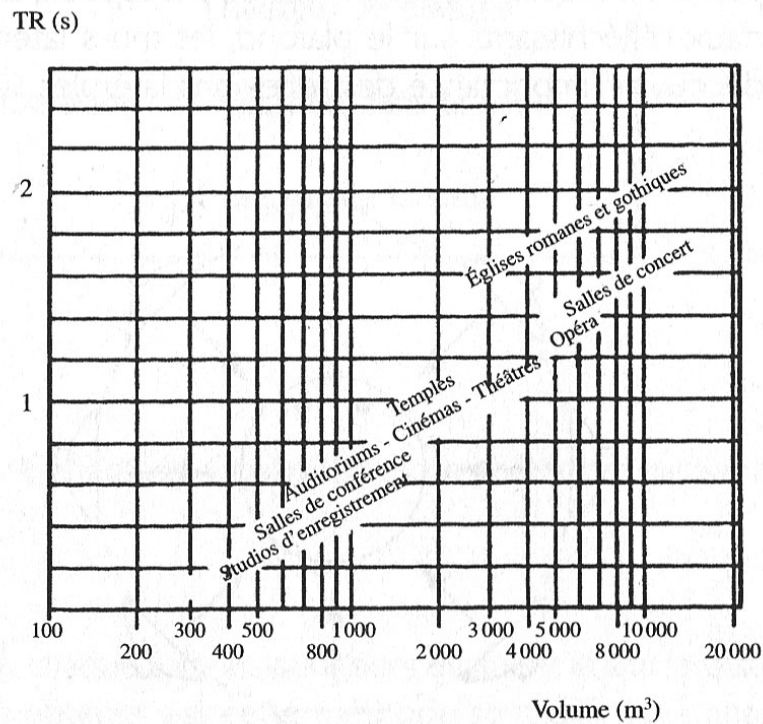


Fig. IV.2. Courbes usuelles du TR optimal.