



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider-Biskra Faculté des Sciences et de la technologie Département : Architecture

Année universitaire : 2019—2020

1^{ère} année master : Architecture

Matière : **Equipement II Acoustique du bâtiment**

Enseignant : **Dr MEZERDI Toufik**

CHAPITRE : PROPAGATION DU SON EN ESPACE CLOS

Cour N° 08 : Propagation du son en espace clos

Cour N° 08 : Propagation des sons en espace clos





Cour N° 08

Plan du cour

- 1- Champs réverbère**
 - 1-1 coefficient d'absorption d'un matériau « α »**
 - 1-2 Aire d'absorption équivalente A [m²]**
 - 1-3 Différents types de matériaux absorbants**
 - 1-3-1 Les matériaux fibreux**
 - 1-3-2 Les panneaux fléchissant**
 - 1-3-3 Le résonateur**
- 2- intensité sonore globale**
 - 2-1 Intensité rayonnée I_d**
 - 2-2 Intensité réverbéré I_r**
- 3- Niveau de pression acoustique**
- 4- Théorie de la réverbération**
 - 4-1 Temps de réverbération [Tr]**
 - 4-2 La Formule de Sabine**
 - 4-2-1 Exemple d'application sur le logiciel ECOTECT**



1- Champs réverbère

Lorsqu'une source sonore S de puissance W est disposée à l'intérieur d'un milieu fermé (local par exemple), en plus de l'énergie rayonné directement vers un point d'observation R , vient s'ajouter une énergie réfléchié une ou plusieurs fois par les parois [1]. Fig 1

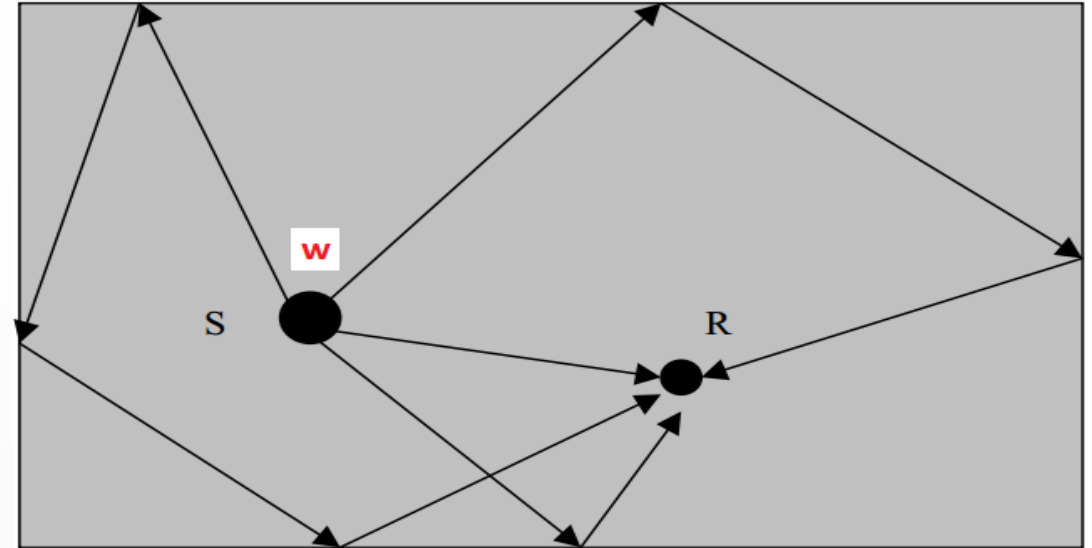


Fig 1: Réflexions en espace clos [1]

1-1 coefficient d'absorption d'un matériau « α »

Lorsqu'une onde sonore rencontre un matériau, une partie en général importante de son intensité (ou de son énergie) est réfléchié (donc si le matériau est une paroi, dans le même local où se trouve la source sonore); une partie en général très faible est transmise à travers le matériau, et une dernière partie est absorbée. Cette absorption est une transformation de l'énergie acoustique en énergie mécanique (des mouvements, déplacements, vibrations) et parfois calorifique, et a lieu essentiellement en surface du matériau.



Le coefficient d'absorption α d'un matériau représente la fraction de la puissance acoustique incidente absorbé par ce matériau : c'est donc le rapport de l'énergie absorbée à l'énergie incidente :

Lorsque l'onde acoustique atteint une paroi, il se produit principalement trois phénomènes :

1. Une réflexion sur la paroi d'une partie de l'énergie acoustique
2. Une absorption de l'énergie par le matériau se trouvant à la surface de la paroi
3. Une transmission d'énergie dans le local voisin par la mise en vibration de la paroi.

Par exemple si a une certaine fréquence le matériau Absorbe 60% de l'énergie on dit que $\alpha=0,6$

Coefficient d'absorption

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée (4)}}{\text{énergie incidente (1)}}$$

Coefficient de transmission

$$\tau = \frac{\text{énergie transmise (2)}}{\text{énergie incidente (1)}}$$

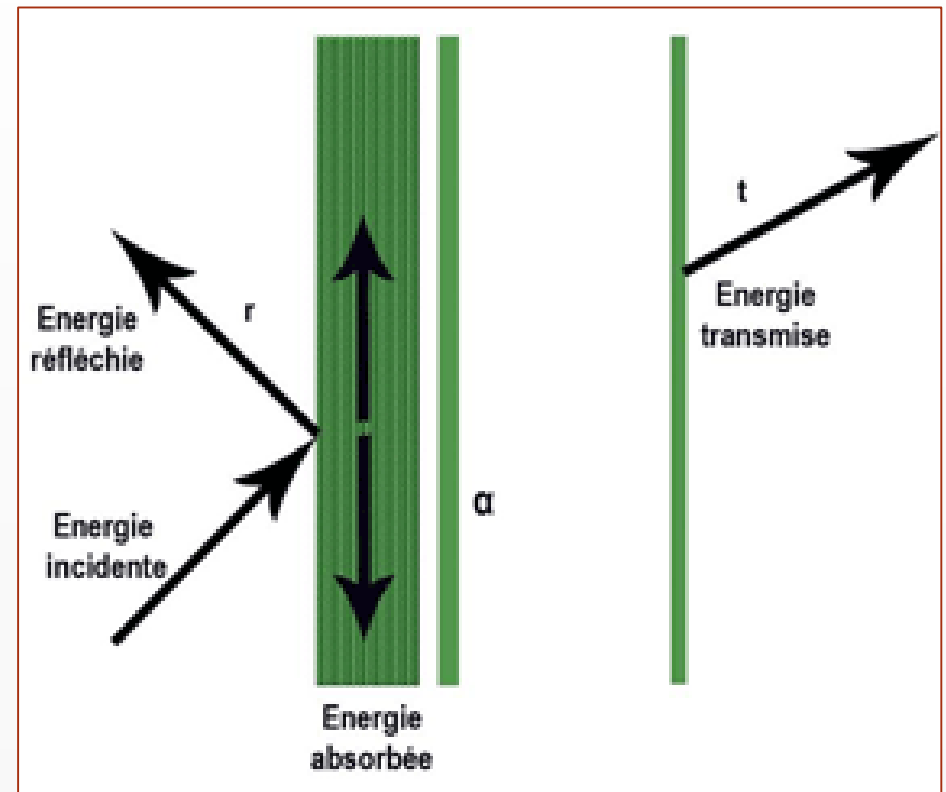


Fig 2: Comportement d'une onde sonore sur une paroi (Source: <http://asm-acoustics.be/fr/notions-acoustiques/comportement-d-une-onde-sonore-sur-une-paroi>)



α étant sans dimension. α dépend de la nature du matériau et de la fréquence de l'onde incidente sur la paroi.

- Si α est égal à 1, cela signifie que la paroi a absorbé la totalité de l'énergie et que rien n'est réfléchi : le matériau est absorbant.
- Si α est égal à 0, cela signifie que la paroi a réfléchi la totalité de l'énergie et que rien n'est absorbé : le matériau est réverbérant.

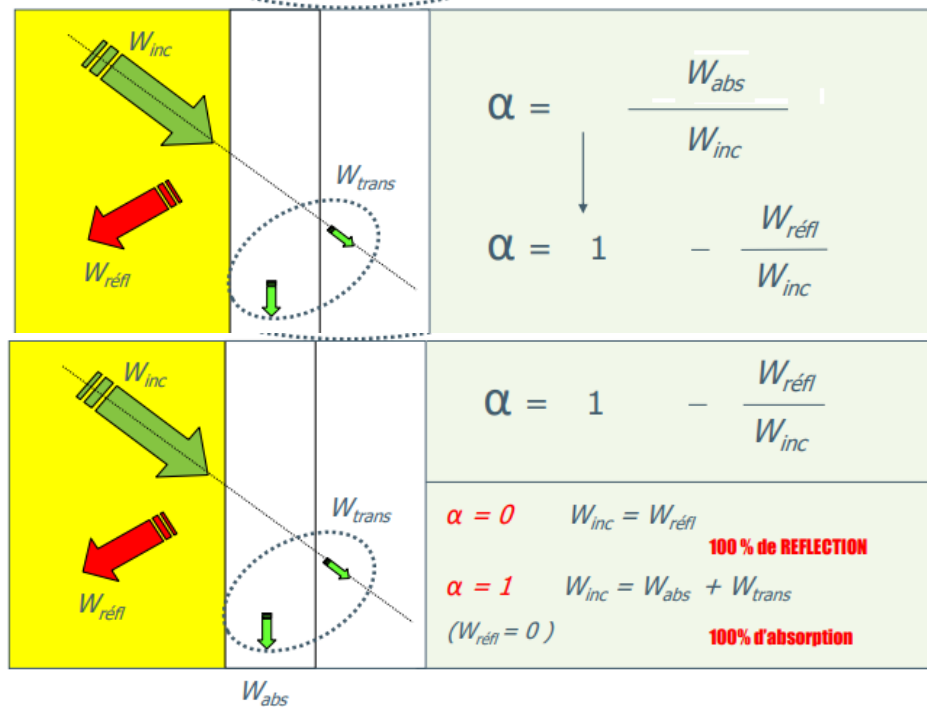


Fig 3: Caractéristiques de mur selon la valeur de α [2]

Le coefficient d'absorption α dépend de la nature des matériaux et de l'angle d'incidence ainsi que de la fréquence

Le tableau suivant donne les valeurs du coefficient α de quelques revêtements de surfaces courants :



Cour N° 08 : Propagation du son en espace clos



6

MATÉRIAU	Fréquence (Hz)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Béton	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Plâtre	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03
Verre 3 (mm)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Placage de bois						
a) épaisseur 8 (mm) avec vide d'air de 30 (mm) 5 (kg/m ²)	0,25	0,22	0,04	0,03	0,03	0,08
b) épaisseur 16 (mm) avec vide d'air de 50 (mm) 10 (kg/m ²)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Polyuréthane (e = 30 mm, 30 kg/m ³)	0,03	0,15	0,48	0,65	0,82	0,81
Laine de verre collée épaisseur (40 mm, 70 kg/m ³)	0,29	0,52	0,69	0,89	0,96	0,97
Rideau épais et plissé en velours...	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
PVC	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
Caoutchouc	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
PVC sur sous-couche (5 mm)	0,02	0,09	0,31	0,12	0,06	0,03
Parquet bois collé	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Parquet bois sur lambourde	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,06
Moquette bouclée (4 mm)	0,01	0,03	0,05	0,11	0,32	0,66
Moquette sur thibaude (5,5 + 8(mm))	0,04	0,10	0,31	0,70	0,93	0,74
Marbre	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Absorption totale S.α(m²)						
Fauteuil avec revêtement velours	0,14	0,23	0,35	0,39	0,37	0,38
Avec revêtement plastique	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Personne assise 0.15	0,23	0,56	0,78	0,88	0,89	
Personne debout	0,15	0,23	0,61	0,97	1,14	1,14

Tab 1: Valeurs des coefficients d'absorption α pour différents matériaux et à différentes fréquences (Source: <http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/atenzia/RA05-Correction-acoustique.pdf>)



1-2 Aire d'absorption équivalente A [m²]

L'aire d'absorption équivalente A est définie comme la valeur de la surface fictive d'une paroi (ou d'un matériau) parfaitement absorbante, ayant la même absorption que la paroi (ou le matériau) considérée. Ainsi : $A=S \cdot \alpha$, où :

- A, aire d'absorption équivalente de la paroi (ou du matériau) en m²
- S, surface de la paroi (ou du matériau) en m²
- α , coefficient d'absorption de la paroi (ou du matériau)

Dans un local, les parois peuvent être de différentes natures. Pour calculer l'aire d'absorption équivalente A, à une fréquence, il faut faire la somme des produits des surfaces élémentaires par leurs coefficients d'absorption α à cette fréquence :

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots \dots \dots \alpha_n \cdot S_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$



1-3 Différents types de matériaux absorbants

La qualité du traitement de la salle dépend du choix des matériaux des diverses parois. Si l'on prend différents types de matériaux, dont les absorptions se complètent, le traitement sera plus facile à trouver et l'absorption sera plus régulière à toutes les fréquences audibles.

On classe les matériaux en trois catégories :

- matériaux fibreux,- panneaux fléchissant,- résonateur.

1-3-1 Les matériaux fibreux

Les matériaux fibreux rencontrés dans des applications liées au transport ou au bâtiment sont constitués généralement de laines minérales. Les trois principales variétés de laines minérales utilisées sont : – les laines de verre fabriquées généralement à partir de sable et de verre recyclé (calcin), – les laines de roche produites à partir de roches volcaniques, – les laines de laitier réalisées à partir de matières recyclées en provenance de hauts fourneaux. Ils absorbent préférentiellement aux fréquences élevées, les aigus ($f > 1000$ Hz).[3]

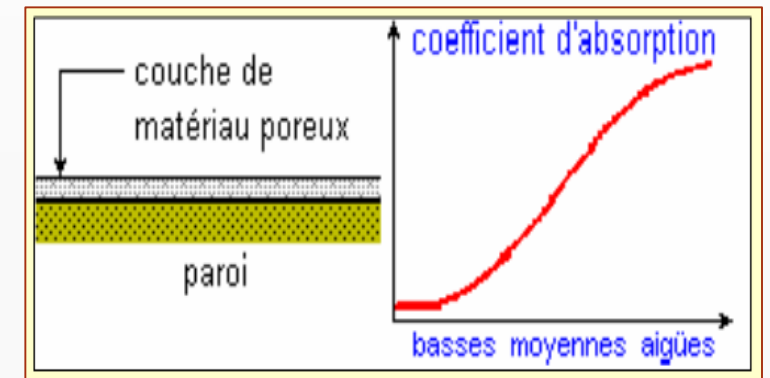


Fig 3: Fréquences en relation avec le coefficient d'absorption (Source: <https://docplayer.fr/18381673-Cours-d-acoustique-du-du-batiment-chapitre-4-acoustique-des-locaux-correction-acoustique.html>)



Fig 4: laines de roche (Source: <https://www.deco.fr/bricolage-travaux/isolation/actualite-779446-dossier-laine-roche.html>)



Fig 5: Feutre de chanvre (Source: <https://www.eco-logis.com/isolation-phonique-acoustique/>)



Fig 6: laines de verre (Source: <https://www.deco.fr/bricolagetraavaux/isolation/actualite-779446-dossier-laine-roche.html>)

1-3-2 Les panneaux fléchissant

sont des plaques de faible épaisseur montées en membrane sur des liteaux fixés sur un support rigide et massif, un mur porteur par exemple. Lorsqu'une onde heurte la membrane à une fréquence voisine de la résonance, il se produit une absorption par l'intermédiaire de la lame d'air jouant le rôle de ressort. Ils sont utilisés pour les basses fréquences, les graves (< 300Hz).

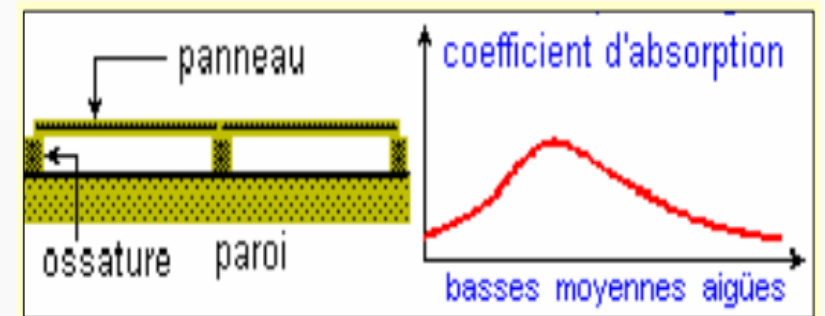


Fig 7: Fréquences en relation avec le coefficient d'absorption ,panneaux fléchissant (Source: <https://docplayer.fr/18381673-Cours-d-acoustique-du-du-batiment-chapitre-4-acoustique-des-locaux-correction-acoustique.html>)



1-3-3 Le résonateur

un dispositif composé d'un goulot de section S et de longueur L lié à un corps de volume d'air V. Lorsqu'une onde met en vibration l'air contenu dans le goulot, il y a dissipation d'énergie par frottement dans le col du goulot, ce qui se traduit par une absorption d'autant plus importante que la fréquence de l'onde est voisine de la fréquence de résonance. Ce dispositif absorbe préférentiellement les fréquences médianes, les médiums ($300\text{Hz} < f < 1000\text{ Hz}$).

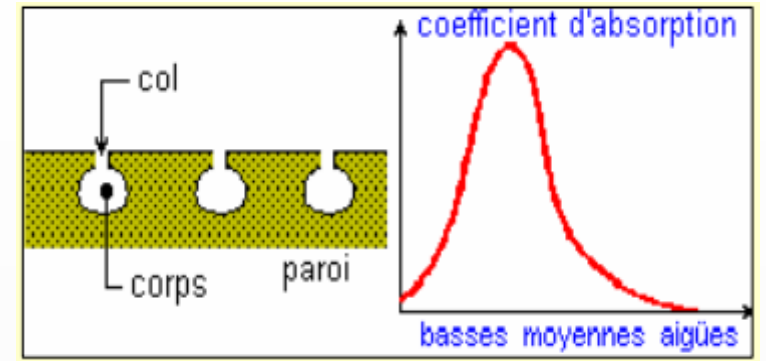


Fig 8: Fréquences en relation avec le coefficient d'absorption ,Resonateur(Source: <https://docplayer.fr/18381673-Cours-d-acoustique-du-du-batiment-chapitre-4-acoustique-des-locaux-correction-acoustique.html>)

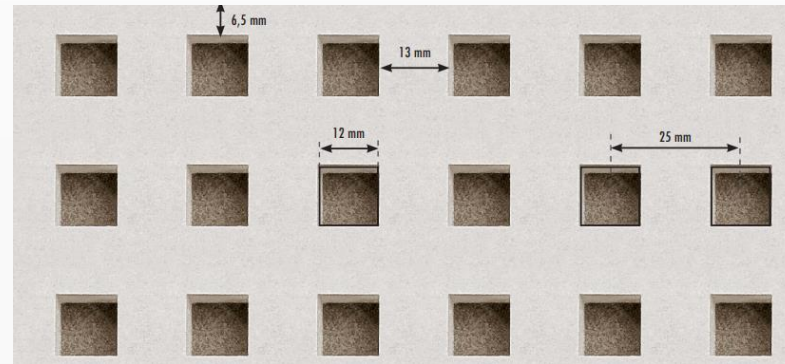


Fig9:resonateurmural(Source: http://www.ciffreobona.fr/userfiles/file/PDF/19/254/1035/12925/ft_knauf_delta_4_quadril.pdf)



Fig10: Resonateurmural(Source: <https://www.homecinema-fr.com/forum/acoustique-correction-passive/l-acoustique-du-home-cinema-pour-les-neophytes-t29929274-2055.html>)



L'alpha Sabine d'un matériau dépend donc de la fréquence, et sa valeur est comprise entre 0 et 1. Les qualités d'absorption d'un matériau dépendent donc de sa matière et de sa mise en œuvre. On peut ainsi combiner les propriétés d'absorption. Un panneau va absorber les basses fréquences. Si on le perce de trous sur toute sa surface, il va absorber les médiums. Si on couvre les panneaux de matériaux poreux, les aigus seront alors absorbés. Il est ainsi possible d'obtenir un coefficient d'absorption de bonne qualité à toutes les fréquences.

Isolation acoustique et thermique même combat ! Pas tout à fait, car l'acoustique est plus compliquée et sophistiquée que la thermique. Une bonne isolation acoustique est donc souvent synonyme de bonne isolation thermique, mais l'inverse n'est pas forcément vrai, les bruits sont plus difficiles à maîtriser que les degrés.

2- intensité sonore globale

Dans une salle clos où le son est en partie absorbé et en partie réfléchi par les parois, l'intensité sonore globale I est la somme des deux intensités sonores :

2-1 Intensité rayonnée I_d : Elle est rayonnée directement par la source de directivité Q elle est égale :

$$I_d = \frac{Q \cdot W}{4\pi r^2}$$



2-2 Intensité réverbérée I_r : Elle est calculée par la relation suivante :

$$I_r = \frac{4W}{R}$$

avec R est la constante de la salle; $R = \frac{S \cdot A}{S - A}$

► L'intensité sonore globale I est la somme des deux intensités sonores :

$$I = I_d + I_r$$
$$I = \frac{Q \cdot W}{4\pi r^2} + \frac{4W}{R}$$

3- Niveau de pression acoustique Le niveau de pression acoustique à la distance r de la source s'exprime par la relation :

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \text{ (dB)}$$

$$R = CL \text{ (constante du local m}^2\text{)}$$

Le facteur de directivité a pour valeur :




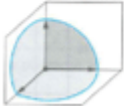
- 1 si la source se trouve au milieu du local , 2 si la source se situe au milieu d'une, paroi 4 si la source se situe à l'intersection de deux parois 8 si la source se trouve au point de rencontre des trois parois formant trièdre rectangle



Cour N° 08 : Propagation du son en espace clos



13

Illustration du rayonnement sonore	« Forme » du rayonnement	Facteur de directivité Q
	Sphère Source sonore en champ libre	1
	½ sphère Source sonore sur une surface plane	2
	¼ sphère Source sonore contre une paroi	4
	1/8 sphère Source sonore dans un angle (2 parois + 1 surface plane)	8

Tab 2:le facteur de directivité selon la forme du rayonnement[5]

Remarque :

Au-delà d'une certaine distance, la quantité $\frac{Q}{4\pi r^2}$ devient négligeable devant le terme $\frac{4}{CL}$ de sorte que le niveau sonore ne varie pratiquement plus avec la distance;

On dit alors que l'on est dans le champ réverbéré du local et le niveau prend l'expression :

$$L_1 = L_w + 10 \log \frac{4}{CL} \text{ (dB)}.$$

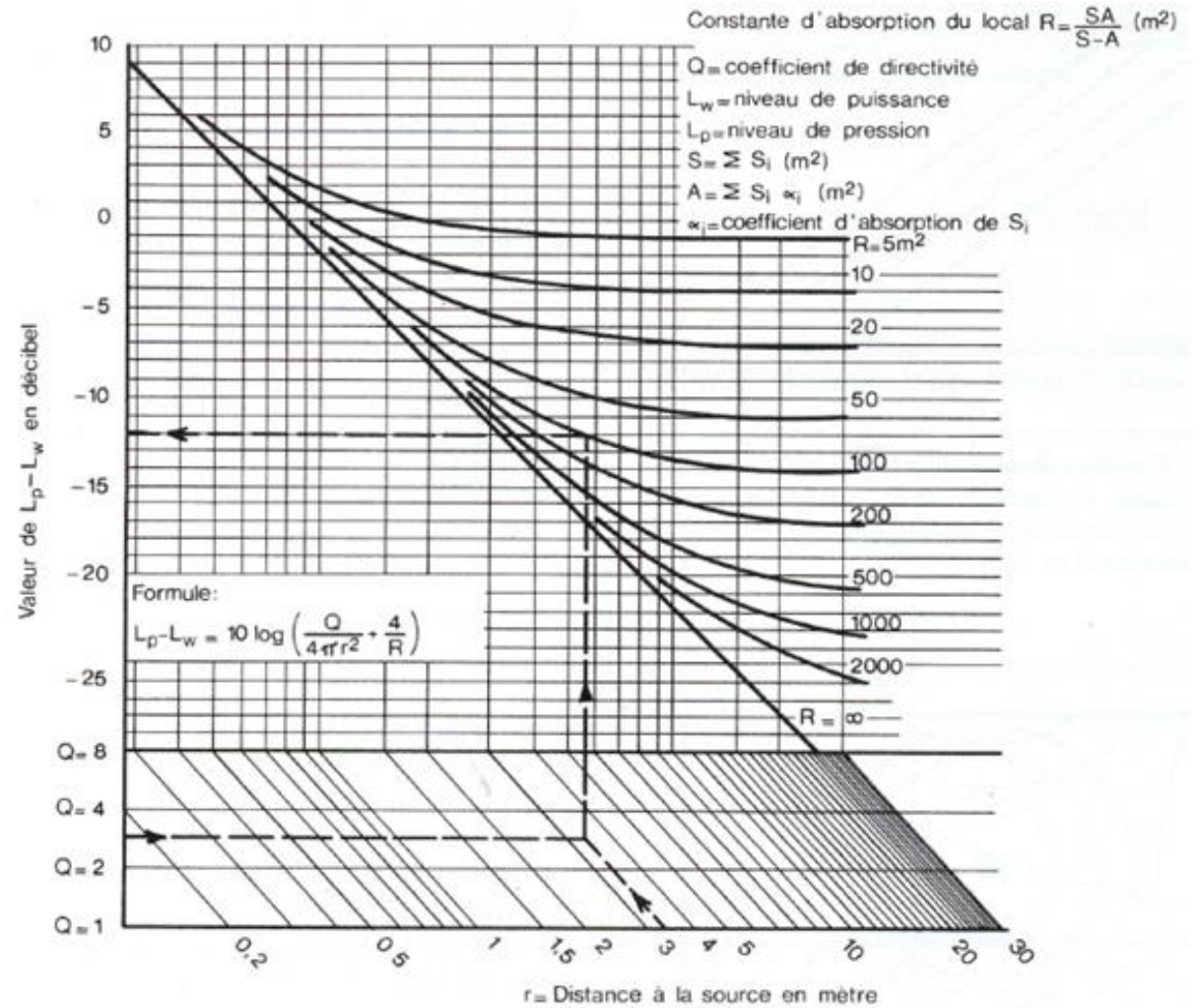
Par ailleurs le niveau sonore dans le champ réverbéré sera d'autant plus élevé que CL sera faible, c'est à dire que l'absorption des parois sera petite.



Cour N° 08 : Propagation du son en espace clos



On peut aussi utiliser l'abaque suivant :





4- Théorie de la réverbération

Lorsque l'on interrompt l'émission d'une source le son décroît plus ou moins rapidement selon que les parois sont absorbantes ou réfléchissantes. On parle fréquemment de la "sonorité" ou de la persistance sonore d'une salle.

Pour les locaux à parois très absorbantes, la **décroissance est rapide**, on dit encore qu'ils sont "sourds" et procure à l'auditeur une impression désagréable d'étouffement.

A l'opposé, dans un local à parois très réfléchissantes, la **décroissance du son est lente** et nuit à l'intelligibilité de la parole notamment pour des grandes salles ou l'interférence entre des ondes directes et réfléchies peuvent engendrer des **échos**. Le phénomène d'écho est dû à la différence de parcours entre l'onde directe et l'onde réfléchi **. Il se produit lorsque l'intervalle de temps qui sépare l'arrivée des deux ondes au même point est supérieur à 0,1 seconde.

4-1 Temps de réverbération [Tr]

Le critère le plus utilisé dans les différentes réglementations est le temps de réverbération. On le définit comme le temps nécessaire – en secondes – pour que le niveau de pression acoustique descende de 60 dB après l'interruption de la source sonore.

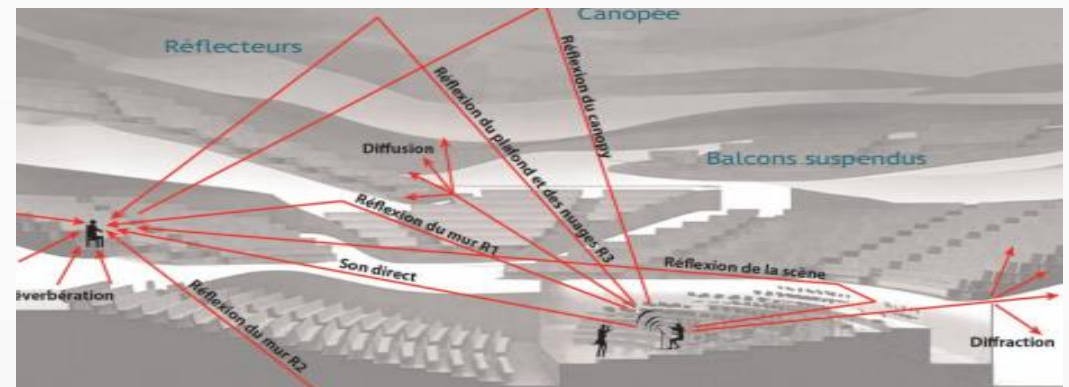


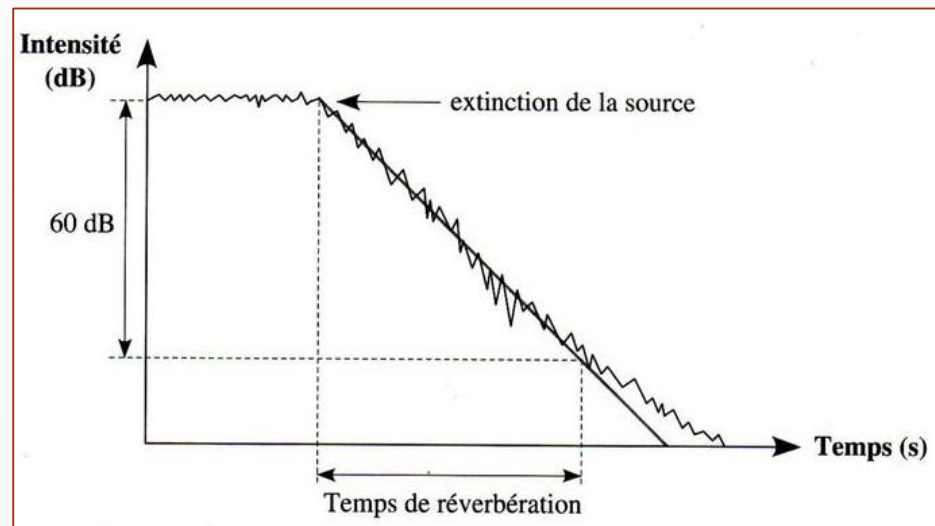
Fig 11: Schématisation de la propagation du son dans la grande salle de la Philharmonie [6]



Le critère le plus utilisé dans les différentes réglementations est le **temps de réverbération**. On le définit comme le temps nécessaire – en secondes – pour que le niveau de pression acoustique descende de 60 dB après l'interruption de la source sonore.

Dans la plupart des situations, un temps de réverbération bas améliore le confort acoustique. Les échanges sont mieux compris lorsqu'il n'y a pas d'écho, c'est-à-dire lors d'un temps de réverbération court.

Cependant, ce n'est pas toujours vrai. Dans certaines circonstances, comme à un concert ou une conférence, un plus long temps de réverbération peut s'avérer nécessaire pour plus de confort d'écoute**





La plupart des réglementations et associations d'experts définissent un temps de réverbération maximum pour les différents types de locaux en fonction du secteur d'activité d'un bâtiment. Il est généralement convenu qu'un temps de réverbération acceptable est atteint, pour la plupart des applications, à 0,9-1,0s et qu'un bon temps de réverbération est atteint à 0,4-0,6s. Le temps de réverbération dépend de la taille et de la configuration de la pièce, de la quantité, de la qualité et du positionnement des surfaces absorbantes. Plus il y a d'absorption acoustique dans la pièce, plus le temps de réverbération sera court.

4-2 La Formule de Sabine

Le temps de réverbération T_r (RT) d'un local peut être déterminé facilement par la formule de Sabine :

$$T_r = 0,16 \frac{V}{A} \text{ (s)}$$

avec:

- T_r : le temps de réverbération en (s)
- V : le volume de local en (m^3)
- A : l'air d'absorption équivalente en (m^2) :

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



Cette formule a été déterminée à la fin du XIX^e siècle par le chercheur Américain W C Sabine. D'autres formules existent, comme celle de Eyring, de Millington ou de Pijolle, mais la formule de Sabine a été retenue car la plus simple et de bonne qualité, dans la mesure où la répartition des absorbants est homogène et où les coefficients d'absorption sont assez faibles. De plus, ils sont déterminés en laboratoire au moyen de cette même formule de Sabine, c'est la raison pour laquelle les coefficients α sont également appelés α Sabine.

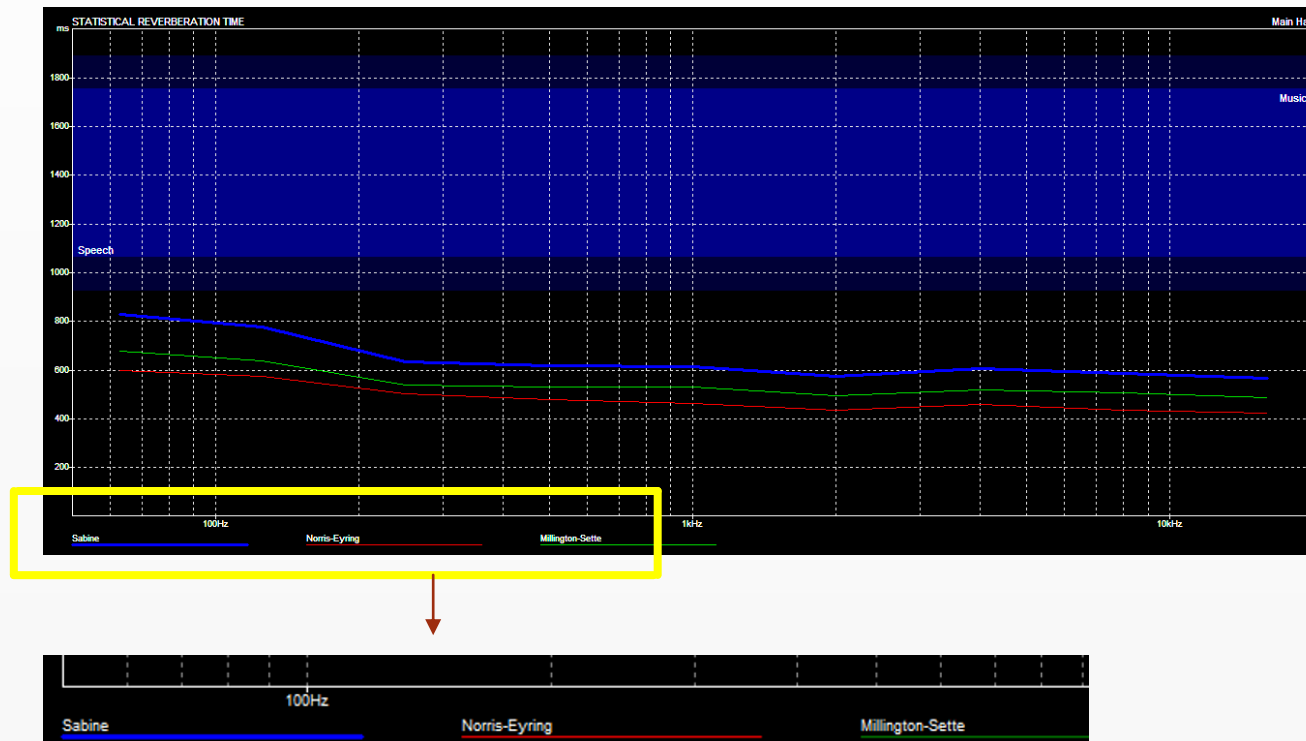


Fig 12: output simulation du temps de réverbération sabine sur ECOTECT (Source: Auteur)



Cour N° 08 : Propagation du son en espace clos



19

Le tableau suivant donne quelques valeurs du temps de réverbération par type de pièce :

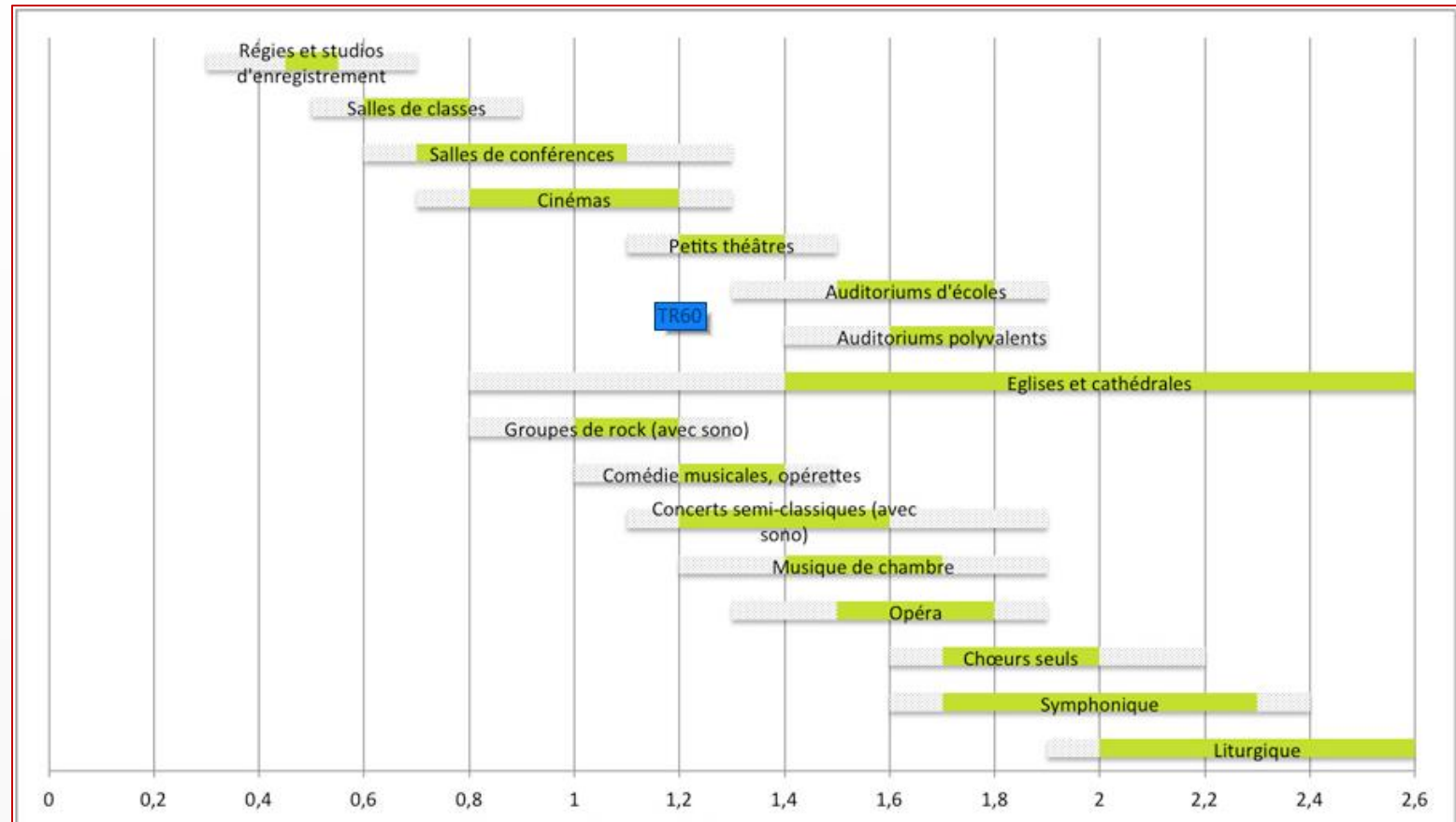


Fig 13 : Temps de réverbération idéal par type de local (Source : <http://www.madeinacoustic.com/fr/correction-acoustique>)



4-2-1 Exemple d'application sur le logiciel ECOTECH

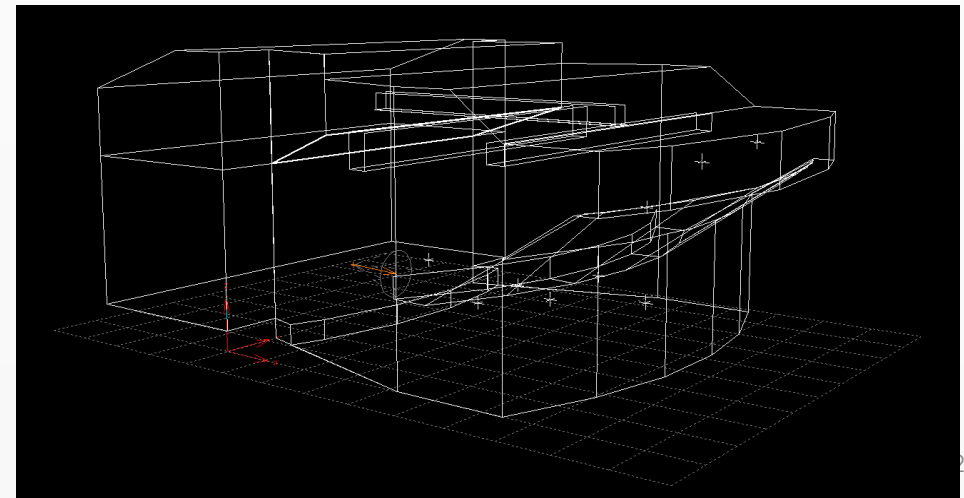
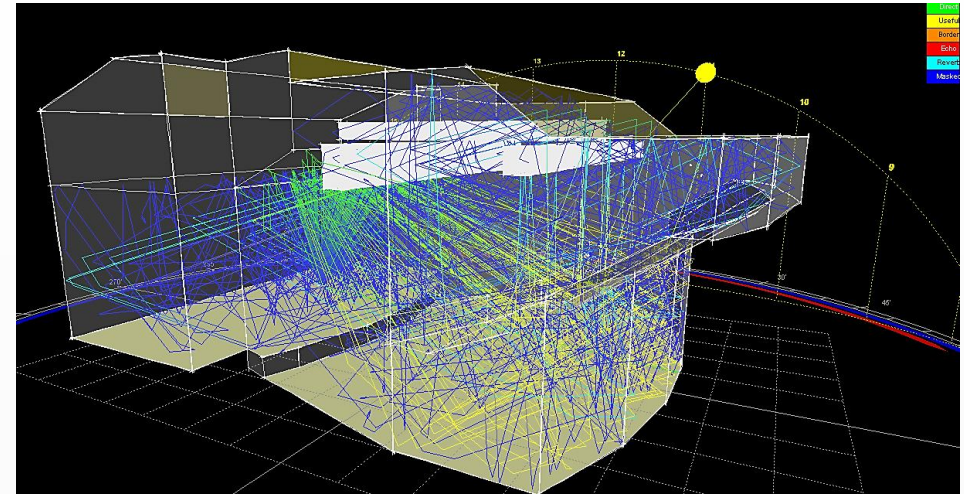
TATISTICAL ACOUSTICS - Main Hall **
Model: C:\Program Files (x86)\Square
One\Examples\AcousticRays.eco

Volume: 7286.130 m3
Surface Area: 3325.434 m2
Occupancy: 1600 (2000 x 80%)
Optimum RT (500Hz - Speech): 1.06 s
Optimum RT (500Hz - Music): 1.75 s

Volume per Seat: 3.643 m3
Minimum (Speech): 5.942 m3
Minimum (Music): 9.379 m3

Most Suitable: Millington-Sette (Widely varying)
Selected: Sabine (Uniformly distributed)

FREQ.	TOTAL ABSPT.	SABINE NOR-ER RT(60) RT(60)		MIL-SE RT(60)
63Hz:	1102.458	0.83	0.60	0.68
125Hz:	1169.819	0.78	0.58	0.64
250Hz:	1124.286	0.64	0.50	0.54
500Hz:	1044.030	0.62	0.48	0.53
1kHz:	1047.504	0.62	0.46	0.53
2kHz:	1097.662	0.57	0.43	0.50
4kHz:	1052.344	0.61	0.46	0.52
8kHz:	1125.025	0.59	0.44	0.50
16kHz:	1149.509	0.57	0.42	0.49





5- Echo et réverbération : quelles sont les différences

On confond souvent l'écho à la réverbération, alors que ce sont deux notions complètement distinctes.

Réverbération

Dans le cas d'une **réverbération**, les sons réfléchis sont espacés par un intervalle de temps très court. L'oreille n'arrive pas à différencier un son du précédent.

Une réverbération n'est pas une réplique claire de l'échantillon sonore d'origine. Si l'échantillon initial est constitué de mots, ces mots ne seront pas distingués dans une réverbération.

Echo

Pour l'**écho**, le temps de séparation entre deux sons consécutifs est long et l'oreille perçoit nettement les répétitions.

Un écho est généralement clair et peut être clairement distingué. Si l'écho est formé par un ensemble de mots prononcés, ceux-ci sont clairement compréhensibles à partir du signal renvoyé ainsi que du signal d'origine

C'est donc **l'écart de temps qui sépare chaque répétition**. Un seul écho produit au bout d'une seconde a par exemple la même durée qu'une réverbération avec une centaine de répétitions espacées de quelques millisecondes.



Références bibliographiques

- [1] Krauss G, René Y, Kuznik F « Acoustique du bâtiment » Consulté à l'adresse « <https://fr.scribd.com/document/283747336/Ensa-Acoustique-Du-Batiment> » le 25/05/2020
- [2] Jedidi M, Soussi CH (2013) , « Acoustique du bâtiment Cours et exercices corrigés » Consulté à l'adresse , < https://www.researchgate.net/publication/291697557_Acoustique_du_batiment_Cours_et_exercices_corriges > (08/11/2019)
- [3] Doutres, O. (2007). *Caractérisation mécanique de matériaux fibreux en vibro-acoustique* (Doctoral dissertation).
- [4] Montaignac de Chauvance, R. (2011). Analyse du comportement d'éléments fléchis en béton renforcé de fibres métalliques: Du matériau à la structure (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).
- [5] Expert de la performance énergétique (2020) « Propagation du bruit » consulté sur « https://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/acoustique-aeraulique/propagation-du-bruit.htm » le 10/05/2020
- [6] Horsin M (2017) « Conception acoustique d'une salle – Intérêt du prototypage et principe de conception de maquette » consulté à l'adresse « <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/8440/8440-conception-acoustique-dune-salle-interet-du-prototypage-et-principes-de-conception-de-maquette.pdf> » le 4/02/2020