



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 2 Acoustique du bâtiment

Enseignant : Dr MEZERDI Toufik

Cour N°2: La genèse de l'acoustique



Cour N° 02

La genèse de l'acoustique



Cour N° 02

Plan du cour

1. Quelques points de l'histoire
2. l'acoustique du théâtre antique
 - 2.1 Origine
 - 2.2 Description
 - 2.3 Qualités acoustiques
 - 2.3.1 Le modèle circulaire
 - 2.3.2 Disposition des gradins
 - 2.3.3 Les masques antiques
3. Les vases acoustiques (**Les églises médiévales**)
 - 3.1 Disposition ,forme , et rôle
4. **Les vases acoustiques (Les mosquées Ottomanes)**

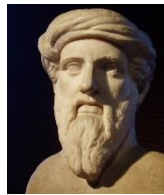


La genèse de l'acoustique



1. Quelques points de l'histoire

Pythagore (550 av. JC)

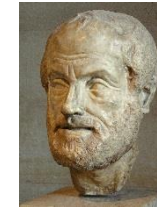


Pythagore réalise les premières expériences sur des cordes vibrantes, il montre qu'il existe un lien entre la longueur de la corde, sa tensions et la note qu'elle produit. Il détermine des valeurs pour les intervalles entre les notes de musique.



Fig 01: Pythagore « theorica musicae » de F Gaffurrio 1492
Source: <https://www.resmusica.com/2018/08/13/pythagore-ou-les-origines-de-la-gamme/pythagore-color-1/>

Aristote (384-322 av. JC)



Emette l'hypothèse que le son est une onde provenant du mouvement d'un corps et transmise par un mouvement de l'air. Cette hypothèse provient de l'observation des vagues : une onde est une variation "oscillante" d'un milieu qui part d'une source et est transmise tout le long d'une distance de propagation

Fig 02: propagation onde mécanique
Source: <https://ma-credence-deco.com/zen/1-144-goutte-d-eau-2.html>



Sénèque (2-66)



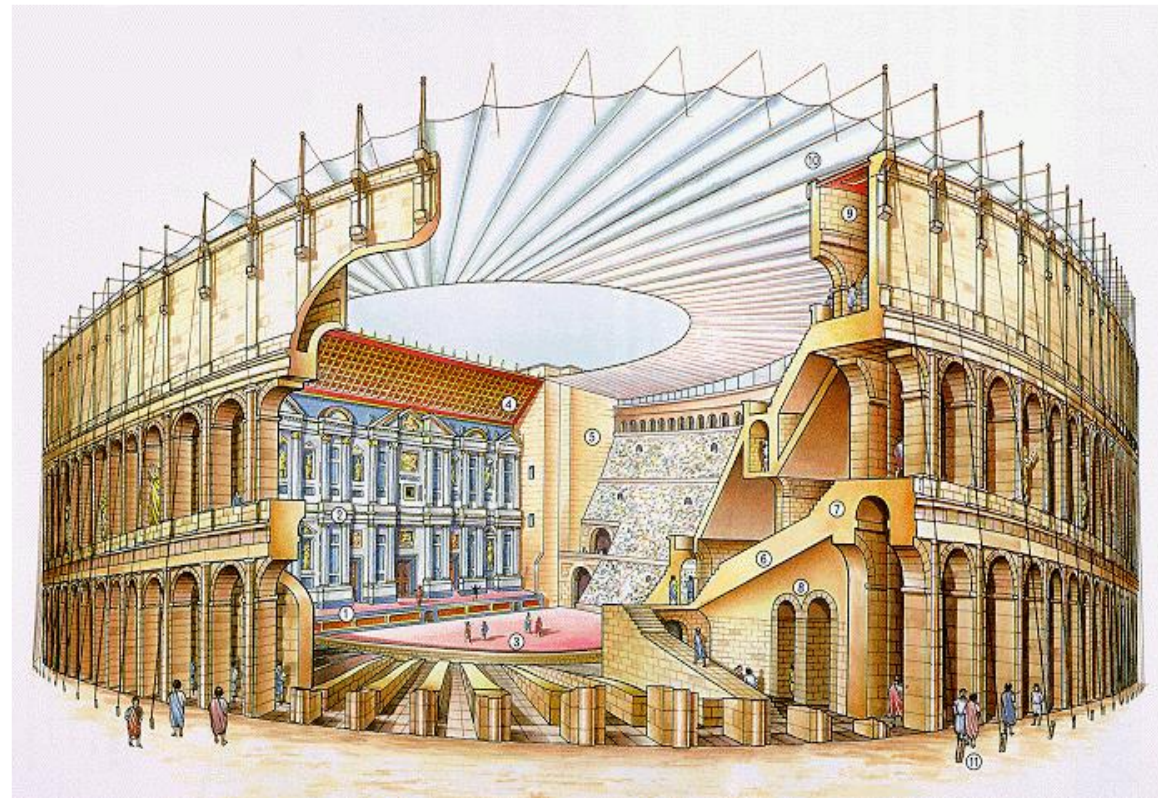
L'élasticité de l'air permet aux sons de se produire et de se propager



La genèse de l'acoustique



Ces divers travaux permettent aux Grecs puis aux Romains de dégager les bases de l'acoustique architecturale, qu'ils appliquent à la construction de leurs *théâtres et amphithéâtres*. Se fondant sur l'expérience, ils établissent plusieurs principes élémentaires comme *l'édification de parois de protection contre les bruits extérieurs, la construction de murs derrière la scène, afin de favoriser la réflexion des sons proférés par les acteurs, ou encore la disposition des gradins en forme d'hémicycle*.



1. Scène et acteurs
2. Mur de scène
3. Acteurs jouant dans l'orchestre
4. Auvent
5. Vestiaires et magasins
6. Rampe
7. Escaliers
8. Voûtes
9. Galerie
10. Toile protégeant du soleil et de la pluie
11. Cordes de tension

Fig 03: architecture du théâtre Romain (Source : [https://sites.google.com/site/brunoboddaert/theromandrama\(architecture,scenery,machi?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1\)](https://sites.google.com/site/brunoboddaert/theromandrama(architecture,scenery,machi?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1)))



2. l'acoustique des théâtres antiques

2.1 origine

Le Théâtre antique nous vient de Grèce, berceau de tout le théâtre occidental. Il est né à l'époque archaïque, aux VIème et Vème siècle avant J-C, lors des célébrations consacrées à Dionysos, Dieu du vin, des arts et de la fête. Il provient donc, à l'origine, des dithyrambes, ces hymnes religieux dédiés aux Dieux ou aux héros, faits de processions, de chants et de danses. Ces cérémonies sacrées prennent place à la base aux alentours des temples puis dans des édifices en plein air où les spectateurs se pressent sur des gradins de pierre pour assister à des représentations interprétées uniquement par des hommes portant masques et costumes. Ainsi, le mot « théâtre » vient du grec « theatron » qui signifie « le lieu où l'on regarde ». Il qualifie donc, avant de devenir un art à part entière ainsi qu'un genre littéraire, l'espace de la scène.[1]

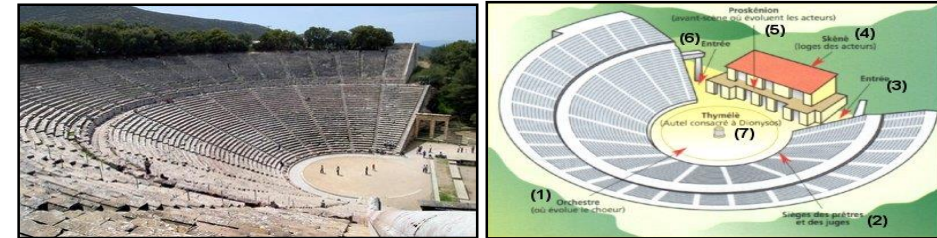


Fig 04: Théâtre d'Épidaure (Grèce), Source: https://fr.wikidia.org/wiki/Th%C3%A9%C3%A2tre_d%27%C3%89pidaure

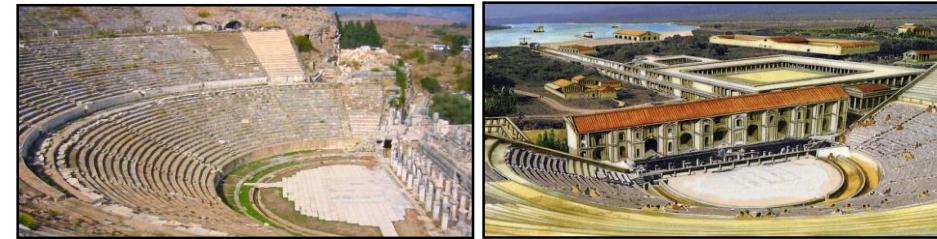


Fig 05:Théâtre d'Éphèse (Turquie) Source: <https://voyages.michelin.fr/proche-et-moyen-orient/turquie/izmir/selcuk/theatre-dephese>.



Fig 06: théâtre antique d'Orange (France) Source: <https://www .easyvoyage.com/france/le-theatre-antique-d-orange-8132>



2.1 Description

Le théâtre antique est un théâtre de plein air car les représentations y sont données en plein jour et non le soir , Le public s'installait sur les gradins qu'on appelle cavea dans la Rome antique et theatron en Grèce antique. Ce mot a donné notre mot « théâtre » et signifie « lieu d'où l'on regarde ». L'espace demi-circulaire que l'on voit au pied des gradins s'appelle l'orchestra. Orchestra a donné notre mot « orchestre ». Dans la Rome antique, l'orchestra était occupé par des spectateurs importants, les sénateurs par exemple. Les acteurs jouaient sur la scène, la partie surélevée située contre le mur du fond. Sur le mur de fond de scène étaient fixés les décors. Un toit en bois protégeait la scène. **Le mur de scène** avait une importance considérable puisqu'il contribuait à la **bonne diffusion du son** et constituait le seul décor architectural du théâtre[2].

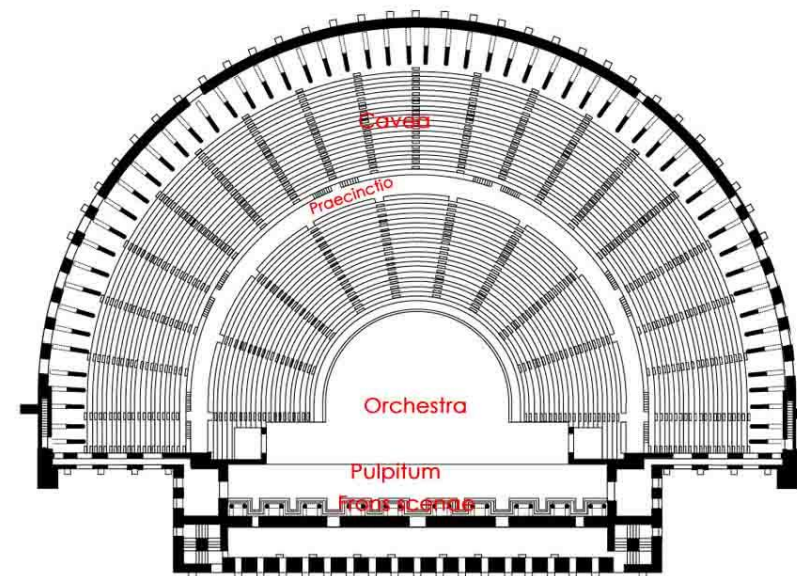


Fig 07: Plan du théâtre romain à Aspendos Aspendos, Belkiz ou moderne, la Turquie. Après Wilhelm Dörpfeld (Source: <https://www.alamyimages.fr/photo-image-plan-du-theatre-romain-a-aspandos-aspandos-belkiz-ou-moderne-la-turquie-apres-wilhelm-dorpfeld-75339986.html>)

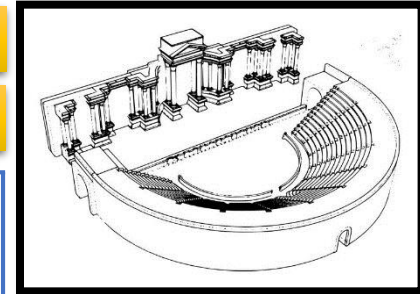


3.1 Qualités acoustiques

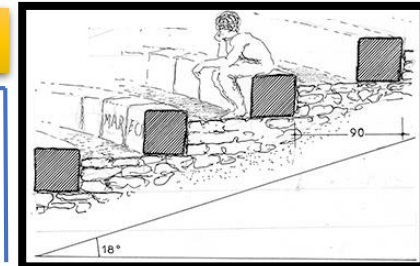
En prêtant l'oreille en haut des gradins, il est étonnant d'observer avec quelle clarté les sons nous parviennent. Dès l'origine, les architectes grecs, puis romains, construisent des théâtres possédant de grandes qualités acoustiques. Selon Vitruve, le célèbre architecte romain du 1er siècle avant J.C., pour obtenir une bonne acoustique, il faut tout d'abord choisir un site où « la voix prend régulièrement appui, sans être repoussée ». Ensuite, la construction doit respecter quelques grands principes techniques de diffusion du son : la pente des gradins devant être constante, l'égalité de la hauteur du portique et du mur de scène ou la présence de vases en bronze dont l'embouchure est tournée vers la scène. Tous ces éléments permettaient d'amplifier la résonance des voix.

Le modèle circulaire

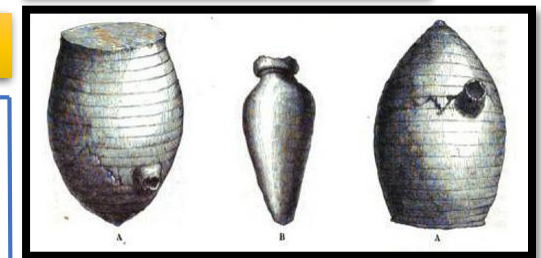
Mur de scène



la pente des gradins



Les vases de Vitruve





3.1.1 le modèle circulaire

Pour les grecs et les romains, le théâtre est un lieu public de première importance, Ce sont des lieux prévus seulement pour une assistance massive. Leur forme répond d'abord à la nécessité de faire voir une scène aux dimensions réduites par des milliers de spectateurs (« seulement » 5000 à Priène , mais jusqu'à 25 000 à Ephèse [3] C'est cela qui définit le modèle circulaire et son acoustique originale, avec ses avantages et ses limitations.

ce qui se voit bien s'entend bien : en libérant les visuelles, on dégage aussi le son direct

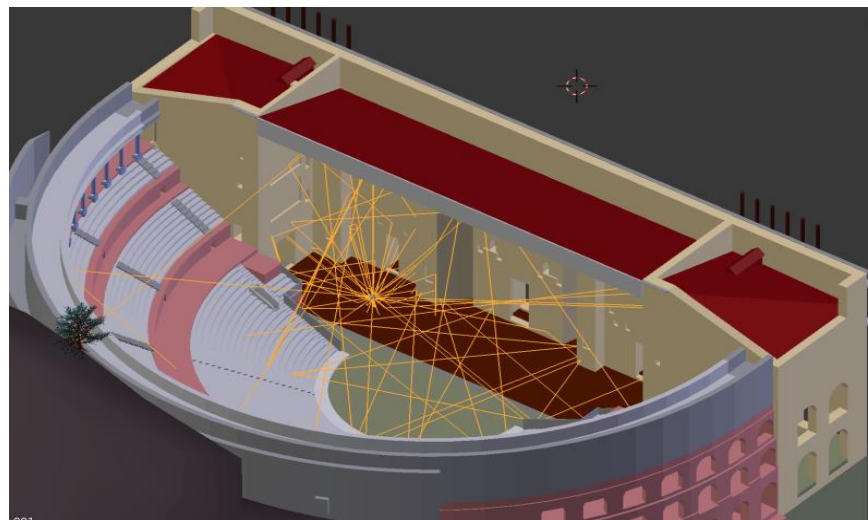


Fig 08: Visualisation d'un résultat de ray-tracing dans le théâtre antique d'Orange
Source: <http://www.cmap.polytechnique.fr/xaudio/acoustique.html>

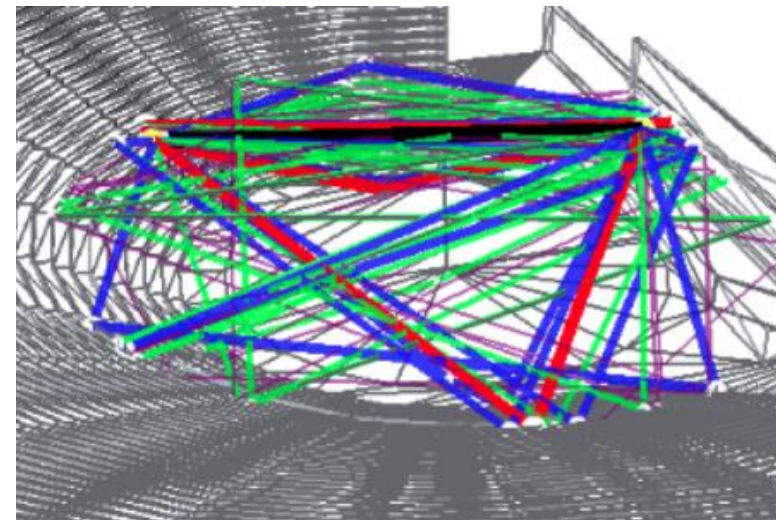


Fig 09: Réflexions spéculaires de la source Source: Lokki, 2013



3.1.2 Disposition des gradins mur de scène

Au départ, il y a donc l'idée que ce qui se voit bien s'entend bien : en libérant les visuelles, on dégage aussi le son direct. Pour ce double objectif, il faut des **gradins très inclinés** et, mieux encore, il convient que l'inclinaison augmente avec la distance à la scène. Dans les plus grands théâtres, le **koilon** est divisé en deux zones concentriques (voire trois), par un passage circulaire (la **diazoma**) au-delà duquel l'inclinaison peut être renforcée.

« Pour Nico Declercq et Cindy Dekeyser, du Georgia Institute of Technology, à Atlanta (USA), la qualité acoustique du théâtre d'Épidaure (Grèce, semblable à celui d'Orange, NdP) serait liée à la disposition de ses rangées de sièges.

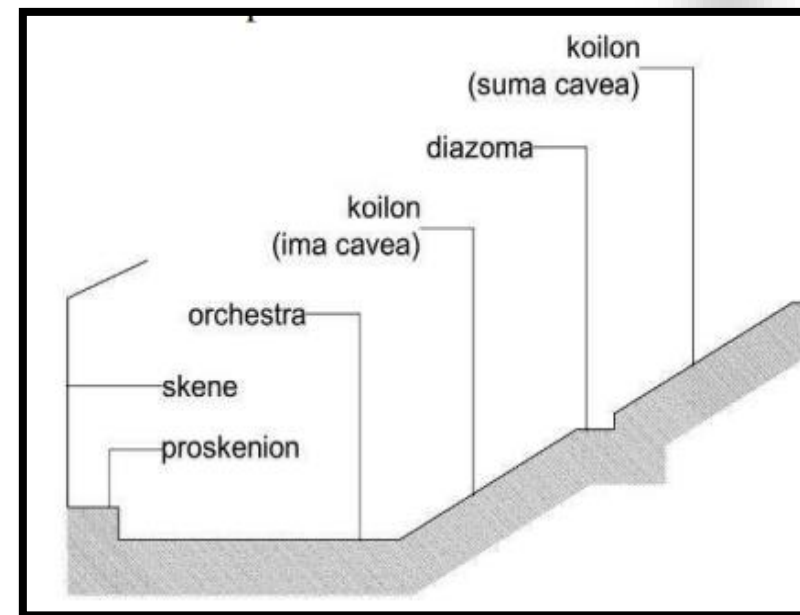


Fig 10: Coupe longitudinale du théâtre, avec une diazoma partageant les gradins (Source: Beckers ,2007)

D'après leurs calculs, la succession périodique des marches du théâtre serait géométriquement optimisée pour filtrer les basses fréquences, composante principale du bruit de fond qui masque généralement le son perçu loin de la scène, tout en préservant les hautes fréquences provenant de la voix des acteurs. L'agencement particulier des gradins permettrait ainsi d'atténuer les fréquences inférieures à 500 Hz au profit des fréquences plus élevées [4]



La genèse de l'acoustique



l'inclinaison γ est toujours relevée une fois, comme à Orange (27° avant la diazoma et 31° après) ou à Aspendos (33° et 36°) et parfois deux (comme à Éphèse : 25° , 28° et 30°). En revanche, le **proskenion** est rabaissé (sa hauteur n'est plus que de 2 mètres à Orange, 2.5 mètres à Aspendos et 2.1 mètres à Ephèse).

les angles d'incidence sont bien meilleurs, pour le son direct évidemment, mais surtout pour le son réfléchi sur l'orchestra (ils dépassent alors 6° et 8° , respectivement, pour les derniers rangs d'Orange et d'Aspendos). Même à Ephèse, où les inclinaisons des gradins sont plus modérées, l'angle d'incidence de la réflexion sur l'orchestra reste largement supérieur à 4° (donc à ce qu'on trouve à Epidaure), grâce aux deux diazomas, qui le remontent brusquement chaque fois qu'il devient trop faible [5].

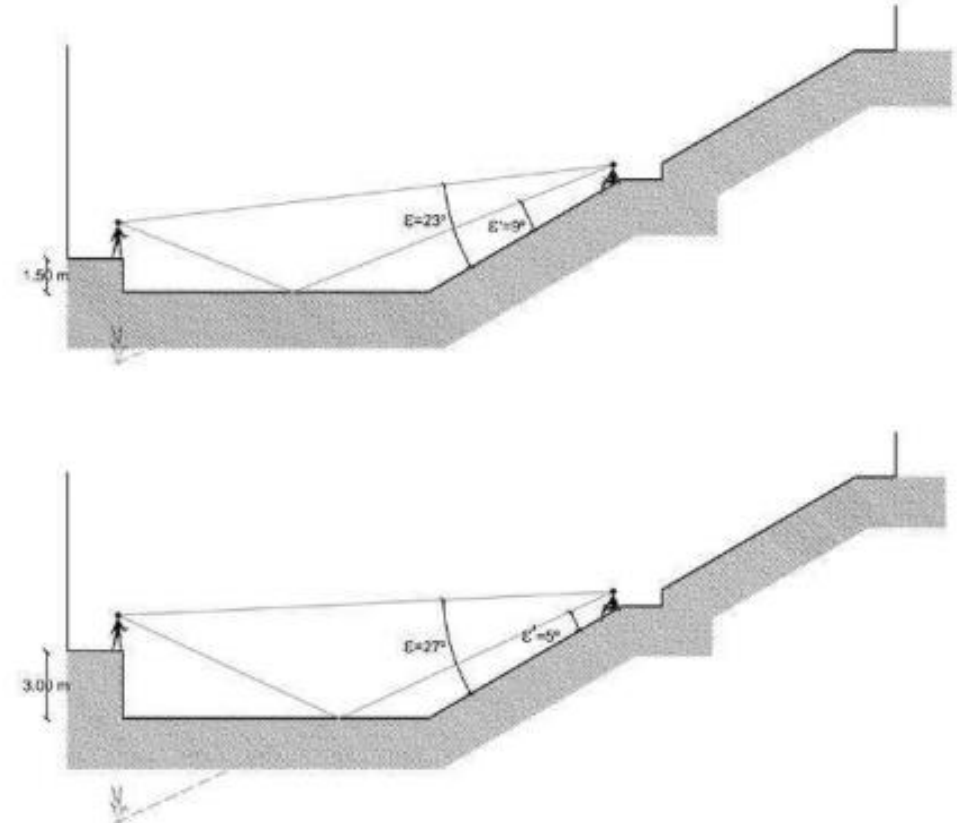


Fig. 11 : Si l'on hausse le proskenion, l'angle ϵ d'incidence du son direct au spectateur croît, mais l'angle ϵ' d'incidence du son réfléchi décroît. ((Source: Beckers ,2007)



La genèse de l'acoustique



Le second renfort est offert par la surface réfléchissante de l'orchestra, qui semble constituer l'idée la plus originale du théâtre grec : éloigner un peu le public de la scène, pour lui offrir une seconde réflexion

Dans le théâtre de Priène, on vérifie ainsi qu'un spectateur situé au premier rang bénéficie déjà d'un niveau sonore réfléchi ($L_{pr} = 66.8$ dB) supérieur au niveau direct ($L_{pd} = 65$ dB), même en ne considérant que les premières réflexions sur l'orchestra et le mur de scène (ces deux surfaces sont supposées parfaitement réfléchissantes). Il en sera toujours ainsi dans les théâtres antiques, du moment que le spectateur reçoive au moins deux réflexions [6]

la scène du théâtre grec est étroite : Cela permet une réflexion peu retardée sur le mur de scène, qui renforce le niveau sonore sans nuire à la clarté du discours.

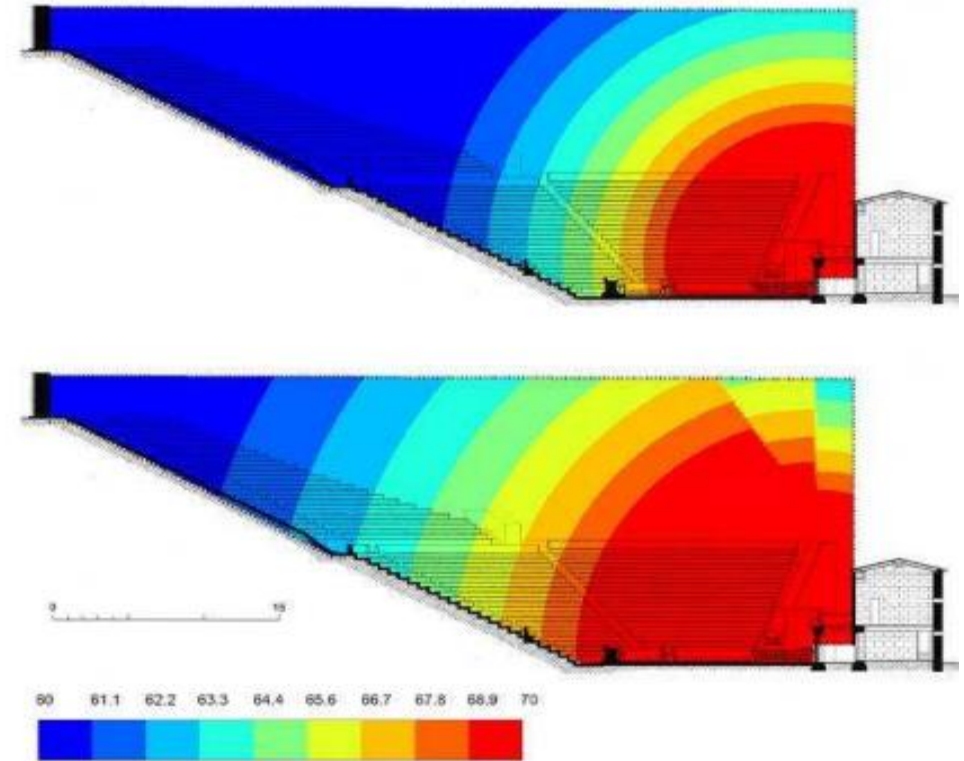


Fig. 12 : le son direct seul (en haut), puis ajouté aux réflexions sur l'orchestra et sur la skene (en bas) ; carte du programme en transparence sur une coupe du théâtre de Priène (Source: Houtopoulos,200)



La genèse de l'acoustique



Influence du mur de la skéné.

Le mur de la skéné permet d'avoir un minimum de réverbération par réflexion des ondes sonores sur le mur ce qui donne une sensation de volume au son. Pour limiter cette réverbération afin de ne pas avoir d'écho, il faut limiter l'énergie sonore des ondes réfléchit par le mur. Les niches et les colonnes qui ornent la skéné, jouent ce rôle. Leur but est de diffuser les ondes reçu pour contrôler la réverbération et limiter l'écho.

Pour que le texte soit compréhensible, il faut la réflexion des ondes par le mur ne produisent pas un retard de plus de 1/25 seconde entre le début de la proclamation d'une consonne et l'arrivée de son echo. Pour cela il faut la distance minimum entre l'orateur et le mur soit de 6,7m au maximum.

L'écho arrive avant la fin de l'émission

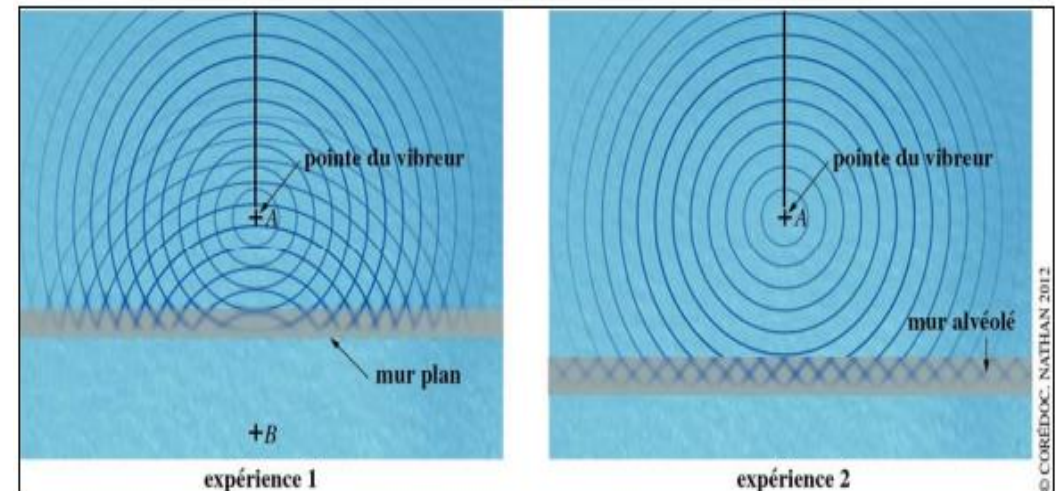
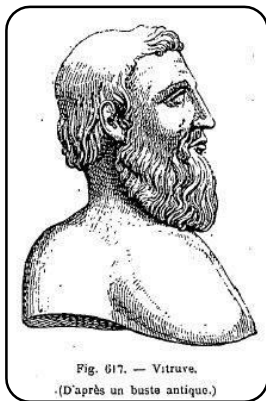


Fig 13: Modélisation de la rencontre des ondes sonores avec un mur : a) plan b) obstacle alvéolé sur le mur (Source: http://www.ac-grenoble.fr/disciplines/spc/file/ressources/Resolution_probleme/2014_TS_Spe_Son_et_musique_Acoustique_theatre_Epidaure.pdf)



Les vases acoustiques (Vitruve)



Les vases (*echea*) étaient destinés à faciliter la **transmission de la voix des acteurs**. Ils étaient placés dans des cellules pratiquées sous les degrés servant de sièges aux spectateurs en face de la scène, et disposés, isolés les uns des autres, dans une position inclinée, sur des coins formant trépied, de

manière que tout son partant de la scène venait toujours frapper le fond de chaque vase et se trouvait puissamment répercuté. Ces vases étaient en airain, selon **Vitruve** ou bien en terre cuite. Chez les grecs, selon Vitruve « les différents sons qu'ils rendaient, étaient réglés selon les lois de la symphonie ou accord musical, répondant, dans leurs divisions exactes, à la quarte, à la quinte et à l'octave [7,8,9,10]

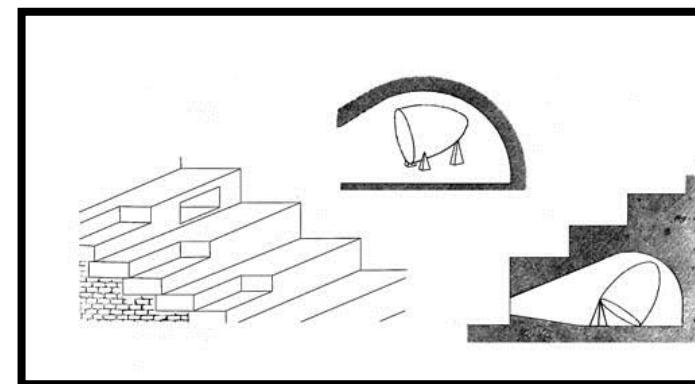
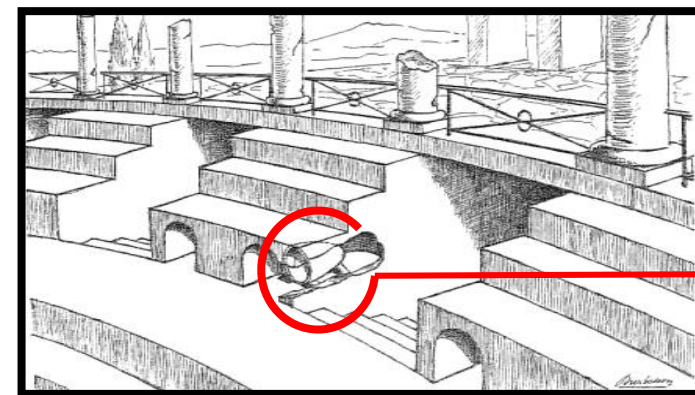


fig. 14 - reconstitution du dispositif des echea selon r. floriot (floriot 1964) à partir de la traduction de ch. maufra (vitruve 1847, p. 346)



Les masques antiques

Les masques antiques de scène étaient d'autres artifices acoustiques utilisés non seulement comme éléments des costumes, mais aussi comme amplificateurs sonores <https://studylibfr.com/doc/1933855/cours-d-acoustique-architecturale--cnam-paris->

L'utilisation des masques des acteurs comme porte-voix à souvent été évoquée, mais jamais démontrée [11]. Izenour G., "Theater Design", Yale University Press, New York, 1977.



Fig15 :Différents masques antique (Source: <https://www.pinterest.de/pin/834291899690605479/>)



Les vases acoustiques (Les églises médiévales)

Du XII^e siècle au XIII^e siècle, certaines églises furent dotées de pots encastrés dans les murs ou dans les voûtes. La plupart de ces «vases acoustiques » se trouvent dans des églises gothiques et romanes [12]. l'usage de ces poteries architecturales, souvent méconnu, a été parfois mal interprété. Il s'agit en fait de dispositifs de correction acoustiques destinés à améliorer la perception de la voix parlée et chantée [13]



Fig 16: l'église Saint-Pierre XII^e siècle Source : <https://www.forez-info.com/encyclopedie/memoire-et-patrimoine/1310-pommiers-en-forez.html>

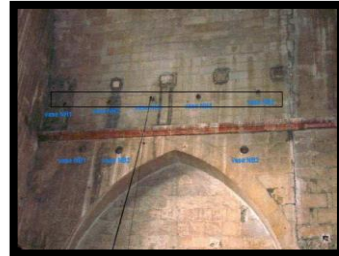


La genèse de l'acoustique



Disposition des vases

disposées en ligne



l'église Saint-Blaise

organisées en triangle



EGLISE DE SAINT-HERLÉ

organisées en carré



Cathédrale de Maguelone

Forme des vases

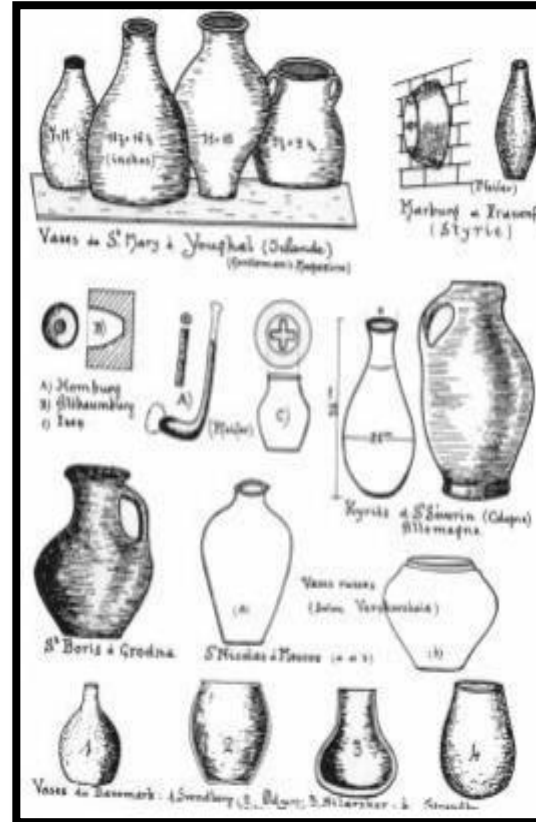


Fig 17: Diverses formes de vases acoustiques
Source : Loerincik, Y. 2001

Rôle des vases

Les architectes du Moyen Age ont placé parfois à l'intérieur des édifices religieux, dans les parements de murs, des pots acoustiques de terre cuite, probablement pour augmenter la sonorité des vaisseaux ». [14]

On sait aujourd'hui de façon sûre que ces dispositifs améliorent l'acoustique d'une salle et surtout l'intelligibilité de la parole. [15]

Quelques scientifiques se sont penchés sur le fonctionnement et l'efficacité des vases acoustiques. Ces récents travaux scientifiques de Floriot [16], Fontaine et Loerincik [17] montrent, par diverses expériences et formulations théoriques, que les pots acoustiques peuvent amplifier localement le son à certaines fréquences [18]



Les vases acoustiques (Les mosquées Ottomanes)



Mimar Sinan

l'architecte Sinan a développer les propriétés acoustiques qui permettent l'accès du son dans tous les coins.. IL a présenté une gamme de solutions innovantes à, tout d'abord par la diversification des dimensions et la mesure des dômes pour s'adapter à la taille des ondes et aux fréquences sonores [19]

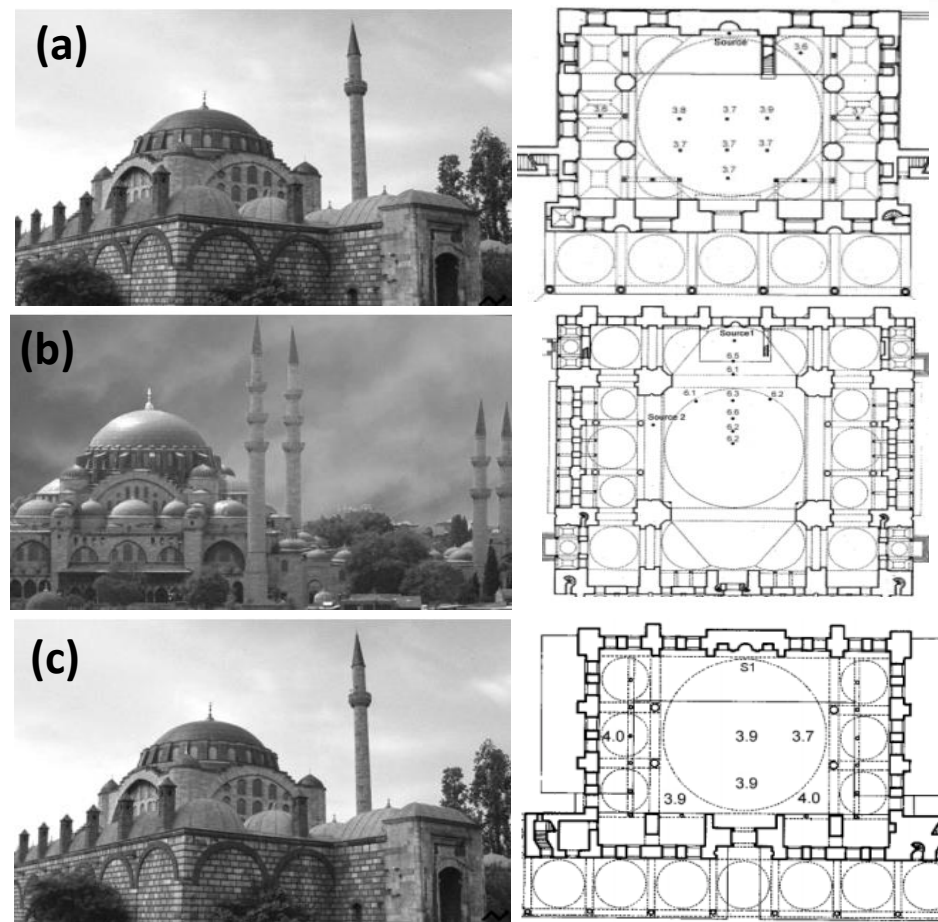


Fig 18: a) La mosquée de Rüstem Pacha (Istanbul), B) La mosquée Selimiye ou Selim (Edirne), c) Mosquée de Mihrimah Sultan. (Source:Topaktas, L (2003).



La genèse de l'acoustique



La forme en dôme est l'une des formes les plus difficiles en acoustique. A cause des formes concaves des dômes, l'énergie sonore incidente ne sort pas sans se refléter plusieurs fois dans le dôme. De ce fait, l'énergie sonore réfléchiée par le dôme est renvoyée dans la pièce avec un retard. Il en résulte des échos ou du bruit dans la salle et une réduction du pourcentage d'intelligibilité.

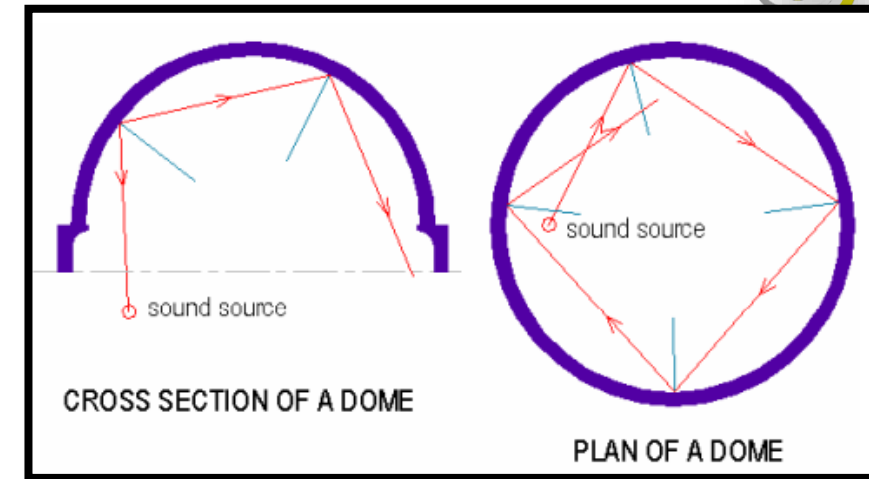


Fig 19: Comportement de l'énergie sonore dans un dôme (Source: Kayili, M. (2005))

Et pour améliorer la force de la réflexion du son, l'architecte Sinan a utilisé les résonateurs acoustiques, une pierre plantée dans le dôme principal. Le Dr Kayili souligne: "*Les résonateurs à cavité placés dans un dôme, empêchent la réflexion de l'énergie sonore et remettent-la dans toute la pièce.* En rediffusant l'énergie incidente dans toutes les directions, la pièce devient un champ sonore diffus et le danger des échos dus aux réflexions retardées du dôme est éliminé." [20]

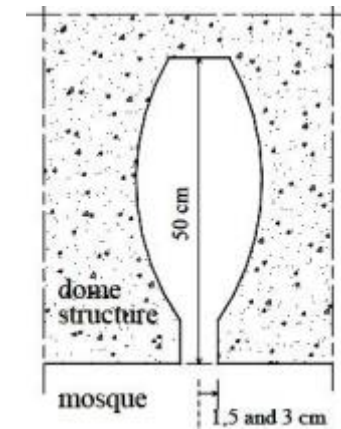


Fig 20: Cross section of the resonators found in the dome of the Sultan Ahmet Mosque dôme (Source: Kayili, M. (2005))



La genèse de l'acoustique



Les mesures actuelles montrent que la mosquée Suleymaniye temps de réverbération aux fréquences moyennes d'environ 6 à 7 secondes [21]. Cette valeur peut être longue pour les salles de conversation, mais elle est considérée comme tout à fait raisonnable pour Suleymaniye. Mais, cette valeur pourrait être mesurée plus bas qu'aujourd'hui lors de la construction de la mosquée. Au cours des études de restauration au fil des ans, obturant les ouvertures de céramique conteneurs et le changement du matériau d'origine ont résulté différentes conditions [22] acoustiques de l'original.

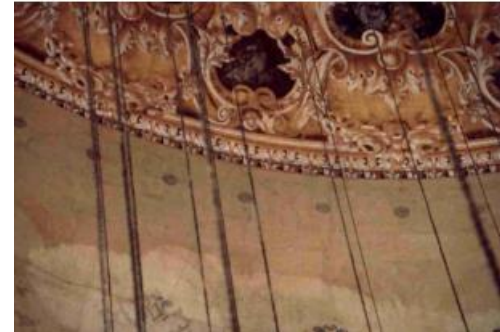


Fig 21: Résonateur du dôme de la mosquée Suleymaniye (Source: Kayili, M. (2005))



Fig 22: Résonateur du dôme de la mosquée Sultan Ahmed (Source: Kayili, M. (2005))

Mosquée	Volume m ³	RT s
Cenabi Ahmed	2900	3,6
Sulemaniye	85300	7,3
Rustem Pasa	5950	4,2
Mihrimah Sultan	13600	4,5

mosques (source: Topaktas, L. 2003)



Références

- [3] Bieber, M. (1962). The history of the Greek and Roman theater.
- [4] Beckers, B., & Borgia, N. (2007). The acoustic model of the Greek theatre.
- [5] De Bernardi Ferrero D., "Teatri classici in Asia Minore vol. 3", L'erma di Bretschneider, Roma, 1970.
- [6] Y.G. Houtopoulos, "Priene", Foundation of the Hellenic World, Athènes, 2000.
- [7] Palazzo-Bertholon, B., & Valière, J. C. (2012). *Archéologie du son. Les dispositifs de pots acoustiques dans les édifices anciens*.
- [8] Floriot, R. (1964). *Contribution à l'étude des vases acoustiques du Moyen Âge...* Gap.-Imp. Louis-Jean.
- [9] Germann, G. (1991). *Vitruve et le vitruvianisme: introduction à l'histoire de la théorie architecturale*. PPUR presses polytechniques.
- [10] Caumont, A. (1835). *Cours d'antiquités monumentales professé à Caen, en 1830* (Vol. 5). Lange.
- [11] Izenour, G. C., & Izenour, G. C. (1996). *Theater technology*. Yale University Press.
- [12] Desarnaulds, V., & Loerincik, Y. (2001). Vases acoustiques dans les églises du Moyen Age. *Mittelalter. Zeitschrift des Schweizerischen Burgenvereins*, 6, 65-72.
- [13]. Palazzo-Bertholon, B., & Valière, J. C. (2012). *Archéologie du son. Les dispositifs de pots acoustiques dans les édifices anciens*.
- [14] Viollet-le-Duc, M. (1869). art. Pot. in *Dictionnaire raisonné de l'architecture*. Vol 7, pp.471. Morel, Paris
- [15] Thfoin, C. (1980). La parole, la musique et le chant dans l'architecture au XIXème siècle. Les rapports entre Viollet le Duc et l'acoustique architecturale. *Colloque international Viollet Le Duc 1980*, Paris, pp. 100-113.
- [16] Floriot, R. (1964). *Contribution à l'étude des vases acoustiques du Moyen Âge...* Gap.-Imp. Louis-Jean.
- [17] Loerincik, Y. (2001). Etude sur les vases acoustiques. Thèse in Département de Physique EPFL, Lausanne, 107 p.
- [18] Desarnaulds, V., & Loerincik, Y. (2001). Vases acoustiques dans les églises du Moyen Age. *Mittelalter. Zeitschrift des Schweizerischen Burgenvereins*, 6, 65-72.
- [19] Topaktas, L. (2003). *Acoustical Properties of Classical Ottoman Mosques Simulation and Measurements*, PhD Thesis, Middle East Technical University; Ankara
- [20] Kayili, M. (2005). *Acoustic solutions in classic ottoman architecture*. Manchester: Aasiya Alla FSTC Limited.
- [21] Fausti, P., Pompoli, R., & Prodi, N. (2003, September). Comparing the acoustics of mosques and Byzantine churches. In *19th International Symposium CIPA*.
- [22] Aktuglu, Y. K., Altin, M., Tanac Kiray, M., Yilmaz Karaman, O., Secer, M., Bozdog, O., & Kahraman, I. (2007). Sustainability of Constructions. Suleyman's Mosque, Istanbul. *Proc. Portugal SB07 Sustainable Construction, materials and Practices, Challenge of the Industry for the New Millennium. Part, 2*, 1110-1117.
- Lokki, T., Southern, A., Siltanen, S., & Savioja, L. (2013). Acoustics of Epidauros—studies with room acoustics modelling methods. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(1), 40-47.



La genèse de l'acoustique



<https://ma-credence-deco.com/zen/1144-goutte-d-eau-2.html>

<http://tpe-les-ondes-sonores.e-monsite.com/pages/son-et-histoire.html>

[https://sites.google.com/site/brunoboddaert/theromandrama\(architecture,scenery,machi?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1](https://sites.google.com/site/brunoboddaert/theromandrama(architecture,scenery,machi?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1)

<http://www.pariscope.fr/base/le-theatre-et-ses-genres-/les-origines-du-theatre-le-theatre-antique>

<https://www.resmusica.com/2018/08/13/pythagore-ou-les-origines-de-la-gamme/pythagore-color-1/>

https://fr.wikidia.org/wiki/Th%C3%A9%C3%A2tre_d%27%C3%89pidaure

<https://voyages.michelin.fr/proche-et-moyen-orient/turquie/izmir/selcuk/theatre-dephese>

<https://www.easyvoyage.com/france/le-theatre-antique-d-orange-8132>

<http://data0.eklablog.fr/bricolesdecole/perso/dictees/dictees/the--a--tre%20d-orange%20.pdf>

<http://data0.eklablog.fr/bricolesdecole/perso/dictees/dictees/the--a--tre%20d-orange%20.pdf>

<http://www.cmap.polytechnique.fr/xaudio/acoustique.html>

http://www.ac-grenoble.fr/disciplines/spc/file/ressources/Resolution_probleme/2014_TS_Spe_Son_et_musique_Acoustique_theatre_Epidaure.pdf