

Analyse théorique de l'acoustique des églises des trois sœurs de Provence*

Claude Vernhes,
28, rue des Cerisiers,
92700 Colombes

Cet exposé discursif apporte le point de vue de l'ingénieur sur l'acoustique des édifices religieux construits au XII^e siècle.

** J'aimerais remercier Frère Jean-Baptiste, les moines de Sénanque et Dr. Terry N. Kinder pour leur aide et leurs conseils, ainsi que Marie-Hélène Degroise, Benoit Chauvin, Jean-François Leroux-Dhuys, Henri Bilheust, Jean Preux, Dom Romain Clair et Père André Gouzes pour les informations et commentaires pertinents apportés lors de l'élaboration de cet article.*



I s'agit d'une analyse¹ dont le point de départ fut la recherche de l'explication architecturale d'un phénomène acoustique observé dans la nef grandmontaine de Saint-Jean-des-Bonshommes dont m'avait fait part le docteur Campagnac+, alors président de la société d'études d'Avallon. M'ayant demandé de me placer dans le chœur de l'église, il murmura face au pignon ouest cet apophtegme que j'entendis distinctement à plus de vingt mètres: «Connais-tu ami ce nombre béni des dieux, c'est pi», dont j'ai gardé le souvenir car il évoquait les grecs anciens, grands précurseurs de l'acoustique architecturale. La nef de Saint-Jean d'environ dix mètres de haut et six mètres de large, dépourvue de fenêtre, est couverte en berceau brisé reposant sur le mur d'appui dont la hauteur est de six mètres jusqu'au bandeau ; elle est représentative des nefs des églises grandmontaines.

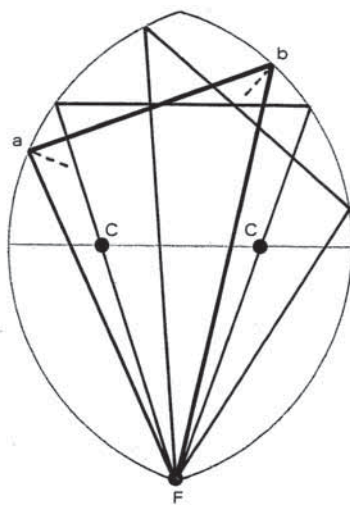


Fig. 1 : L'examen graphique de la voûte aboutit à une figure géométrique dans laquelle le sommet de la voûte et le foyer phonique sont situés à l'intersection de deux cercles dont la particularité réside dans l'écartement de leurs centres qui avec le rayon commun des cercles, sont entre eux dans le rapport du nombre d'or.

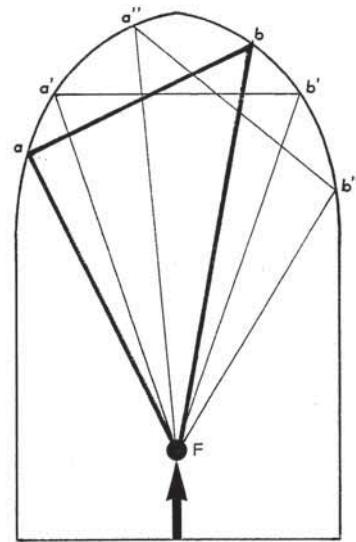


Fig. 2 : Les trajectoires sonores de type FabF ont la même longueur quels que soient les endroits de la voûte où s'effectuent les réflexions: l'ensemble des sons reçus est cohérent.

M'attendant à cette énigme je procédai à un examen graphique du plan de section droite de l'église en considérant la voûte comme un miroir², ce qu'évoquait le bel appareillage de sa construction, examen qui me suggéra l'existence d'un foyer phonique permettant à cet endroit de recevoir sans déformation un son émis, différé après deux réflexions dans la voûte (figure 1).

Ce foyer situé à l'intérieur de la nef à deux mètres du sol était l'image du sommet de la voûte ; il présentait la particularité de pouvoir renvoyer à l'oreille d'une personne debout à cet endroit, le son qu'elle venait d'émettre moins d'un dixième de seconde avant (figure 2).

En effet, les trajectoires qui participaient à ce foyer ayant toutes la même longueur, les sons reçus en retour n'étaient pas déformés quel que soit le timbre¹ dans un large registre¹; leur intensité était significative puisque la totalité de la voûte contribuait à ce phénomène et ceci deux fois car le cheminement du son sur ces trajectoires s'effectuait dans les deux sens.

Une analyse mathématique me permit de préciser l'allure théorique que devait avoir cette voûte pour engendrer le foyer, sous la forme d'une condition imposée à l'écartement des centres des arcs de cercles composant la voûte³, condition faisant appel au nombre d'or⁴, et de définir toutes les grandeurs caractérisant cette voûte acoustique⁵. Je remarquai que ces grandeurs dépendaient uniquement de la largeur de la nef et pouvaient par conséquent être mises en œuvre sans difficulté avec les moyens de mesure utilisés localement par les maîtres d'ouvrage. La poursuite de cette investigation a montré que cette singularité s'étendait à l'ensemble de la nef sous la forme d'un axe focal phonique parcourant toute sa longueur (figure 3), et qu'un son émis sur cet axe focal se propageait sur l'axe grâce à deux réflexions dans la voûte : c'est ainsi que deux interlocuteurs pouvaient communiquer d'une manière cohérente par la simple réverbération dans la voûte qui se comportait en conduit acoustique.

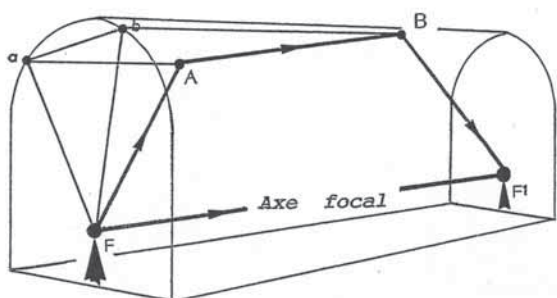


Fig. 3 : Les trajectoires de type FABF1 des voix réverbérées dans la voûte de deux interlocuteurs F et F1 situés sur l'axe focal ont toutes la même longueur. Les voix sont cohérentes et différées vis à vis de la transmission directe d'une même durée quelles que soient les positions des interlocuteurs sur l'axe focal.

L'acoustique d'une salle n'est pas d'appréhension immédiate ; elle ne peut s'improviser. Dans le registre des notes graves, elle nécessite la connaissance de la géométrie qui figurait en bonne place parmi les Arts Libéraux hérités de l'antiquité. La géométrie s'appuyait sur les éléments et les données d'Euclide. Le dictionnaire Larousse du XIXe siècle, à la rubrique de la géométrie et à la biographie de Maurice Chasles, éminent géomètre du siècle dernier, nous indique que les éléments d'Euclide se sont imposés presque jusqu'à nos jours comme guide obligatoire dans les écoles par l'ordre qui y règne et la clarté des démonstrations, et les propositions des données étaient toujours citées par les géomètres anciens et ceux du Moyen Âge dans leurs recherches; Newton lui-même en fit usage.

Je constatai ensuite en examinant la section droite de la nef de Notre-Dame de Paris dressée par Viollet le Duc⁶, que la voûte comptée depuis l'astragale, avait une configuration similaire à celle que je venais d'étudier ce qui impliquait pour les voûtains longitudinaux de cette voûte, l'existence d'un axe focal phonique placé judicieusement au niveau des orgues qui jouait alors le rôle d'un haut-parleur virtuel recueillant les ondes sonores réfléchies dans la voûte, les diffusait vers le sol à 16,5 mètres de hauteur et prolongeait ainsi, dans la nef et le premier collatéral, l'audition directe de l'instrument d'une sonorité¹ supplémentaire.

L'hypothèse selon laquelle les voûtains longitudinaux des croisées sexpartites de la nef assurent une fonction acoustique paraît vraisemblable, les croisées pouvant être géométriquement assimilées à l'intersection de voûtes en berceau brisé.

La voûte acoustique en berceau brisé ayant son axe focal phonique situé à l'intérieur de la nef, constituait un progrès par rapport à la voûte en plein cintre dont l'axe focal passe par le centre du demi-cercle de section droite et se situe au niveau de l'appui de la voûte sur le mur.

Cette disposition présentait en effet l'avantage de canaliser la totalité des trajectoires réverbérées vers le sol de l'église en minimisant l'importance des réflexions aléatoires sur les murs. Une position de l'axe focal plus élevée du fait de la hauteur de l'église, facilite l'épanouissement au sol de la réverbération sur une plus grande étendue (figure 4 page suivante).

Le concept d'axe focal accompagnant la voûte acoustique en berceau brisé, semblant avoir été exploité suivant la destination de l'église, je m'interrogeai sur le bénéfice qu'en avaient éventuellement pu tirer les cisterciens dont la technicité est reconnue, pour satisfaire le « parti pris de l'ouïe » de Saint Bernard⁷, et j'entrepris de poursuivre l'investigation théorique de l'acoustique dans les églises des trois sœurs de Provence. Ce choix trouvait sa motivation dans les caractéristiques des voûtes en berceau brisé qui, comme celles des églises grandmontaines, m'ont paru entièrement réservées à la fonction acoustique, et dans la sonorité exceptionnelle pour le plain-chant⁸ de ces églises, rendue par leur configuration architecturale, ceci en évitant la polémique qui entoure les vases acoustiques⁹ dont la présence est ici en quantité trop faible pour être significative.

L'exposé suivant est le compte-rendu de cette analyse théorique. Après avoir rappelé les principes de la propagation sonore et précisé le domaine musical d'application de la méthode géométrique utilisée, nous complétons l'examen théorique de la voûte acoustique en berceau brisé en définissant deux autres axes qui sont liés à la position des stalles. Nous analysons la sonorité de position¹ dans l'église puis la sonorité que nous appelons instrumentale¹, indépendante de la situation dans l'église et qui s'appuie sur des structures résonnantes propres aux configurations architecturales des églises en cul de four de Sénanque et du Thoronet et dans l'église à chevet plat de Silvacane. Nous proposons une explication technique au phénomène de la prolongation des sons après leur interruption. Les croquis accompagnant le texte ont été réalisés par nos soins; le dessin de la coupe longitudinale de l'église qui a servi à la figure 12, nous a été aimablement communiqué par les moines de Sénanque.

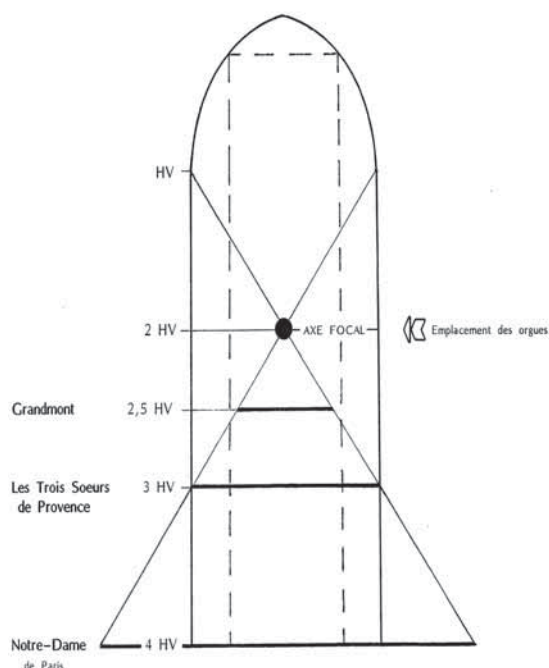


Fig. 4 : Les grandeurs caractérisant les voûtes acoustiques des églises étant proportionnelles à la largeur de leur nef, les plans de coupe des nefs sont superposables. Dans le schéma commun, seule la hauteur de la nef exprimée en unité HV (hauteur de voûte) différencie les édifices.

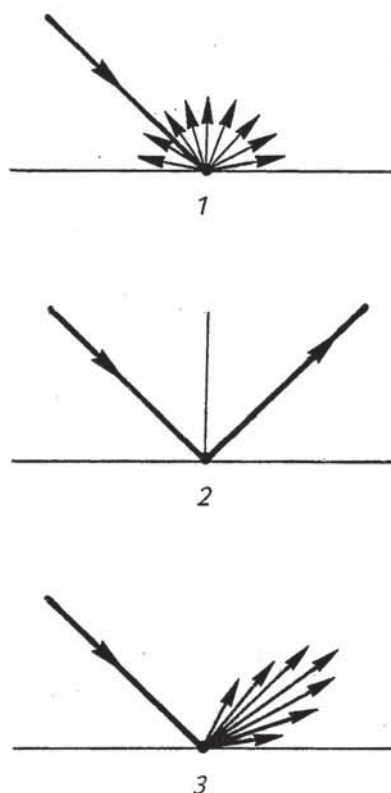


Fig. 5 : Différentes possibilités de réflexions sonores selon l'état de surface de la paroi.

La propagation sonore

Légitimité de la méthode employée

La propagation sonore s'effectue en ligne droite dans un milieu homogène (dans l'air sec à 0°C avec la célérité de 330 mètres par seconde). La vibration qui l'accompagne est porteuse d'une énergie dont la distribution se répartit lors de la rencontre avec une paroi, suivant l'état de rugosité de cette paroi. Avec des parois présentant de fortes aspérités, l'énergie est renvoyée dans toutes les directions suivant le schéma 1 de la figure 5.

Avec des parois bien polies l'énergie se concentre dans une direction privilégiée qui est symétrique de l'onde incidente vis-à-vis de la perpendiculaire à la paroi au point d'impact suivant le schéma 2 ; les analogies optiques sont celles du verre dépoli (schéma 1) et du miroir (schéma 2). Avec des parois insuffisamment polies, la répartition s'effectue suivant un diagramme plus ou moins ouvert selon le schéma 3, autour de la direction privilégiée précédente.

Les aspérités s'apprécient par leurs dimensions rapportées à la longueur d'onde¹ de la vibration sonore, qui correspond au trajet parcouru par une alternance de la vibration. Elle est d'environ 75 cm en air sec à 0° pour la note la₃₁. Une paroi est considérée bien polie si les dimensions de ses aspérités sont inférieures à 1% de la longueur d'onde. Dès lors, il apparaît légitime de considérer les voûtes en grand appareil dont la rugosité de surface est inférieure à 5 mm, comme un miroir, depuis les notes graves jusqu'à la gamme diatonique moyenne, registre qui correspond à la parole et au chant liturgique, et d'appliquer la théorie géométrique pour rechercher à définir les déplacements de ces vibrations sonores.

Lorsque les sons montent vers l'aigu les déplacements commencent après réflexion, à se diluer dans différentes directions suivant les configurations de type 3 puis 1.

Influence de la température de l'air

Dans l'air sec la célérité du son augmente de 5% entre 0°C et 30°C, en passant de 330 mètres par seconde à 350 mètres par seconde. A cette variation s'ajoute celle due à la présence de vapeur d'eau dont la quantité varie de façon considérable avec la température de l'air. Relativement faible en hiver, elle est importante en été, l'hygrométrie de l'air pouvant s'accroître de plusieurs centaines entre 3°C et 30°C. La célérité du son dans l'eau (environ 1 430 m/s) étant très supérieure à sa valeur dans l'air sec, il en résulte un accroissement sensible de sa célérité dans l'air humide vis-à-vis de l'air sec, notamment en bordure de mer.

Ce phénomène est mis à profit avec la corne de brume qui, lorsque le brouillard est dense, paraît plus proche qu'elle n'est réellement faute d'appréciation visuelle, ce qui a un effet salutaire. Cette augmentation de la célérité du son entraîne en corollaire l'accroissement de la longueur d'onde, favorisant l'étalement du spectre de fréquences pour lequel s'applique la théorie géométrique dans la configuration de type 2. Dans les églises, il en résulte pour l'onde réfléchie la réception plus rapide à l'oreille d'une plus grande étendue du registre réduisant la prépondérance des notes graves, ce qui peut par temps humide ou en été, affecter l'impact psychologique du son de la voix que l'on vient d'émettre.

Sonorité de position dans les églises cisterciennes de Provence

Nous retrouvons dans les nefs et transepts des églises voûtées en berceau brisé de Sénanque, Silvacane et du Thoronet, les caractéristiques acoustiques de position dans l'église qui, suivant la hauteur des voûtes, sont celles que nous venons de décrire. Nous devons mentionner de plus l'existence de deux autres axes.

Examen théorique : deux autres axes

Dans le schéma de section droite de la voûte acoustique en berceau brisé, nous relevons une autre particularité lorsque nous nous déplaçons transversalement en nous éloignant du foyer. Au niveau de la trajectoire verticale propre à la voûte, indiquée sur la figure 6, la voix réfléchiée par la voûte se concentre sans déformation à l'autre extrémité de cette trajectoire qui est symétrique par rapport au foyer. Cette réverbération des sons est perçue en deux plans légèrement différés l'un par rapport à l'autre, qui proviennent de la contribution de chacun des arcs suivant qu'ils se trouvent plus ou moins proches de l'endroit d'émission des sons.

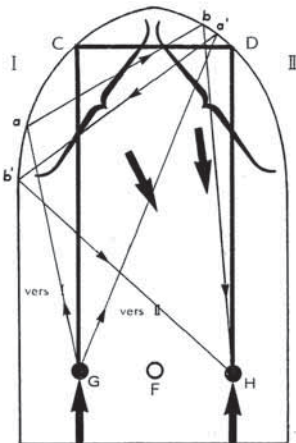


Fig. 6 : Les sons émis aux pieds G ou H de la trajectoire verticale GCDH, se concentrent à l'autre extrémité H ou G de cette trajectoire. Dans ce phénomène l'influence de chacun des arcs I et II de la voûte entraîne deux plans sonores légèrement différés l'un par rapport à l'autre, procurant à l'oreille une sonorité plus accentuée.

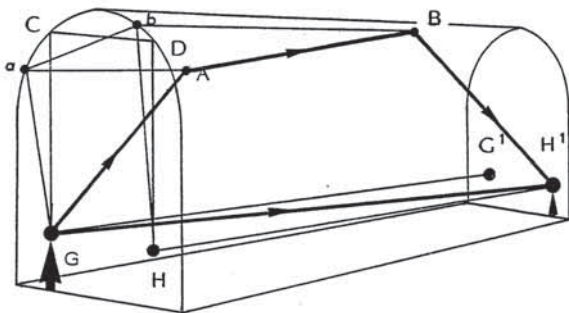


Fig. 7 : Les pieds G et H de la trajectoire verticale engendrent deux axes GG1 et HH1 situés parallèlement de part et d'autre de l'axe focal phonique. Les sons émis sur l'un de ces axes sont reçus sur l'autre axe de manière cohérente, en étant différés de la même durée vis-à-vis de la transmission directe, quelle que soit la position sur ces axes.

Cette particularité s'étend à l'ensemble du corps de bâtiment et les points situés sur la trajectoire verticale de chaque côté du foyer correspondent à deux autres axes disposés suivant la figure 7, de chaque côté de l'axe focal. Les paroles émises par deux interlocuteurs placés de part et d'autre, se prolongent par la réverbération dans la voûte, et les deux interlocuteurs peuvent se déplacer le long de ces axes sans être gênés, l'écart de durée de la réverbération vis-à-vis de la transmission directe restant le même.

Les nefs

L'axe focal phonique des églises de Sénanque et du Thoronet se trouve à environ cinq mètres du sol. Il est un peu moins haut dans l'église de Silvacane dont la largeur et la hauteur sous clef de la nef sont moindres. Une situation aussi élevée de l'axe focal entraîne, pour les sons émis dans le milieu de l'église, l'épanouissement des ondes réfléchies sur la surface au sol. La hauteur de la nef de ces églises, égale à trois fois la hauteur de leur voûte, paraît avoir été ajustée pour que la parole de l'officiant réfléchi dans la voûte, desserve la surface totale de la nef, ainsi que nous l'indiquons sur la figure 8.

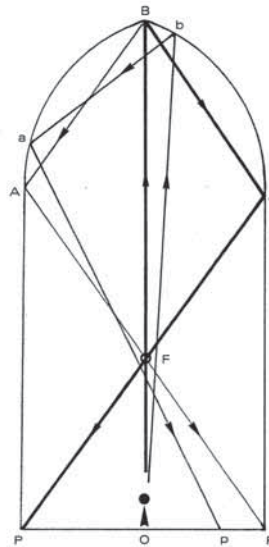


Fig. 8 : Dans les églises des trois sœurs de Provence les sons émis au centre de la nef et qui sont réfléchis dans la voûte, desservent complètement le sol de la nef, les trajectoires OBAP en définissant les extrémités. Toutes les trajectoires telles que OABP ont une longueur pratiquement identique, ce qui permet d'avoir le même différé vis-à-vis de la transmission directe en tous les points du sol de la nef.

Le retard vis-à-vis de la transmission directe reste le même dans la nef et l'on peut s'y déplacer sans éprouver la moindre gêne auditive. Ce retard lié à la hauteur de l'église, est supérieur à un dixième de seconde. De même, l'énergie sonore émise à l'une des extrémités de la trajectoire verticale liée à la voûte, extrémités situées à plus d'un mètre des arcades donnant accès aux collatéraux, se répartit au sol dans une zone d'environ deux mètres de large autour de l'autre extrémité de la trajectoire, comme le montre la figure 9.

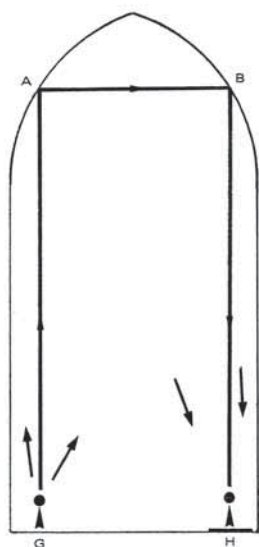


Fig. 9 : La majeure partie de l'énergie sonore renvoyée par la voûte, qui est émise au pied G de la trajectoire verticale GABH distante d'environ 1,50 mètre des bas-côtés de la nef, se concentre dans une zone d'environ 2 mètres de large répartie autour du pied H de cette trajectoire.

C'est dans cet espace où les sons réfléchis sont perçus en parfaite cohérence plus d'un dixième de seconde après l'onde directe, conférant à celui-ci une sonorité très favorable au chant monodique « a capella » des moines, que se trouvaient les stalles se faisant face, probablement sur deux rangs pour accueillir les nombreux clercs.

Suivant une particularité signalée par Frère Jean-Baptiste¹⁰, les sons émis en ces endroits semblent s'échapper par le haut. En effet, ces sons, destinés à toute la rangée opposée, sont reçus avec une sonorité qui résulte de la réflexion de la

totalité des ondes émises vers la voûte. Par contre, la voûte ne renvoie aucune onde sonore vers l'émetteur, ce qui en modifie l'effet psychologique. En revanche, un chanteur disposé à l'orée des bas-côtés, à environ un mètre en retrait de la nef, porte mieux sa voix. Si l'on veut bien se reporter à la figure 10, on constate que le chanteur se trouve sur un axe passant par le centre de l'arc de la voûte (II) qui lui fait face, ce qui lui permet de recevoir le retour de sa voix, les auditeurs situés dans la nef recevant l'énergie sonore réfléchie par l'arc (I).

Une grande importance devait donc être donnée à la hauteur des dossiers des stalles situées de chaque côtés de la nef, hauteur qui permettait, selon Dom Romain Clair¹¹, d'améliorer la qualité du chant. Avec cette disposition, l'énergie sonore réfléchie par la portion de voûte lui faisant face en passant par le centre de l'arc, était renvoyée à l'oreille du chanteur par réflexion sur le dossier, et lui permettait de recevoir le peu d'énergie sonore provenant des stalles opposées, qui aurait pu être perdu dans les collatéraux.

Bien que la hauteur de ces églises soit pratiquement la même, les nefs du Thoronet et de Silvacane sont plus longues et plus imposantes que celle de Sénanque. Elles se prolongent en effet, dans le croisement du transept et viennent buter contre le mur surplombant l'entrée de l'abside. Elles mesurent trente mètres et ont nécessité le renfort de trois arcs doubleaux. Du chevet des abbatales du Thoronet et de Silvacane, on voit donc l'entrée de la nef sous un angle plus ouvert qu'à Sénanque et l'énergie sonore qui est transmise en direction de la voûte pour y être réfléchie dans la nef est nettement plus importante. A Sénanque, un orifice situé dans le pignon sud au niveau de l'axe focal, laisse présager l'existence à cet endroit d'un vase acoustique qui aurait permis de corriger l'imperfection en renvoyant vers la voûte une partie de l'énergie sonore émanant du sanctuaire.

Dans ces églises, le retard de quelques dixièmes de seconde de l'onde réfléchie sur l'onde directe, retard lié à la hauteur de la nef, est très agréable à l'audition de la parole, du chant et de l'orgue dont le registre est proche de la voix. Au delà, le phénomène de l'écho deviendrait discernable à l'oreille.

Les transepts

Mise à part le transept de l'église de Silvacane, les hauteurs et les largeurs des transepts des églises de Sénanque et du Thoronet sont différentes de celles de leurs nefs. Comme nous allons le voir, ces transepts apparaissent dimensionnés pour obtenir la sonorité instrumentale des églises en interaction avec les nefs.

Sonorité instrumentale des églises cisterciennes de Provence

Deux effets viennent se superposer à la sonorité de position dans l'église. Le premier consiste en un renforcement du son de manière non différée, indépendant de la position dans l'église et qui peut être comparé à celui prodigué par un instrument de musique à cordes. Le second est la persistance du son quelques secondes après son interruption, disposition qui paraît favorable au chant modal des moines cisterciens. Nous verrons comment ces effets ont pu être obtenus et nous examinerons l'incidence du chevet plat.

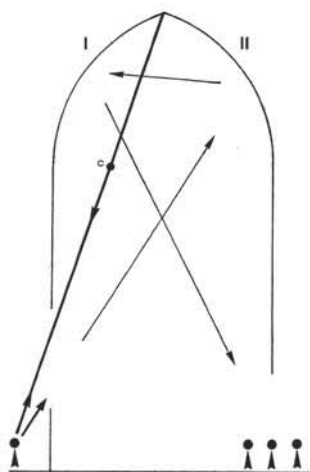


Fig. 10 : Le chanteur placé à l'entrée des bas-côtés porte mieux sa voix car il en reçoit le son par retour.

Structures résonnantes dans les églises

La sonorité instrumentale et la prolongation du son après son interruption, s'appuient sur des structures résonnantes. Nous remarquons en pénétrant dans ces églises, que les voûtes en berceau brisé de la nef et du transept sont fermées à leurs extrémités par une paroi verticale, soit par les murs gouttereaux terminant le transept et le pignon ouest de la nef, soit du côté est par la retombée verticale jusqu'à l'arcade donnant accès à la croisée du transept à Sénanque, ou surplombant l'abside à Silvacane et au Thoronet. Or, prises isolément ces voûtes constituent des structures résonnantes susceptibles de générer à la moindre sollicitation, une vibration sonore entretenue suivant leur axe. La fréquence fondamentale dépendant de la longueur de la voûte, est située dans les notes graves.

La figure 11 schématise l'une des trajectoires en boucle polygonale qui dans certaines conditions, sont le siège d'ondes stationnaires¹ d'harmoniques¹ de la fréquence fondamentale de résonance¹ de la nef, trajectoire qui exige la vacuité de l'allée centrale de la nef et du pignon ouest. Dans cet exemple, la boucle aurait une longueur d'environ cent mètres au Thoronet et mettrait en jeu cinq réflexions sonores.

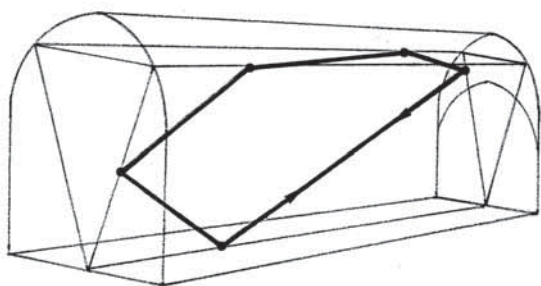


Fig. 11 : Exemple de boucle d'ondes stationnaires dans la nef. La vacuité de l'allée centrale doit être assurée

Renforcement des sons

Nous avons évoqué l'effet de la table d'un instrument de musique à cordes, violon ou violoncelle suivant l'octave, pour exprimer la sonorité ressentie dans les abbayes de Sénanque, Silvacane et du Thoronet. Il s'agit en effet d'une sonorité intervenant sans délai de retard vis-à-vis de l'émission du son et sans aucune altération, quelle que soit la position occupée dans l'église.

La boîte de résonance d'un instrument à cordes est le siège d'ondes stationnaires¹ internes, axiales et transversales, engendrées par la vibration des cordes ; par une interaction judicieuse obtenue grâce à la forme de la boîte, ces ondes stationnaires qui sont amorties convenablement par les ouvertures en forme de clef disposées sur la face supérieure, renforcent la vibration des cordes sans en altérer le registre et le niveau : elle est l'oeuvre de générations de luthiers. Une analogie actuelle de ce fonctionnement se trouve réalisée dans le transfert d'un signal électrique sans altération au moyen de circuits résonnants dont la bonne association permet sa transmission sans déformation dans une importante plage de fréquences.

Les structures résonnantes de la nef et du transept s'amortissent mutuellement par échange dans la croisée d'une partie de leur énergie vibratoire qui se trouve à une fréquence différente de leur fréquence fondamentale de résonance. Ces dispositions permettent à l'instrument constitué de l'ensemble des deux résonateurs de la nef et du transept agissant en interaction, de produire un son renforcé en tous les points des églises. C'est avec cette «sonorité instrumentale» que sont émis les sons qui, suivant la position dans l'église, sont répercutés par les voûtes comme nous l'avons indiqué pour les nefs. Cet instrument peut résonner légèrement pour des fréquences qui sont les harmoniques communs des fréquences de résonance propres aux voûtes de la nef et du transept, et l'on met ainsi en évidence par le jeu des longueurs de la nef et du transept, l'existence au Thoronet d'une quinte dans la gamme diatonique moyenne, mentionnée par légor Reznikoff. A Sénanque, les longueurs de la nef et du transept laissent présager un harmonique qui correspondrait à la note de la cloche située au sommet de la coupole. Nous verrons que le principe d'interaction diffère à Silvacane. La sonorité instrumentale de l'église est assurée par une multitude d'harmoniques suffisamment rapprochés pour être indissociables à l'oreille.

Uniformisation de l'effet sonore dans les églises de Sénanque et du Thoronet

En analysant le principe de l'échange d'énergie sonore entre la nef et le transept afin d'obtenir le même effet sonore en chaque endroit de l'église, on remarque que le couplage à réaliser dans cet échange dépend uniquement des hauteurs de la nef et du transept, et que son intensité est liée à l'écart entre leurs axes focaux phoniques mesuré à la verticale du centre de la croisée¹². La figure 12 donnée à titre d'exemple, nous décrit le principe de cet échange à l'abbatiale de Sénanque.

L'effet sonore dans l'église sera d'autant plus uniforme que les hauteurs de la nef et du transept rapportées à celles de leurs voûtes respectives, seront proches l'une de l'autre, le besoin d'interaction entre ces deux corps de bâtiments se réduisant progressivement. Parmi les abbayes, Silvacane réalise les conditions idéales, le Thoronet est voisine, alors que Sénanque est soumise à des contraintes architecturales qui en réduisent les performances par l'égalité des largeurs de la nef et du transept imposée par le diamètre de la coupole surmontant la croisée, la réduction de performance se traduisant par une réduction du niveau sonore vers le pignon de la nef¹³.

La sonorité instrumentale de l'église de Silvacane : le chevet plat

La manière dont sont obtenues la sonorité instrumentale et l'uniformité du son dans l'église est différente à Silvacane. Dans les abbayes de Sénanque et du Thoronet, la sonorité instrumentale et l'uniformisation du niveau sonore sont associées dans une interaction forte réalisée entre les structures résonnantes de la nef et du transept à leur intersection dans la croisée, particulièrement à son épicycle. On obtient alors, au prix d'une légère réduction du niveau sonore à certains endroits de l'église, une sonorité instrumentale exceptionnelle sur une grande étendue du registre, notamment au Thoronet.

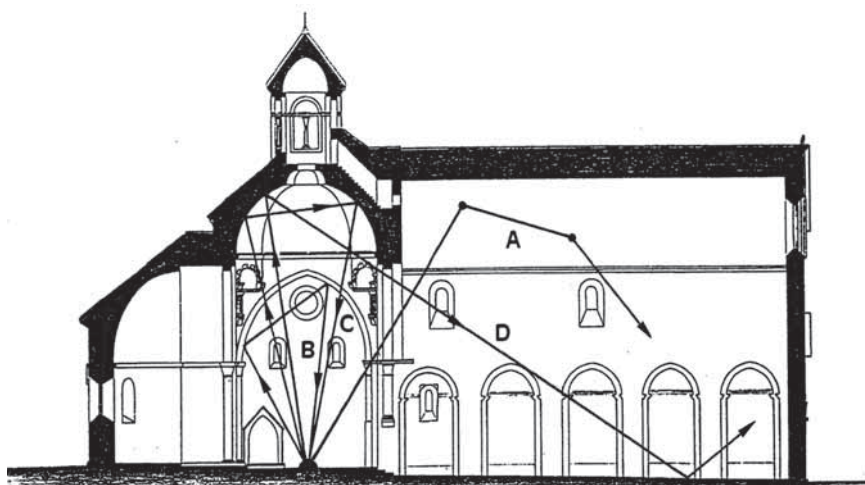


Fig. 12 : La coupe longitudinale de l'église de Sénanque montre l'importance de la croisée qui dessert par des ouvertures de dimensions identiques l'abside principale, la nef et les deux tronçons du transept. La coupole qui surmonte la croisée joue un rôle fondamental en liaison avec l'épicentre. L'énergie sonore concentrée à cet endroit est réémise par réflexion au sol :

- vers la voûte de la nef qu'elle dessert en totalité (repère A),
- vers les voûtes des tronçons du transept (repère B) où elle se concentre à l'épicentre de la croisée qui est situé sur l'axe focal phonique du transept,
- vers la coupole qui la renvoie par sa partie basse à l'épicentre (repère C) où elle est diffusée à nouveau dans les différentes directions. La partie haute de la coupole dessert directement le reste de l'église jusqu'au pignon de la nef (repère D).

Au total, la croisée et particulièrement sa partie centrale, constitue un centre de réémission sonore qui assure le transfert d'énergie du transept vers la nef afin d'obtenir le même niveau sonore dans l'église.

Elle montre l'intérêt de l'épicentre de la croisée où sont réémises, par réflexion au sol, les parts d'énergie sonore apportées respectivement par la nef et le transept. Elle met l'accent sur l'importance du dallage au sol de la croisée et dans toute l'église, dallage dont la nef de Sénanque est malheureusement dépourvue. Le centre de la croisée d'où semblent émaner les sons, apparaît ainsi comme l'éminent symbole d'une présence invisible.

A Silvacane, la nef et le transept ayant des dimensions identiques disposent au sol de la même énergie réverbérée par leurs voûtes. Sous l'angle de l'uniformité du son dans l'église, nef et transept peuvent alors être considérés comme simplement juxtaposés avec un besoin d'interaction réduit. La sonorité instrumentale de Silvacane est obtenue grâce au chevet plat qui prolonge la nef dans sa partie basse. Contrairement au cul-de-four qui disperse l'énergie sonore, le chevet plat renvoie vers la voûte de la nef l'énergie sonore qu'il en reçoit, comme nous l'indiquons dans la figure 13, engendrant dans la nef de nouvelles boucles polygonales d'ondes stationnaires à une fréquence qui est liée cette fois à la longueur de l'ensemble de la nef et du chevet. Ces nouvelles boucles s'ajoutent à celles de la nef en restant indépendantes. Leurs fréquences de résonance sont reliées respectivement aux longueurs de la nef et à celle

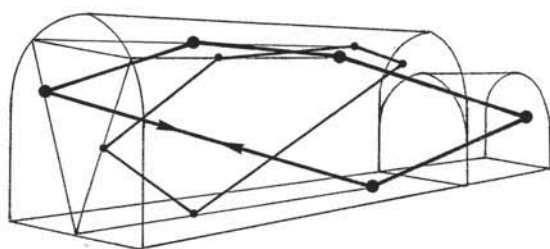


Fig. 13 : Exemple de boucle d'ondes stationnaires apportée dans la nef par le chevet plat.

de sa partie basse prolongée jusqu'au chevet, longueurs qui sont entre elles dans le rapport de trois à quatre. Du fait de ce rapport simple, les harmoniques engendrés dans ces boucles d'ondes stationnaires sont suffisamment proches l'un de l'autre, pour ne pas pouvoir être discernés à l'oreille. La sonorité instrumentale qui en résulte, faite d'harmoniques très voisins, possède alors un registre très étendu, pratiquement limité vers les aigus par la dispersion des ondes réfléchies liée à leurs longueurs d'ondes.

A Silvacane, la sonorité instrumentale et l'uniformité de l'effet sonore dans l'église ont donc pu être dissociées en des paramètres séparés en vue d'en obtenir le meilleur. Toutefois la sonorité instrumentale honorable obtenue à Silvacane ne semble pas avoir atteint l'ampleur de celle du Thoronet.

La prolongation du signal sonore

Dans l'église d'une abbaye, le maintien du son pendant quelques secondes accompagne

le chant modal des moines. Son effet, sensible lorsque le son s'interrompt, est le résultat du bon parallélisme des retombées verticales obstruant la voûte de la nef. Suivant un principe analogue aux images multiples obtenues entre deux miroirs parallèles, les trajectoires des boucles schématisées dans la figure 11, sont multipliées par réflexions sur les parois verticales de la façon décrite dans la figure 14.

Des expériences effectuées par le Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille, à Sénanque, Silvacane et au Thoronet¹³ ont confirmé ce point, par l'enregistrement d'une succession d'échos ayant la même intensité quelle que soit la position dans l'église, après l'émission d'une impulsion sonore très brève. Ces réflexions s'amenuisent plus ou moins rapidement suivant l'état de surface du matériau utilisé, de sa dureté et de la qualité du parallélisme des parois verticales fermant la voûte de la nef. La dégradation par le temps de l'état de surface et le soin encore visible apporté par les réalisateurs, font penser que la prolongation du signal sonore devait être initialement bien plus importante.

Dans les églises de Provence, une attention particulière a été apportée dans l'écartement des parois verticales fermant la voûte de la nef, qui reste inférieur à dix centimètres pour une longueur de la nef d'une trentaine de mètres, alors que les autres dimensions plus petites sont approximatives et qu'un écart de trente centimètres est fréquent. Toutefois, le léger manque de parallélisme de ces parois se traduit par le

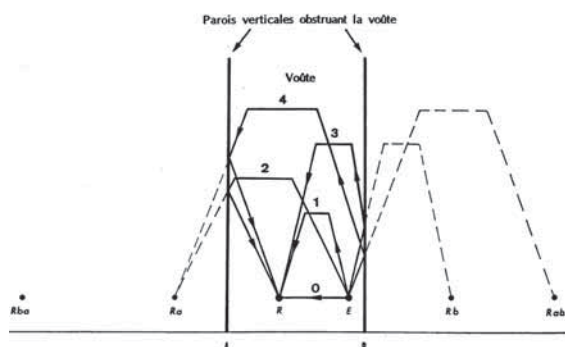


Fig. 14. Le croquis schématise les réflexions multiples d'une voûte acoustique en berceau brisé comportant deux parois verticales planes à ses extrémités.

La réception en R de l'émetteur sonore E (trajet indiqué 0) est suivi d'échos successifs (trajets marqués 1,2,3,4...) dont les intensités se réduisent au fur et à mesure des réflexions dans la voûte et sur les murs situés aux extrémités. Ces échos qui ont parcourus des chemins de plus en plus longs sont engendrés par les images du récepteur R par rapport aux plans A et B (marqués Ra et Rb) et les images successives de Ra et Rb par rapport à ces mêmes plans (marquées Rab, Rba, Raba, Rbab...).

Il s'agit de la transposition sonore de l'observation optique bien connue des images multiples d'un objet disposé entre deux miroirs parallèles.

déplacement progressif de la boucle d'ondes stationnaires de la figure 11 au fur et à mesure des réflexions. Le maintien de la hauteur du son pendant cinq secondes dans cette boucle serait alors obtenu pendant les deux tiers du temps suivant l'allure représentée sur la figure, et ensuite, grâce à deux réflexions supplémentaires sur les retombées parfaitement lisses de la voûte surmontant les arcades donnant accès aux bas-côtés, réflexions supplémentaires ayant pour effet d'accélérer la disparition du son.

La prolongation du son de quelques secondes, si elle est favorable au chant religieux, devient intolérable avec les instruments de musique actuels qui ont une modulation rapide, par suite de la limite physiologique de notre oreille qui ne peut interpréter deux sons trop rapprochés, l'un étant dans ce cas, l'écho du son émis précédemment. On sait en effet, l'importance qu'il faut donner aujourd'hui à l'isolement phonique d'une salle afin de restituer fidèlement la musique des instruments modernes.

Mais c'est à l'honneur des cisterciens du XIIe siècle d'avoir su, sans artifice, tirer parti des réflexions diverses pour donner une sonorité harmonieuse à la parole et au chant liturgique.

Conclusion

L'église de Silvacane met en lumière la finesse d'analyse des cisterciens. Cartésiens avant la lettre, ils ont su exploiter au fur et à mesure de l'édification des églises les potentialités acoustiques de la voûte acoustique en berceau brisé associée au chevet plat, grâce à la dissociation des paramètres techniques afin d'en tirer le meilleur.

Dans le domaine de l'acoustique, les concepteurs du XIIe siècle paraissent avoir été d'abord des rationalistes. Sur un sujet technique dont l'appréhension n'est pas immédiate, seule la rigueur du raisonnement et de la logique expérimentale pouvaient conduire les cisterciens à la réalisation de ces édifices voués au chant religieux.

1- Quelques termes et expressions utilisés :

- résonance exprime le renforcement du son d'une manière sélective suivant la note; la cloche et le diapason résonnent.
- sonorité désigne le renforcement des sons d'une manière uniforme dans un grand registre; on parle de la sonorité d'une salle de concert, et plus précisément :
- sonorité de position qui est renforcée en certains endroits de l'église,
- sonorité instrumentale qui est indépendante de la situation dans l'église et résulte de sa configuration architecturale.
- note la3 est le «la» de la troisième octave de la gamme diatonique. Elle est donnée par le diapason.
- fréquence d'une note est la quantité par seconde des compressions et détentes alternatives du milieu, entraînées par la propagation de l'énergie sonore. La fréquence du la3 correspond à 440 alternances par seconde. La note perçue par l'oreille est d'autant plus aiguë que la fréquence est plus élevée.
- longueur d'onde est la distance parcourue par une alternance de la vibration sonore. Elle est déterminée en divisant la célérité du son dans le milieu par la fréquence de la note.
- timbre est spécifique à la note émise par la voix ou un instrument de musique; la différenciation provient des harmoniques qui s'ajoutent à la note pure.
- harmoniques sont les notes dont la fréquence est multiple de celle de la note fondamentale.
- registre définit l'étendue des fréquences des sons émis.
- régime d'ondes stationnaires est le phénomène résultant de la superposition de deux ondes sonores de même fréquence, se propageant en sens inverses; il est à l'origine de la résonance du diapason, de la sonorité de la flûte ainsi que celle de la table d'un instrument de musique à cordes.

2- Les lois de la réflexion sur une surface lisse sont les mêmes pour la lumière, le son et la balle de tennis, bien que ces phénomènes soient de natures différentes.

3- Les voûtes mises en œuvre dans les collatéraux de certains grands édifices religieux sont plus élancées que celles des nefs, par un choix différent de l'écart des centres des arcs les constituant. Cette disposition répondant à des impératifs de résistance mécanique a été définie pour satisfaire aussi un besoin acoustique, en renvoyant verticalement au sol les sons qui en proviennent, évitant ainsi la diffusion dans le reste de l'église des bruits et brouhahas éventuels émanant des convers ou du public.

4- Le nombre d'or : 1,618... est un nombre transcendant dont le caractère anthropocentrique était apprécié en architecture grecque: les dimensions du Parthénon en tiennent compte.

5- Rapportés à la largeur L de la nef sur laquelle s'appuie la voûte, le rayon R des arcs est $R/L=0,723...$, la distance D des centres des arcs est $D/L=0,447...$, la hauteur HV de la voûte depuis sa base est $HV/L=0,688...$, la longueur commune aux trajectoires, qui définit le délai de retour au foyer d'un son qui en émane, est 3L. L'écartement des centres et le rayon des arcs sont entre eux dans le rapport $R/D=1,618...$ (nombre d'or).

6- Georges BERNAGE. «Architecture religieuse», Encyclopédie médiévale d'après Viollet le Duc, tome III, Bayeux 1993, fig.23-26-27, p.54-55-57.

7- Hubert LARCHER. « L'acoustique cistercienne et l'unité sonore», Encyclopédie des musiques sacrées, tome III, Paris, 1968, p.5.

8- Sur ce sujet se reporter à l'étude récente de Claire MAITRE, La Réforme Cistercienne du plain-chant. Citeaux, Commentarii cistercienses(Studia et Documenta,VI), Brecht, 1995.

9- Voir « Le vase acoustique de Foigny », La Thiérache. Bulletin de la Société Archéologique de Vervins, tome 12, séance du 20 mars 1888, p.164 ; et aussi Jean-Marc FONTAINE, «Contribution à l'étude des vases acoustiques disposés dans les églises», Mémoire d'ingénieur CNAM, 1979, Clermont-Ferrand, p.2-3.

10- Abbaye de Sénanque, courrier du 2 août 1998

11- Monastère de Ganagobie, courrier du 24 janvier 1999

12- Une part de l'énergie émise du sol est renvoyée par la voûte avec une intensité qui est déterminée par la hauteur de la nef ou du transept. Les intensités sonores dans la nef et le transept, sont donc, en général, différentes et l'interaction nef-transept, réalisée par réflexion au sol, permet de les harmoniser. Sur ces données nous avons exprimé cette interaction à l'aide d'un coefficient de couplage dont la valeur s'annule lorsque les hauteurs relatives de la nef et du transept sont identiques, le couplage étant alors devenu sans objet. Pour les trois sœurs de Provence, ce couplage s'exprime algébriquement par l'addition de deux termes d'importance égale. L'un de ces termes est l'écart des axes focaux de la nef et du transept mesuré à la verticale du centre de la croisée. Le deuxième terme est un rapport qui dépend des largeurs de la nef et du transept, terme s'annulant lorsque ces dimensions sont égales, ce qui est le cas à Sénanque et à Silvacane, le couplage étant alors seulement lié à l'écart des axes focaux. Dans les abbayes de Provence, on montre qu'une variation de l'écart des axes focaux dans un sens ou dans l'autre vis à vis de la valeur requise, a une influence réduite sur le niveau du couplage, ce qui constituait une donnée intéressante pour évaluer la qualité de la construction à réaliser.

13- François SANTON, L'acoustique des églises: exemple de quelques abbayes provençales, Conférences des journées d'études du festival international du son, Paris, 1976.