

CFA/VISHNO 2016

**L'effet des pots acoustiques du caveau phonocamptique
de la Cathédrale de Noyon : analyse modale et
performance chantée**

J.-C. Valiere^a, B. Palazzo-Bertholon^b, D. Fiala^c et V. Zara^c

^aInstitut PPRIME, UPR CNRS 3346, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, 6 rue Marcel Doré, 86073 Poitiers, France

^bCentre d'Etudes Supérieur de Civilisation Médiévale (CESCM), Université de Poitiers, CNRS, UMR 7302, 24, rue de la chaîne, TSA 81118, 86073 Poitiers, France

^cCentre d'Etudes Supérieur de la Renaissance (CESR), 59, rue Néricault-Destouches, BP 12050, 37020 Tours, France
jean.christophe.valiere@univ-poitiers.fr



LE MANS

Au CFA de 2014 nous présentions le *caveau phonocamptique* de la Cathédrale de Noyon qui comporte, dans un espace souterrain réduit (15 m²), un nombre important de pots acoustiques (64). L'étude des livres liturgiques et de la documentation de la cathédrale (XV^e-XVII^e siècles) ne permet pas à ce jour d'identifier le rôle et l'usage de ce caveau. Pourtant, les études archéologiques et acoustiques que nous avons présentées en 2014 montraient le soin qu'avaient pris les bâtisseurs pour élaborer cet espace : deux modèles de pots de hauteurs différentes, correspondant à deux fréquences moyennes proches d'une quarte musicale, une répartition choisie dans l'espace et un travail de maçonnerie particulièrement soigné. Afin d'en comprendre l'usage, la question est de savoir si les chœurs descendaient dans le caveau et si les pots avaient un effet sur leur performance. En effet, la taille réduite de la salle permet d'envisager un effet réel et mesurable des pots, à la différence des dispositifs placés dans les voûtes. Pour ce faire, deux expériences ont été conduites. D'une part, une analyse modale de la salle a été réalisée sur environ un tiers du volume et l'effet des pots semble significatif en terme de diffusion des fréquences concernées (100 Hz - 300 Hz). D'autre part l'ensemble Gilles Binchois, dirigé par Dominique Vellard, a exécuté des œuvres du XVI^e dans le caveau avec les pots bouchés puis débouchés. Les chanteurs et un public situé quant à lui à l'extérieur du caveau ont répondu à un questionnaire sur la perception du chant. La conférence présentera les premiers résultats de ces expériences.

1 Introduction

Les études précédentes ont montré que les édifices possédant des pots dans leurs murs ou leurs voûtes présentent des caractéristiques similaires sur le territoire français actuel et dans des pays limitrophes [1].

En effet, les fréquences des pots sont, la plupart du temps, proches du fondamental de la voix parlée et chantée et des premières harmoniques. De même, il existe souvent deux groupes de pots accordés l'un à l'autre avec un écart musical (quarte ou quinte) qui ne semble pas dû au hasard. De surcroît, ceux-ci sont en général disposés spatialement en relation avec la pratique liturgique (dans le chœur pour les monastères, parfois au-dessus des stalles) ou par des considérations liées aux fréquences des pots.

Si l'intention d'agir sur la source sonore nous semble acquise au travers de nos études, il est plus difficile de prouver que les pots étaient insérés pour agir sur le son dans l'espace lui-même. Des études antérieures partant de cette hypothèse n'ont jamais donné de résultats probants tant l'expérience est difficile à réaliser mais aussi et surtout, car l'intention des bâtisseurs à ce propos n'est absolument pas étayée par des textes qu'ils soient descriptifs (chroniques d'abbayes) ou produits par des savants (architectes, érudits).

Seuls nous restent donc, des exemples où le lien entre l'acoustique d'un lieu et la pose de pots pourrait être établi de manière empirique par les bâtisseurs. Le caveau de Noyon est, à notre connaissance, l'un des rares cas qui pourrait faire progresser cette recherche. En effet, les concepteurs du caveau ont jugé nécessaire de mettre des pots dans un lieu de très faible volume dans lequel il est difficile de chanter.

L'analyse archéologique a montré qu'un soin particulier a été porté à l'élaboration de la construction. L'analyse acoustique des pots montre notamment que les règles issues de nos recherches précédentes étaient bien présentes ici. Ajoutons que l'organisation des pots dans le caveau est tout à fait singulière avec sur les parements ouest et nord une dominante de pots à basses fréquences dans les parties basses et quelques pots de hautes fréquences en partie haute des murs et sur le mur sud, où dominent les fréquences de résonances de hautes fréquences [2].

De surcroît, le nombre important de pots (64) au regard de la taille du caveau semble présenter des conditions expérimentales favorables à l'observation de l'effet acoustique des pots.

Le présent article se propose donc de présenter les essais acoustiques effectués et les premiers résultats d'une mise en situation du caveau par un groupe de chanteurs spécialisés dans les musiques contemporaines de l'aménagement de ce lieu.

Dans un premier temps, l'expérience effectuée dans le caveau au moyen d'une antenne de 8 microphones déplacés sur 3 plans sera présentée. Ensuite les signaux captés lors de cette expérience seront exploités permettant de réaliser une analyse modale partielle du caveau et de mieux comprendre les caractéristiques acoustiques, voire d'extrapoler celles du caveau d'origine. Enfin, la performance des chanteurs sera présentée et les résultats des tests subjectifs effectués par leur soin au sortir de l'expérience seront confrontés aux mesures objectives.

2 Mise en place de l'expérience

Des premiers essais ont permis d'estimer le temps de réverbération TR_{60dB} de 0.7s et un volume d'environ $V=38m^3$ ce qui place la fréquence de Schroeder (séparation fréquentielle théorique entre comportement modal et comportement diffus d'une salle) autour de 270 Hz. Les premières fréquences, fondamentales et harmoniques, des voix masculines sont directement impactées et les fréquences des pots sont dans cette même gamme (95-160 Hz).

L'objectif était de réaliser une antenne de quelques microphones déplacés régulièrement de manière à obtenir un maillage de l'espace. Nous nous fixons de pouvoir analyser la gamme modale en dessous de 300 Hz. Pour respecter les conditions spatiales d'estimation des modes, nous nous fixons d'avoir au minimum quelques points (3-4) pour les longueurs d'onde les plus petites. En prenant comme fréquence limite pour l'analyse spatiale la fréquence de 300 Hz, nous avons choisi, en relation avec les contraintes de la salle, un écartement des micros de 31 cm et des déplacements d'antenne horizontalement (x_1 à x_{11}) de 29 cm, comme le montre la figure 1. Le déplacement vertical de celle-ci est de 35 cm sur trois niveaux (z_1 à z_3) à partir de 1,40m, position correspondant à la série de pots la plus basse.

Avant de réaliser le scan de la pièce nous avons positionné l'antenne dans une position dissymétrique par rapport à la géométrie relativement régulière de la salle et, au moyen d'une source impulsive (ballon), nous avons réalisé plusieurs prises de mesure.

Enfin, nous avons fabriqué 64 bouchons en mousse adaptés aux différentes embouchures et collés à une petite plaque de bois pour se rapprocher des conditions environnantes les pots (briques).

Pour réaliser le scan de la pièce, la source sonore, après plusieurs essais, a été insérée dans un coin. Son niveau a été inchangé tout au long des essais qui se sont déroulés le plus rapidement possible pour éviter des dérives en température. Dans la pratique, une fois le matériel installé et après un certain temps, celle-ci est restée stable à 15.1°C en raison de la très forte inertie thermique de la salle.

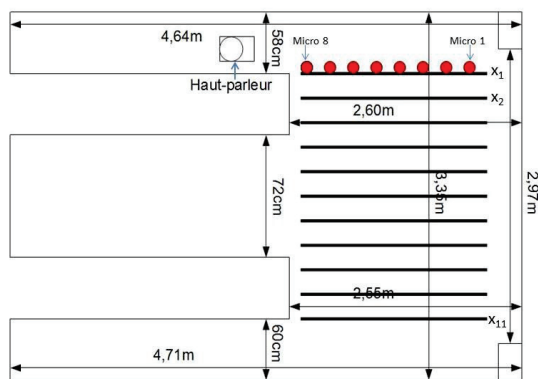


Figure 1: Déplacement sur un plan vertical de l'antenne ; x_i dénote la position de l'antenne.

Nous aurons donc à notre disposition pour l'analyse du comportement acoustique, des signaux impulsifs, trois scans horizontaux à différentes hauteurs en bruit blanc, avec pots bouchés et pots débouchés. Les mesures occupent environ 1/3 du volume accessible de l'espace. La dépendance modale en hauteur sera, de fait moins accessible.

3 Analyse impulsionnelle

Au sens strict de l'acoustique architecturale, il est impropre de parler de temps de réverbération au sens de Wallace Clément Sabine [10] tant le comportement de la salle est modal et non diffus. Cependant nous avons choisi d'utiliser la méthode classique de décroissance de 60dB de la réponse impulsive de la salle, puis nous avons réalisé une analyse par bande d'octave et estimé le temps par bande.

Le tableau 1 montre les résultats des mesures des décroissances du niveau à 60dB sur chaque micro de l'antenne pots ouverts et pots bouchés. L'on peut remarquer une assez grande robustesse des résultats, bien qu'en fonction de la position ce ne sont pas les mêmes modes qui sont mis en jeu. L'amortissement des modes dans le même domaine fréquentiel est sensiblement le même.

Le résultat le plus frappant est que la moyenne des résultats donne des résultats très différents pour les pots ouverts et les pots fermés, bien au-delà des incertitudes de mesures. Le caveau est donc plus sonore avec les pots ouverts et cette impression est corroborée par tous les acteurs de l'expérience.

L'analyse des temps de décroissance à 60dB par bande d'octave donnée en figure 2 pour une seule position de microphone est tout aussi significative. Les bandes les plus graves ont une décroissance nettement augmentée, au-delà

de l'incertitude de mesure. Une analyse plus fine de la bande 125 Hz en prenant une moyenne sur 8 microphones à l'instar du temps de décroissance global présenté au tableau 1, montre en fait un accroissement de plus de 60%. Notons que la majorité des fréquences des pots se trouve dans la bande de 125 Hz.

Tableau 1: Temps de décroissance à 60dB de la réponse impulsionnelle

micro	Ouvert	Fermé
1	0,728	0,647
2	0,722	0,631
3	0,619	0,563
4	0,716	0,525
5	0,717	0,541
6	0,709	0,58
7	0,744	0,572
8	0,746	0,567
moyenne	0,71	0,58
écart-type	0,040	0,042
%	5,62%	7,20%

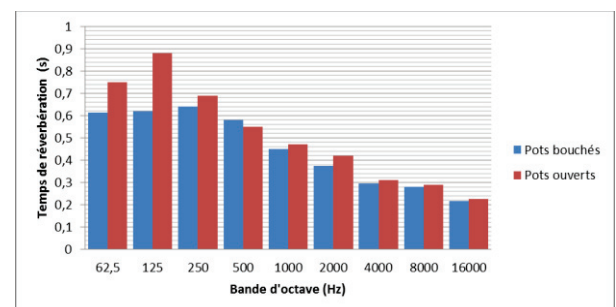


Figure 2: Temps de décroissance à 60dB par bande d'octave prise sur une position

Ce fait, en soi, est déjà une rupture par rapport aux interprétations classiques qui tablent davantage sur les propriétés d'absorption des résonateurs, seule explication acoustique possible pour l'usage des pots dans des espaces de plus amples dimensions mais qui n'est pas étayée par des textes connus à l'heure actuelle.

4 Analyse fréquentielle et modale

4.1 Pots bouchés

Il n'est pas possible, sauf à faire un calcul numérique précis, d'identifier les modes par une approche analytique même si la géométrie semble assez simple. Nous nous fierons donc aux maxima des fréquences obtenues par l'analyse spectrale.

Les figures 3 et 4 représentent la Densité Spectrale de Puissance (DSP) en échelle linéaire respectivement à la même position horizontale à deux hauteurs différentes (z_1 et z_2) et à deux positions (x_2 et x_3). Le choix d'une position excentrée et proche des murs permet de faire ressortir la majorité des modes en présence.

En premier lieu, la structure modale en dessous de 60 Hz et 300 Hz apparaît clairement avec un maximum d'énergie entre 60 et 200 Hz. La représentation linéaire

permet de mieux faire ressortir la dynamique. Le niveau global est de 93 dB, la part d'énergie entre 0 et 300 Hz est de 90 dB et pour le reste du spectre elle est évidemment de 90 dB. Une très grande part de la puissance acoustique est donc concentrée en très basse fréquence autour des modes de premiers ordres.

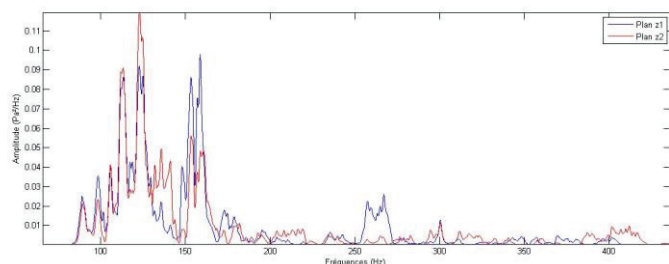


Figure 3: Densité spectrale de Puissance (en échelle linéaire) du micro 9 (ligne x_2 , premier micro sur la figure 1)

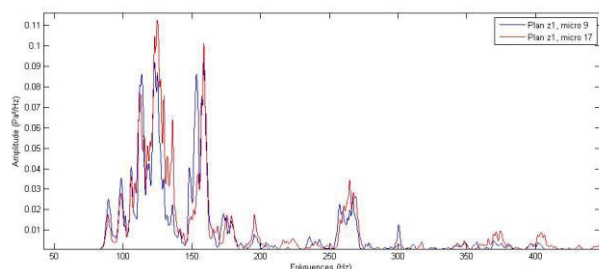


Figure 4: Densité spectrale de Puissance (en échelle linéaire) des micros 9 et 17 (ligne x_2 et x_3 , premier micro)

En second lieu, il est visible sur les deux figures que certains modes restent stables dans l'élévation. Les fréquences de 105 et 123 Hz dans la figure 3 sont de même amplitude ce qui montre qu'il s'agit le plus probablement de modes à dépendance horizontale.

Pour la figure 4, ce sont davantage les modes associées à la fréquence 158 Hz et le groupe de modes au-dessus de 250 Hz qui semblent essentiellement dus à l'élévation seule. Une fréquence à 136 Hz proche du maximum des pots semble subir une amplification entre le micro 9 et 17.

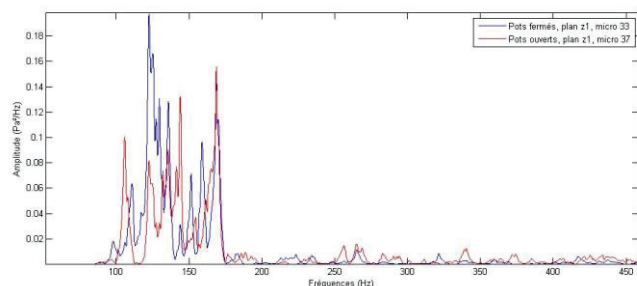


Figure 5: Densité spectrale de Puissance (en échelle linéaire) des micros 33 et 37 (ligne x_5 , micro 1 et 5)

Cela est confirmé sur la figure 5 qui regarde l'évolution sur une antenne placée au centre du caveau. La fréquence 136 Hz augmente encore, ainsi que la fréquence 144 Hz qui progresse considérablement vers le centre.

Nous nous focaliserons pour l'observation des résultats sur les modes 105 Hz, 123 Hz, 136 Hz et 144 Hz qui sont très marqués et coïncident avec les fréquences des pots qui sont de nature à modifier le champ.

4.2 Pots ouverts

Rappelons que si deux classes de pots ont pu être déterminées statistiquement par leurs fréquences et leurs

géométries [2], la répartition autour des fréquences maximum (108 Hz et 141 Hz) est toutefois assez étendue comme le montre la figure 6.

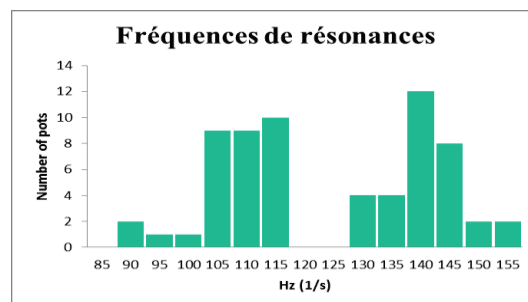


Figure 6 : Répartition des fréquences de résonance des pots.

Les figures 7, 8, 9 et 10 représentent la répartition spatiale des niveaux sonores aux fréquences choisies précédemment, respectivement 105, 123, 136 et 144 Hz, à gauche pots ouverts et à droite pots fermés. Cette présentation donne à voir ce que l'on peut appeler la répartition modale autour d'une fréquence (pots fermés) bien qu'il faille être prudent sur cette notion, car en aucun cas les modes propres du volume n'ont été calculés.

Ce qui frappe d'emblée c'est le gain d'homogénéité entre la situation pots fermés (figure de gauche) et pots ouverts (figure de droite). La différence entre les nœuds et les ventres de pression sont clairement beaucoup moins marqués et ceci quelles que soient les figures. Notons que nous avons pu observer ce phénomène sur tous les essais préliminaires que nous avons effectués, y compris sur les fréquences pour lesquelles les comportements modaux étaient moins marqués.

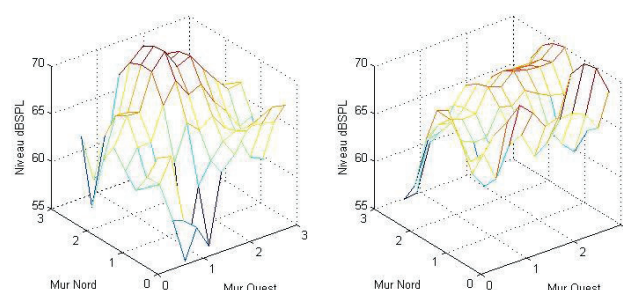


Figure 7 : Répartition spatiale du son à la fréquence 105 Hz. Figure de gauche, pots fermés, figure de droite, pots ouverts

Les figures illustrent aussi très clairement le comportement des pots en résonateur de Helmholtz. Sur le mur ouest, par exemple, où une série de résonateurs autour de 108 Hz est regroupée (figure 7), un effet d'amplification locale apparaît lorsque les pots sont débouchés. A distance, au centre du caveau c'est l'effet d'absorption qui est prégnant.

On retrouve ce phénomène également sur le mur sud, qui contient, quant à lui, essentiellement des pots accordés autour de 141 Hz. L'effet d'amplification locale n'apparaît pas, car pour des raisons techniques, l'antenne ne pouvait pas être proche du mur. En revanche l'effet d'amortissement à distance est très net.

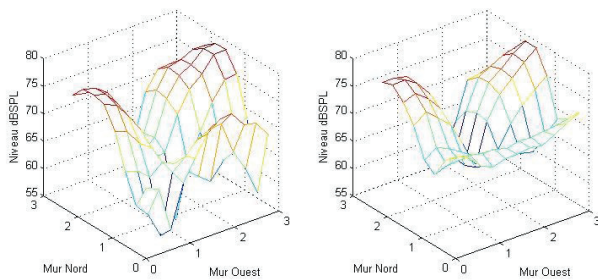


Figure 8 : Répartition spatiale du son à la fréquence 123 Hz. Figure de gauche, pots fermés, figure de droite, pots ouverts

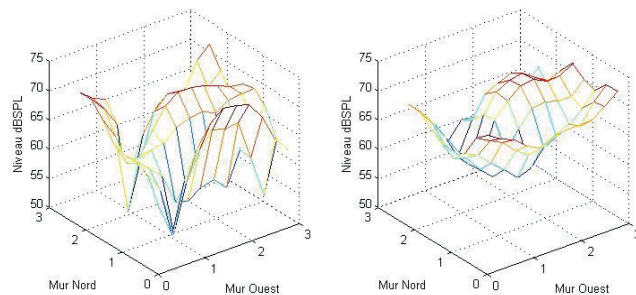


Figure 9 : Répartition spatiale du son à la fréquence 136 Hz. Figure de gauche, pots fermés, figure de droite, pots ouverts

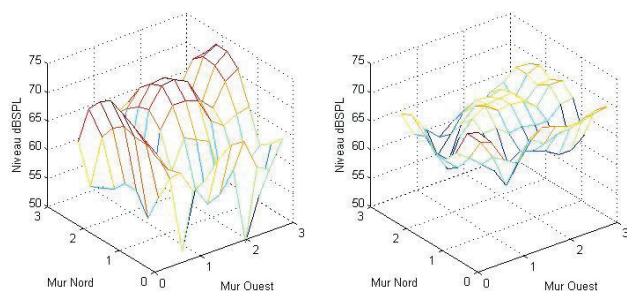


Figure 10 : Répartition spatiale du son à la fréquence 144 Hz. Figure de gauche, pots fermés, figure de droite, pots ouverts

Pour finir sur ce point, la figure 8 montre une répartition spatiale beaucoup moins impactée à 123 Hz, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il n'y a aucune résonance de pot autour de cette fréquence. Néanmoins l'ensemble de l'énergie étant redistribuée dans le caveau, la dynamique de ce mode a tout de même diminué.

4.3 Conclusion des essais

Pour conclure les sections 3 et 4 qui portent sur l'analyse impulsionnelle et modale, nous pouvons affirmer que nous sommes dans un cas très singulier par rapport à la littérature habituelle sur les pots acoustiques.

Les pots ouverts réunissent dans le caveau les quatre effets théoriques qui sont habituellement mentionnés dans les livres d'acoustique [7] : amplification locale, absorption, diffusion et réverbération.

Nous avons vu, que le temps de décroissance du son (à 60 dB) au centre du caveau, gagnait près de 30% globalement et plus de 50% sur la bande 125 Hz. Par ailleurs, les effets à la fois de diffusion et d'amplification locales, associés à l'absorption à distance ont tendance à

homogénéiser le champ acoustique en diminuant l'écart d'amplitude entre les nœuds et les ventres de pression.

L'analyse acoustique de cette petite salle ne doit pas se résumer à sa réponse au-dessous de 500 Hz. Si les pots présents à Noyon possèdent des résonances supérieures à celle d'Helmholtz (partiels) que nous avons pu mesurer avec un microphone dans la cavité, nous n'avons pas observé leur impact sur la salle. L'amortissement en « haute fréquence » est si fort que l'impact sur une performance chantée ne doit pas présenter de caractéristique singulière.

5 Performance chantée

5.1 Préparation et choix du répertoire

Les effets des pots sur le champ acoustique que nous venons de montrer objectivement ne répondent cependant pas aux deux questions essentielles qui restent encore en suspens :

- Les pots ont-ils été choisis par rapport au volume et à la géométrie de la salle ?
- Quel était l'objectif de ce dispositif dans une salle de cette nature ?

Afin de répondre à ces questions, il nous a semblé utile de monter une expérience de mise en situation chantée, à l'instar de ce qui peut se faire en archéologie expérimentale.

En amont de cette expérience, des collègues liturgistes [8] et musicologues, co-auteurs du présent article, ont systématiquement examiné les sources textuelles liées à la cathédrale sans parvenir à découvrir la moindre mention ancienne du caveau (avant sa « redécouverte » au XIX^e siècle).

Plusieurs éléments tendent tout de même à montrer que ce caveau pouvait servir au chant. Premièrement, la présence des pots dont la répartition spatiale et les fréquences de résonance témoignent de l'usage acoustique. Deuxièmement, la présence de graffiti des XVII^e-XVIII^e réalisés par des chantres et des maîtres de musiques.

À la Renaissance, la cathédrale de Noyon était, à l'image de plusieurs grandes églises environnantes, comme Saint-Quentin, Amiens ou Beauvais, un important centre de formation, de pratique et de création musicales. Les chanteurs formés dans ces centres religieux étaient réputés et employés dans toute l'Europe.

Le répertoire et les interprètes ont été choisis pour s'approcher au plus près des sonorités qui pourraient avoir été produites dans ce caveau à l'époque de son édification, autour de 1600. Quatre chanteurs masculins experts de ce style de musique vocale religieuse *a cappella* ont donc interprété :

- une composition polyphonique élaborée (complexe) à quatre voix (en contrepoint) : le Sanctus de la Messe *"Je suis déshéritée"* de Nicolas de Marle, maître de musique de la cathédrale de Noyon dans les années 1560 ;
- une polyphonie simple à quatre voix, improvisée en style de faux-bourdon (en accords, toutes les voix déclament le texte sur le même rythme), sur le psaume *In exitu Israel* ;
- un chant religieux monodique (de type « chant grégorien ») : *Salve regina* dans le style du plain-chant de l'Oratoire, rythmé à la manière de la

musique mesurée à l'antique (mélange de 2 et 3 temps).

Ces trois formes de chant pratiquées à l'époque où ce caveau a été installé, présentées ici dans un ordre décroissant de complexité (polyphonie complexe, polyphonie simple, monodie) demandent des conditions d'écoute et d'exécution différentes que nous voulions tester dans le cadre de cette performance expérimentale. Parmi les paramètres les plus importants pour ce genre de performance, signalons : dans tous les cas, la justesse des intonations, notamment pour le plain-chant (monodique) ; pour les deux œuvres polyphoniques, l'accord et la cohésion harmoniques entre les voix, particulièrement la précision des quintes naturelles (ou « pures ») entre les deux voix inférieures, dont la fusion est un principe fondamental de ce style de chant *a cappella* ; enfin, la précision rythmique, notamment pour le Sanctus en contrepoint élaboré.

L'ensemble Gilles Binchois, dirigé par Dominique Vellard, spécialiste des chants du Moyen Âge et de la Renaissance, a accepté de collaborer à cette expérience. L'objectif de la performance avec des professionnels, était de vérifier s'il était possible de chanter dans le caveau et si la présence des pots améliorait les conditions du chant.

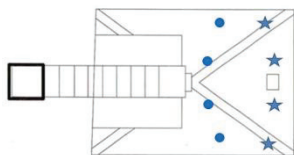


Figure 11 : **Cercles** : premier choix des chanteurs ; haut en bas, CT, T, Bar et Bas. **Étoiles**, second choix des chanteurs (positions inversées)

5.2 Méthodologie et questionnaire

Les chanteurs étaient invités à trouver la place qui leur convenait le mieux dans le caveau dans un premier temps avec les pots fermés puis l'ensemble de l'expérience se déroulait aux positions choisies. Par la suite, ils pouvaient revoir leur position avec les pots ouverts.

Ils étaient enregistrés par une tête artificielle placée dans le caveau et le son ressortant de la trappe d'accès était aussi enregistré en stéréo. Le but de ces enregistrements est de réaliser des tests d'écoute à l'aveugle par la suite.

Les chanteurs devaient pour chaque performance répondre au questionnaire suivant :

- Q1 : Était-il aisé de chanter pour vous ?
- Q2 : Entendiez-vous correctement les autres chanteurs ?
- Q3 : Comment jugez-vous le résultat musical ?
- Q4 : Comment jugez-vous la qualité sonore ?
- Q5 : Comment jugez-vous la qualité sonore en comparaison des pots bouchés ? (le cas échéant)

Ils devaient répondre avec seulement 4 possibilités de « très difficile » à « très facile » ou « très mal » à « très bien » selon la nature de la question.

Le directeur musical de l'ensemble écoutait la performance au casque à travers la tête artificielle et répondait aussi aux questions Q3, Q4 et Q5.

Un enregistrement sonore et vidéo était aussi effectué pendant les performances.

5.3 Conditions de l'expérience

La première impression des chanteurs, avant même tout essai chanté, était l'inconfort d'un espace aussi exigu et humide. Après plusieurs essais et discussions, les chanteurs ont choisi de se positionner face au mur ouest (figure 11) les pots étant bouchés. On peut imaginer que le retour naturel du son par le mur ouest en face d'eux leur facilitait l'écoute personnelle et interpersonnelle.

Dans un deuxième temps, ils ont chanté les trois œuvres choisies avec les pots bouchés, puis répondu au questionnaire après chaque performance. Ils ont ensuite recommencé les œuvres dans la même position, avec les pots débouchés.

Puis nous avons recueilli leurs impressions orales après la performance réalisée avec les pots débouchés.

Pour finir, ils ont choisi de se positionner dos au mur ouest (figure 12) et ils ont repris une partie des œuvres tests dans cette position.



Figure 12 : Chanteurs dans le caveau devant le mur ouest (second choix). De gauche à droite, Contre-ténor (CT), Ténor (T), Baryton (Bar), Basse (Bas).

5.4 Résultats et analyse

Les résultats moyens sont donnés dans le tableau 2. Les questions étaient notées de -2 à 2 et il était autorisé de cocher des positions intermédiaires en cas d'hésitation et de jugement comparatif. Plus le résultat se rapproche de 2, plus le jugement est positif par rapport à la question demandée.

Tableau 2 : Synthèse des réponses au questionnaire

Question	Q1	Q2	Q3	Q4
Moyenne par question pots obturés	0,50	1,25	0,21	0,29
Moyenne par question pots ouverts	0,92	1,17	0,67	0,75
Œuvre	Sanctus (polyphonie)		Faux bourdon	Plain-chant
Obturés	0,19		0,81	0,69
Ouverts	0,88		1	0,75

Ce qui frappe d'emblée c'est que les résultats sont tous positifs en moyenne ce qui montre que même si l'espace est petit et très amorti, la proximité des chanteurs entre eux dans ce lieu leur permettait de chanter assez facilement. La meilleure preuve en est que la note correspondant à l'écoute des autres (question Q2) est déjà élevée pots fermés et reste stable avec les pots ouverts.

En revanche pour l'écoute personnelle, nous constatons une légère amélioration d'ensemble qui cache toutefois des réalités différentes. En particulier, les chanteurs Basse et Baryton notent, pour eux même, une amélioration sensible notamment la Basse qui passe de -0.33 à 1. On constate donc que les pots accordés autour des notes jouées par les voix graves améliorent le retour et l'écoute personnelle et la discussion ayant suivi les essais a confirmé ces résultats.

Concernant la qualité musicale (Q3) et sonore (Q4), les chanteurs ressentent une légère amélioration, le « débriefing » montrant à la suite des essais que cette qualité, jugée meilleure n'avait de sens que dans le caveau. Il est évident pour les chanteurs, que la qualité sonore ne peut être comparée avec celle d'une église ou d'une cathédrale.

Concernant l'analyse des résultats par œuvre tous jugements confondus (tableau 2 lignes du bas), l'effet des pots croît en fonction de la complexité de la musique polyphonique. Si cette progression est sensible sur le « faux-bourdon », elle est plus nette sur le chant polyphonique, qui passe de 0.19 à 0.88. Les discussions avec les chanteurs et le directeur de l'ensemble à la suite des essais étaient édifiantes à ce propos car l'ouverture des pots a permis, en renforçant les basses, de mieux réaliser la performance en ce qui concerne la recherche de la justesse par les harmoniques.

6 Conclusion et interprétation

Pour la première fois, une expérience complète d'analyse impulsométrique et modale d'une salle avec des pots acoustiques a été confrontée à des performances chantées en respectant au mieux la contextualisation historique.

Certes, le caveau n'est pas exactement dans sa configuration du XVI^e siècle, puisque des piliers ont été ajoutés, mais le comportement modal ne serait pas si différent car le volume perdu est peu important par rapport au volume restant et les conclusions issues de l'étude auraient probablement été assez similaires.

Remarquons tout d'abord que le choix de la fréquence des pots, assez habituel au XV^e-XVI^e siècles comme nous le signifiions dans l'introduction, ne correspond non seulement aux premières fréquences des voix chantées mais aussi aux modes de la salle, qui constituent les principaux perturbateurs d'un chant bien homogène en fréquence et en espace.

Ainsi les pots ouverts dans ce petit volume jouent un rôle très significatif et contribuent à améliorer le mélange par les effets combinés de diffusion, d'absorption et de réverbération ce qui conduit à une meilleure distribution du son dans l'espace.

Les musiciens par leur performance et leurs capacités exceptionnelles d'écoute, liées à leur pratique musicale quotidienne ont, eux aussi, constaté des améliorations sensibles de la qualité du son. Mais c'est surtout le « confort » d'un meilleur retour qui leur a permis de produire une fusion harmonique améliorée avec les pots ouverts.

En l'absence de témoignage textuel sur l'usage du caveau d'un point de vue liturgique ou musical, l'expérience présentée démontre que la présence des pots a un impact réel sur la production sonore et que ce fait est confirmé par les mesures. Il est possible de franchir, de notre point de vue, le pas suivant : le caveau était utilisé

pour le chant, tout au moins à titre d'expérimentation si ce n'est pour des raisons liturgiques.

Par ailleurs, l'effet des pots - nombreux - dans un espace réduit et aussi bien répartis dans l'espace, corrobore l'objectif indiqué dans les textes anciens, lorsqu'on insère des pots acoustiques dans les maçonneries des élévations pour « mieux faire résonner la voix ».

Aussi, contrairement aux interprétations des acousticiens du XX^e siècle qui, logiquement dans des espaces immenses, ne considéraient que le comportement absorbeur des pots, il semble ici que les constructeurs aient, empiriquement, trouvé une application plus en accord avec leurs convictions.

Remerciements

Les auteurs remercient J.-L. Billy, L. Philippon, N. Chouard de la société Head-Acoustics, l'ensemble Gilles Binchois, les chanteurs R. Melish, F. Fauché, E. Vistorky, G. Türk ainsi que tous les collègues qui se sont joints à l'expérience, la fédération de recherche CNRS Poitiers-Tours FESMAR, l'Université de Poitiers, la Ville de Noyon, Laurent Cessin et David Gadanho du service Patrimoine et Fabrice Reutenauer du service Archéologique le service d'archéologie et la municipalité de la ville de Noyon

Références

- [1] B. Palazzo-Bertholon and J.-C. Valière, *Archéologie du son*, Société française d'archéologie, suppl. Bulletin monumental, 5, ISBN : 978-2-901837-41-1, (2012).
- [2] J.-C. Valière and B. Palazzo-Bertholon, Analyse acoustique et archéologique du caveau phonocamptique de la Cathédrale de Noyon, *Congrès Français d'Acoustique*, Poitiers, 2014
- [3] B. Palazzo-Bertholon, J.-C. Valière et alii, Le caveau acoustique de la cathédrale Notre-Dame de Noyon, *Bulletin Monumental*, à paraître
- [4] Moët de la Forte-Maison, *Antiquités de Noyon*, 1845, Rennes, p. 319-322. Voir également Charles Seymour, *La cathédrale Notre-Dame de Noyon au XII^e siècle*, Bibliothèque de la SFA, n° 6, Paris, 1975, p. 56.
- [5] *La cathédrale de Noyon, cinq années de recherches*, Dir. A. Timbert et S.-D. Daussy, Sté Historique, Archéologique et Scientifique de Noyon, Noyon, 2011.
- [6] J.-C. Valière, B. Palazzo-Bertholon, J.-D. Polack and P. Carvalho, Acoustic Pots in Ancient and Medieval buildings: Literary analysis of ancient texts and comparison with recent observations in French churches, *Acta Acustica united with Acustica*, 99, No. 1, 70-8
- [7] M. Bruneau, *Manuel d'Acoustique Fondamentale*, Hermès, 2001
- [8] E. Palazzo, dans B. Palazzo-Bertholon, J.-C. Valière et alii, Le caveau acoustique de la cathédrale Notre-Dame de Noyon, *Bulletin Monumental*, à paraître
- [9] D. Fiala, « La musique à la cathédrale de Noyon », éd. C. Cavicchi, M.-A. Colin, Ph. Vendrix, *La Musique en Picardie du XIV^e au XVII^e siècle*, Turnhout, Brepols, 2012, p. 153-170.
- [10] W. C. Sabine, *Collected papers on Acoustics*, Harvard University Press, 1922.