

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



**Archéoacoustique expérimentale : le choix empirique des pots
acoustiques par leur géométrie et leur fréquence de résonance**

J.-C. Valière^a, B. Palazzo-Bertholon^b, D. Fiala^c, V. Zara^d et P. Brioist^c

^aInstitut PPRIME UPR 3346, CNRS-Université de Poitiers-ENSMA, B17, 6 rue Marcel Doré, 86022
Poitiers Cedex, France

^bCESCM, CNRS-UMR 7302, 24, rue de la chaîne, TSA 81118, 86073 Poitiers, France

^cCESR, CNRS-UMR 7323, 59, rue Néricault-Destouches, BP 12050, 37020 Tours, France

^dUMR ARTEHIS CNRS-UMR 6298, 6 Boulevard Gabriel, Bâtiment Sciences Gabriel, 21000 Dijon,
France

jean.christophe.valiere@univ-poitiers.fr

S'il est maintenant acquis sur la base d'une étude d'un large panel d'églises que l'implantation des pots dans les églises du moyen-âge et de l'époque moderne répondaient à certaines règles, il reste que les méthodes qui président à leur choix sont à l'état d'hypothèses toujours non vérifiées. A partir de l'étude de dispositifs bien conservés ainsi que de mentions écrites, il apparaît de façon certaine que le volume du pot est l'élément principale dans ce choix mais pas seulement. Des preuves nous montrent aussi que la géométrie du col (surface et longueur) a du pouvoir aussi être ajustée ou choisie. Lors de l'étape d'insertion, la plupart des auteurs s'accordent sur le fait que les pots devaient être choisis à l'oreille par tapotement sur le col et probablement comparés aux tonalités des voix chantées. La restauration d'un ensemble de pots à l'Abbaye des Anges (29) nous a permis de mettre en situation les différentes étapes du processus de choix des pots : définition du « cahier de charge », suivi de la fabrication, choix à l'oreille et implantation dans les murs. Cette mise en situation nous a permis de mieux entrevoir les difficultés pratiques et de valider certaines de nos hypothèses. Au-delà, elle permet d'avancer sur l'état des connaissances acoustiques empiriques des époques concernées.

1 Introduction

Depuis plus de 15 ans, nous effectuons un travail pluridisciplinaire sur la question des pots acoustiques insérés dans les murs et les voûtes des édifices religieux, le plus souvent, au Moyen-Âge et à l'Époque Moderne. L'orientation de cette recherche, dès le départ a été basée sur la question de l'intention des bâtisseurs d'agir sur l'acoustique à travers un choix raisonné des pots. Ces deux hypothèses, l'intention et le choix, constituaient pour nous le socle minimal à partir duquel, une recherche pouvait se conduire. De fait, ces deux hypothèses ont plutôt des statuts de postulat puisque jusqu'à présent nous ne cherchions pas à les démontrer, nos recherches précédentes visaient essentiellement à trouver des invariants ou au moins des règles d'implantation régulières.

En fait, il n'allait pas de soi que ces poteries soient d'un usage acoustique et, du fait du peu d'efficacité des dispositifs de la sorte, de nombreuses autres hypothèses ont vu le jour [1]. Cependant, nos recherches à travers les textes, les travaux étrangers et surtout les mesures de plus de 1000 pots effectuées sur près de 50 édifices français nous ont définitivement convaincu, qu'indépendamment d'une efficacité avérée, l'intention d'agir sur le son, au moyen de connaissances empiriques en cours aux époques considérées, était bien l'objectif des bâtisseurs.

Dans le présent article nous ne discuterons pas de la question de l'intention, nous la considérons comme vraie, une prochaine conférence étudiera plus précisément ce postulat [2]. Ici, nous allons essayer de déterminer ce qui dans nos mesures, nos investigations archéologiques et les textes disponibles nous apparaît comme un choix raisonné des pots. Pour cela, après l'introduction, un deuxième chapitre rappellera les principaux résultats de nos observations [3,4] puis un troisième exposera les connaissances empiriques que nous retrouvons à travers les textes médiévaux et renaissances issues des conceptions de l'antiquité. Dans un quatrième chapitre, la restauration de l'Abbaye des Anges (29) sera évoquée au cours de laquelle une expérience d'archéoaoustique a été menée. Pour cette expérience, à partir d'une centaine de pots élaborés ou restaurés par un potier, nous nous sommes mis en situation du choix des pots à l'oreille puis nous avons envisagé les différentes hypothèses quant à la méthodologie de choix survie par les moines de l'abbaye des Anges. Enfin, une conclusion sera proposée incluant des travaux à venir et les questions nouvelles qu'ouvre ce travail.

Avant de commencer l'exposé des travaux d'archéoaoustique rappelons quelques éléments fondamentaux qui ne furent connus qu'à partir de la fin du XIXe mais qui nous serviront de référence pour les comparer

aux déductions empiriques de l'époque historique. En supposant que les longueurs d'onde considérées sont beaucoup plus grandes que toutes les dimensions du résonateur, la fréquence de résonance dite de Helmholtz s'écrit

$$f_h = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V\ell}} \quad (1)$$

où c_0 est la célérité du son du milieu supposé au repos, $S = \pi r^2$ surface du col supposé cylindrique et de rayon r et V volume de la cavité, le plus souvent considéré comme cylindrique. La variable ℓ est plus complexe car elle regroupe la longueur du col ℓ_c dans l'hypothèse d'un col cylindrique, une longueur inertielle de sortie ℓ_e liée aux conditions de rayonnement, soit $\ell_e = 0,61r$ si le col débouche dans l'espace infini soit $\ell_e = 0,85r$, si le pot est inséré dans un écran infini, ce qui est le plus proche de la réalité puisque le col des pots sont affleurants des murs ou des voûtes. Ces coefficients connus depuis le milieu du XXe résulte de calculs analytiques et/ou numériques de l'impédance de rayonnement du col et ne sont valables qu'en basse fréquence. A l'intérieur de la cavité, le volume d'air oscillant subit aussi une longueur inertielle ℓ_i , mais celle-ci dépend fortement de la forme interne du pot. Plusieurs formulations ont été données [5, 6] pour corriger cette longueur. La question de cols non cylindriques a aussi été traitée dans la littérature récemment [7].

Dans beaucoup de nos calculs approchés, étant donné la diversité des situations rencontrées, nous prenons

$$\ell = \ell_c + \ell_e + \ell_i \quad (2)$$

avec $\ell_i = \ell_e = 0,85r$ si le col est relativement cylindrique. Nous utilisons la formule d'Ingard parfois lorsque la géométrie s'y prête (pot en forme de bouteille), l'expérience nous montre qu'elle affine les résultats dans ce cas.

L'amortissement lié à la résonance du pot est dû essentiellement à la partie réelle du rayonnement, celui-ci étant donc plus important pour des cols larges, et à l'état de surface à l'intérieur du pot.

Enfin, lorsque les fréquences sont plus élevées, il existe des fréquences de résonance qui ne sont pas harmoniques et qui dépendent très fortement de la géométrie interne. Nous les appellerons des partiels.

L'amortissement ou les partiels ne seront pas pris en compte dans l'analyse qui suit.

2 Observations

2.1 Fréquences et répartition spatiale

Nous avons eu l'occasion à maintes reprises d'exposer nos résultats issus de l'analyse statistiques de près de 50 édifices auxquels nous ajoutons des édifices Suisses et Allemands qui ont été étudiés de manière similaire [3,4].

Concernant le choix des pots, nous allons nous appuyer sur trois résultats qui montrent que rien n'est dû au hasard même si les motivations restent à mieux comprendre. Le premier est que les fréquences des pots sont en moyenne autour de 209 Hz et réparties sur une plage de 100 Hz à 500 Hz. Ce résultat avait déjà été observé par nos prédécesseurs [8].

Le second résultat que nous avons mis en exergue est qu'il existe souvent des répartitions raisonnées des pots selon leur fréquence. Nous distinguons 4 cas de figure :

- Les églises possédant un seul type de fréquence statistiquement seront dites « unimodales » ;
- Les églises, très fréquentes, possédant 2 groupes de fréquences statistiques différenciés par leur fréquence centrale, seront dites « bimodales » ;
- Les églises possédant plusieurs groupes de pots de fréquences bien distinctes, seront appelées « réparties discontinues » ;
- Les églises possédant une répartition fréquentielles large seront appelées « réparties continues ».

Le troisième résultat concerne la répartition fréquentielle des pots dans l'espace. Nos observations montrent que dans tous les cas autre que unimodal, les pots de haute fréquence sont majoritairement situés plus haut que ceux de basses fréquences. D'autre part, nous observons également que les pots en basses fréquences sont davantage situés du côté gauche lorsque l'on regarde le cœur (côté nord lorsque l'église est orientée selon la coutume) tandis que les pots en hautes fréquences sont davantage du côté droit.

Ces caractéristiques sont souvent encore mieux affirmées dans les édifices monastiques par rapport aux édifices paroissiaux. Les fréquences moyennes des églises monastiques sont beaucoup moins dispersées autour de 175 Hz avec un écart-type de 53 Hz (alors que pour les paroissiales la moyenne est de 240 Hz avec un écart-type de 101), les pots sont ensuite majoritairement dans le cœur, elles ont de surcroît des groupes de pots bien déterminés par leurs fréquences de résonance et enfin l'organisation spatiale des pots est plus régulière. L'exemple le plus frappant est le caveau dit « phonocamptique » de la cathédrale de Noyon qui présente toutes ces régularités, ce qui nous a fait écrire qu'il devait être une sorte de dispositif expérimental [9].

2.2 Géométrie des pots

L'observation la plus fréquente est que le volume est la variable de réglage de la fréquence. Noyon est encore à ce propos le plus singulier. Nous avons eu l'occasion de montrer qu'à Noyon que sur les 64 pots, les répartitions des longueurs des cols et des surfaces des cols suivaient des lois statistiques unimodales alors que la hauteur des pots suit une loi bimodale comme la fréquence [9]. Notons que les pots, à l'exception de deux, sont exactement de même type en termes céramologiques. Ce sont des pichets typiques du Beauvaisis dont la forme, terre et glaçure sont identiques. Seule la hauteur diffère selon le groupe de pots. L'observation archéologique montre donc dans ce cas que

c'est le volume du pot qui permet l'accord « statistique » en quarte.

Si Noyon est un exemple frappant, qu'en est-il des autres églises ? Nous n'avons pas toujours eu accès aux pots eux-mêmes mais nous pouvons citer comme autres exemples, l'abbatiale de Pommiers en Forez (40) où les deux types de pots sont de forme sphérique à large ouverture avec deux diamètres de sphères différents où encore, nous y reviendrons, à l'Abbaye des Anges de Landéda (29) où l'on ne trouve pas moins de 5 pots de type globulaire de volumes différents mais de cols quasi identiques.

Concernant le réglage de la fréquence en fonction du col, les observations sont plus mitigées. Néanmoins, nous savons pu observer que lorsque les pots ne convenaient pas, les promoteurs de la technique bouchaient l'orifice initial et perçaient l'orifice souhaité au moyen d'un poinçon probablement. On observe cette pratique dans les pots situés à Quinçay (86) où l'on remarque encore des encoches de l'outil ou à Saint Martin d'Angers (49) [1]. Dans cette dernière église les pots en haute fréquence sont dans les voûtes et sont utilisés comme habituellement, les pots dans les murs, en basse fréquence ont vu leur fréquence modifiée par perçage d'un trou, les deux groupes de pots formant une quinte assez précise. Cette technique est aussi attestée en Serbie [10].

Il apparait donc que le réglage de la tonalité des pots peut se faire soit par le volume soit par l'élargissement de la surface. En revanche, rien ne nous indique encore qu'ils aient pu être choisis par la longueur du col bien qu'à l'Abbaye des Anges, nous ayons eu l'impression que les cols étaient ajoutés a posteriori.

3 Mentions écrites portant que la question du choix

Dans la tradition aristotélicienne de l'acoustique, les pots appartiennent à ce qui est nommés les corps creux [11]. Saint Thomas d'Aquin qui reprend cette théorie basée sur l'analogie entre propagation du son et le suivi d'une balle affirme que « *par répercussion il se fait plusieurs coups et le son s'en trouve multiplié. [...] Les corps creux produisent, par répercussion, une série de chocs à la suite du premier, l'air qui a été mis en mouvement étant dans l'impossibilité de s'échapper* » [12]. Donc, les corps creux sont réputés amplifier le son mais rien ne stipule la notion de résonance.

Ceci étant, depuis Pythagore, l'on sait que lorsque la taille d'un objet augmente, la note jouée est plus basse. L'histoire de la facture instrumentale montre que ces principes étaient déjà en cours aux époques d'implantation des pots. Il s'agissait donc probablement d'une connaissance partagée.

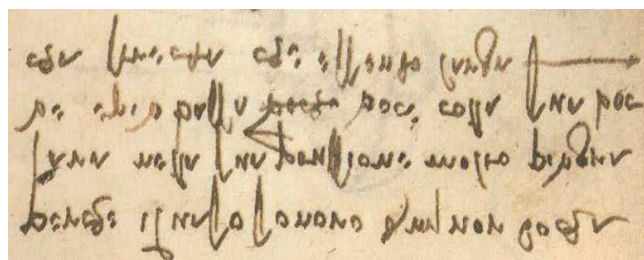


Figure 1: Fac-simile d'un manuscrit de Leonardo Da Vinci « *Perché il vaso sonoro di minor bocca arà nella sua percussione molto più grave e più bassa voce colla sua bocca stretta che essendo larga* »

Lorsqu'au début du XVI^e siècle, Leonardo se demande « *Pourquoi le vase sonore à petit col produit-il à la percussion un son beaucoup plus grave et bas avec le col étroit qu'un col large ?* », on a l'impression qu'il observe une propriété qui ne semble pas être connue [13]. Cette interrogation montre que Leonardo et peut-être d'autres érudits avaient observé le fait que la surface du col joue un rôle dans la hauteur de la note. Cette observation lui apparaît de surcroît comme contre-intuitif. En effet, ce qui s'élargit doit donner des fréquences plus basses or dans le cas des pots, cela reste vrai pour le volume mais pas pour l'embouchure. Les tendances que décrivent l'équation (1), bien connues aujourd'hui, semblaient susciter des interrogations car elles étaient observées empiriquement.

A ce stade, même si notre propos ici n'est pas de gloser sur les intentions des bâtisseurs, il est important de redire, qu'aucune mention textuelle n'indique que les pots aient été insérés pour absorber le son mais bien au contraire pour l'amplifier comme l'expression « faire résonner plus fort » qui est fréquemment d'usage le suggère. Ainsi les mentions écrites provenant de potiers, de maçons ou de chroniques d'abbaye indiquent toutes que l'amplification de la voix semblait la cible de l'usage des pots. Les promoteurs de cette technique donnaient des ordres relativement précis comme celui qui est conservé dans les comptes du chapitre de l'église de Saint-Denis de Vergy en Bourgogne, pour l'année 1616 « *Payé 24 sols au tulinier de Belon pour trois douzaine de pots pour mettre dans la muraille du chœur, propres à faire raisonner la voix* » [14]. Nous n'avons pas aujourd'hui de mentions explicites qui stipuleraient que des commandes aient été faites sur la base de volumes différents. C'est donc l'analyse croisée des mesures acoustiques et des observations archéologiques qui permette de le déduire.

4 Archéoacoustique expérimentale

4.1 l'Abbaye des Anges

L'Abbaye des Anges a été fondée en 1507 par une communauté de franciscains. L'abbatiale possède en son sein l'une des plus grandes, voire la plus grande, collection de pots acoustiques dans ces murs, soit environ 110.



Figure 1: Photo de l'Abbaye des Anges

Vendu comme bien national à la révolution, le monastère a perdu toute ses archives et fut transformé en hôtel au milieu du XIX^e siècle. L'abbaye s'est progressivement dégradée

jusqu'à ce que les propriétaires actuels décident, il y a plus de 10 ans, de restaurer l'ensemble du monastère et en particulier l'abbatiale. Les pots étaient pour la plupart cassés ou disparus

Nous travaillons sur ce projet depuis 2015. Nos objectifs étaient doubles, d'une part, profiter des travaux et des échafaudages pour réaliser une étude archéologique, céramologique et acoustique complète pour faire des propositions de restauration aux propriétaires, d'autre part se mettre en situation de rétablir l'ensemble du dispositif sur les bases de l'analyse scientifique pour en appréhender toutes les difficultés.



Figure 2: Photos de quelques pots dans le mur sud de la nef de l'Abbaye des Anges; de gauche à droite, pot entier, pot dont le col est cassé, pot dont il ne reste qu'un tesson

Nous avons déjà décrit le dispositif dans une précédente conférence aussi reprenons-nous ici les principales conclusions [15]. L'étude céramologique a montré que l'abbatiale comprenait sept types de pots caractéristiques dont nous avons estimé les fréquences de résonance au moyen d'observations sur les rares pots intacts, de calculs analytiques et de simulations numériques par extrapolation des géométries. La synthèse des résultats est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1: Types de pots et leur fréquence (f_0) moyenne estimée à partir des pots encore intacts et des reconstitutions de pots cassés

Type de pots	A1	A2	A3	A4	A5	B	C	D
f_0 (Hz)	263	189	241	231	264	217	186	185

Cette église semble donc appartenir à la catégorie « répartie discontinue ». Les pots semblent décrire un ensemble de fréquences de 190 Hz à 260 Hz de manière discrète. Si l'analyse céramologique décrit sept types de pots, la proximité fréquentielle des types A3 et A4 et des type A1 et A5 permet de les regrouper 3 pertinents. Nous sommes face à une problème d'interprétation entre deux disciplines, céramologie et acoustique, qui ont volontairement travaillé de manière indépendante pour ne pas biaiser chacune de leurs conclusions.

Notons que l'observation archéologique est ici fondamentale car une étude acoustique aveugle sur les 20 pots ferait davantage apparaître un continuum qu'une progression discontinue.

Les pots de type B, C et D n'ont pas été réalisés initialement pour l'acoustique car ils sont mieux finis et semblent avoir été utilisés pour contenir et transporter des liquides. En revanche, sur le plan acoustique, nous pouvons les regrouper avec le pot A2 (en basse fréquence). Les pots A2 sont assez peu représentés aussi nous supposons qu'en raison de leur grande taille (et de leur fragilité induite) les

moins ont changé leur stratégie et ont inséré des pots de plus petite taille mais avec un col plus étroit et/ou plus long (pour le type D). Si cette interprétation est correcte, ce serait le premier exemple à notre connaissance d'un choix basé sur le col complet (surface et longueur).

Pour tester ces trois catégories de pots en relation avec la voix et le chant, nous avons réalisé une prise de son d'un chant religieux de la période considérée. Le chanteur (David Fiala, co-auteur du présent papier) avait un microphone à un mètre de distance et trois autres microphones étaient insérés dans chaque pot défini par l'analyse archéacoustique. Deux prises de sons ont été effectuées, l'une d'un chant grégorien (*Victimae paschali laudes*, séquence de la messe du dimanche de Pâques, datant probablement du X^e siècle) et l'autre d'une montée chromatique comme montrée sur la figure 3

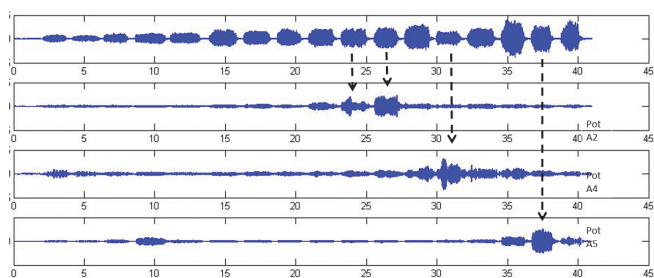


Figure 3: signal temporel (non-traité) d'une montée chromatique ; ligne du haut micro face au chanteur, seconde ligne réponse d'un pot type A2 (189 Hz, ~Sol2), troisième ligne réponse d'un pot type A4 (225 Hz, ~La2) et dernière ligne réponse d'un pot type A5 (263 Hz, ~Do3)

Sans que l'on l'anticipe quoi que ce soit, nous avons remarqué que la tessiture du chant se situait autour des fréquences des pots testés (autour de 200-250 Hz). Sur la figure 3 qui représente la montée chromatique, on s'aperçoit qu'il s'agit des notes de Sol2 à Do3, soit typiquement une tessiture de ténor.



Figure 4 : Premiers prototypes des sept pots réalisés par le céramiste Michel Le Gentil.

A partir des observations et de nos estimations, nous avons défini un cahier des charges pour la réalisation et de la restauration des pots endommagés. Concernant ce dernier point, le conservateur de la Direction Régionale des Affaires Culturelles de Bretagne a demandé aux propriétaires de

conserver le maximum de témoignages archéologiques dans les murs pour les générations futures.

4.2 Fabrication des pots

Expérimentalement, même pour des ensembles de pots très cohérents, nous avons observé sur notre corpus qu'il est impossible d'avoir une dispersion inférieure à 5% sur la fréquence de résonance, cette précision étant estimée par le rapport de l'écart-type sur la fréquence moyenne. Seul le cas de l'abbaye de Melleray (44) dans nos mesures est meilleur (3%) mais il s'agit de bouteilles en verre dont on peut supposer que la reproductibilité est facilitée. Dans nos études, lorsque nous n'avons pas d'accès direct aux pots, nous prenons 10% de dispersion comme premier critère de la présence de plusieurs types de pots à fréquences différentes puis nous appliquons pour chaque sous-échantillon un critère du χ^2 pour vérifier l'homogénéité de l'échantillon. Ainsi lorsque que nous parlons d'accord entre deux groupes de poteries, cet accord ne doit pas être entendu au sens d'un accord entre deux chanteurs par exemple mais en moyenne.

La première question concernant la fabrication est l'anticipation de la taille et de la forme géométrique des pots. D'une manière générale Les chroniques d'abbayes ou les livres de comptes retrouvés montrent bien que les pots ont été commandés explicitement aux potiers et donc qu'il devait y avoir un choix préalable. Il est possible de supposer que les pots ont été choisis sur la base d'échantillons dans l'échoppe du potier. Une des surprises de l'Abbaye des Anges c'est que les pots, visiblement fabriqués pour un usage acoustique, donnent l'impression que le col a été ajouté dans un second temps avant cuisson.

La seconde question est la reproductibilité des pots. Reproduire exactement la même poterie artisanalement semble être délicat même avec une grande expérience. Un des problèmes est qu'il existe un coefficient de rétraction entre le pot encore humide et le pot cuit de l'ordre de 6% pour une argile courante. Le pot est d'abord séché puis cuit au four puis dans le cas où il est décoré ou glaçuré, il est recuit. Dans le cas de l'abbaye des Anges, les pots ne sont pas glaçurés et ne doivent avoir été cuits qu'une fois. Cette rétractation est connue depuis longtemps, mais elle reste relativement aléatoire et peut être inégale selon la qualité de la terre et des parties du pot.

Tableau 2 : Analyse des variations de fabrication des pots réalisés par le potier ; N est le nombre d'échantillon, $\Delta f/f_c$ (Hz) est le différence de la fréquence moyenne des pots reconstruits avec la fréquence cible f_c en valeur absolue du pourcentage ; σ_f/f_m (%) l'écart-type des pots reconstruits par rapport à la fréquence moyenne

Type de pots	A1	A2	A3	A4	A5	B	C	D
N	8	1	14	18	12	7	1	4
$\Delta f/f_c$ (%)	17	8	8	10	16	18	13	4
σ_f/f_m (%)	3,7	/	4,6	4,9	4,3	3,2	/	6,9

Les nouveaux pots de l'Abbaye des Anges ont été fabriqués par un céramiste expérimenté, Michel le Gentil. La

figure 4 montre les prototypes qui, après mesure et confirmation, ont servi de base à la réalisation d'un grand nombre d'entre eux.

Le tableau 2 reporte les résultats obtenus après mesure de leur fréquence. Ce qui frappe d'emblée c'est l'écart entre la consigne (f_c) donnée et la réalisation. Nous avons des écarts qui peuvent aller jusqu'à 20%. Il semble donc qu'il soit difficile d'anticiper la fréquence moyenne des pots. Un simple calcul basé sur un coefficient de rétraction de 6% sur toutes les dimensions donne, dans le cas d'un pot en forme de sphère, 6% d'erreur sur la fréquence de Helmholtz. Les données sont nettement supérieures, ce qui peut faire penser que le coefficient de rétraction est supérieur mais cela n'explique pas les valeurs obtenues. A cette erreur naturelle liée à la cuisson, l'expérience nous a montré qu'il était difficile de transmettre des consignes géométriques précises sans outil moderne. L'erreur est probablement majorée par ce fait.

En revanche, la réalisation d'une série de pots tournés par le potier dans un laps de temps relativement court amène, après cuisson, une dispersion de l'ordre de 5% autour de la fréquence moyenne constatée (f_m). Le potier, sur la lancée de sa réalisation, produit des pots relativement similaires en taille et nous l'avons observé sur toutes les séries sans exception. Il est singulier de remarquer que cette dispersion se situe généralement autour de 5%, c'est-à-dire exactement celle que nous avons pu constater sur des ensemble cohérent de pots insérés dans les murs qui nous semblaient de même facture.

A posteriori, ce critère de 5% est donc fondé et cela corrobore l'assertion que nous avons émise, que produire des pots accordés à la perfection n'est pas réalisable techniquement avec des moyens artisanaux. Ainsi même si l'intention des moines était d'avoir deux groupes de pots « accordés » en quarte (ou en quinte), cet accord ne doit se comprendre que sous un angle statistique.

Cependant, une fois les pots fabriqués, les moines pouvaient très bien les choisir par l'écoute et nous nous sommes livrés à cette expérience.

4.3 Archéoacoustique expérimentale

Il semble donc que les bâtisseurs des Anges possédaient des notions empiriques de la fréquence (par la note émise) en fonction de la géométrie par action sur le volume de façon certaine et sur le col de façon probable. La question de la méthodologie du choix reste ouverte. En accord avec A. Tallon, il est fort probable que le choix se faisait en tapant sur l'orifice, qui est l'une des meilleures façons de faire sonner un pot [16]. Chanter à proximité du col est une expérience qui devait être connue mais qui est plus difficile à conduire ainsi nous écartons temporairement cette possibilité.

Notre choix s'est donc porté sur la percussion de l'embouchure. Le protocole de l'expérience est le suivant :

- Les pots sont livrés sans être mesurés ;
- Ils sont classés par ordre de fréquence croissante en tapant sur l'embouchure. Il n'y a pas de contrainte de temps ;
- Ceux qui semblent avoir la même fréquence sont regroupés ;
- Les fréquences sont mesurées et les données sont finalement analysées.

Disons d'emblée qu'il ne s'agit pas d'une expérience psychoacoustique en tant que telle. En effet il y a beaucoup trop de biais potentiels comme le faible nombre de

participants (2 et 3), la non-répétabilité du signal d'excitation ou le local de test. Il s'agit simplement d'une expérience de réalisation de choix des pots dans des conditions historiques, les résultats de psychoacoustique fournissant en revanche les moyens d'interpréter les données.

L'expérience a été conduite pour plusieurs séries de pots de même type, réalisées et cuites en même temps. Une fois classés et mesurés, nous calculons des coefficients de corrélation entre l'ordre trouvé et la fréquence. L'expérience a été conduite deux fois dans un intervalle de 4 mois. Les coefficients de corrélation se situent entre 0,65 et 0,85 pour la première campagne et entre 0,78 et 0,96 à la seconde campagne. Il semble que nous nous sommes améliorés, ce que nous avons ressenti au cours de l'expérience. Quoi qu'il en soit, les niveaux de corrélations sont élevés et il apparaît qu'avec des capacités auditives bonnes (sans être exceptionnelles), il est très facile de classer des pots par cette méthode, ce qui la valide à nos yeux.



Figure 4: Classement par l'audition des pots de même type, séché et non cuit, par fréquence croissante perçue de gauche à droite.

En s'appuyant sur les résultats de la psychoacoustique [17], à 200 Hz et au niveau sonore considéré, l'erreur fréquentielle est d'environ 1,5%, soit 3 Hz. À 300 Hz elle est d'environ 0,75% soit 2,25 Hz. Pour la plupart des expériences, nos indéterminations dans le choix des pots se situait dans la fourchette de 2 à 4 Hz environ ce qui est conforme à ces résultats. Cependant dans certains cas notre erreur fut beaucoup plus importante, de l'ordre de 10 Hz. Une des explications possible est que la structure spectrale en hautes fréquences et notamment l'amplitude des partiels « attire » la sensation de hauteur vers le haut. Parfois, il est même assez difficile de se concentrer sur la fréquence basse lorsque les pots présentent des partiels de forts niveaux. Avec l'entraînement cependant, cette perception est améliorée.

Il est donc fort probable qu'après fabrication certains pots étaient écartés et d'autre choisis. L'hypothèse que les pots de différentes formes soient choisis pour appartenir au même groupe de fréquences comme il a été observé à l'Abbaye des Anges ou dans la cathédrale de Noyon, est donc plausible.

5 Conclusion

Le choix des pots acoustiques par les bâtisseurs Médiévaux et Renaissants est resté longtemps une question ouverte. En effet, prouver que les pots ont été choisis n'est

possible que s'il existe des invariants ou des régularités dans l'implantation de ceux-ci.

A partir de l'étude d'un nombre important d'édifices sur le territoire français, il a été montré que les pots étaient choisis selon leur fréquence de résonance, et disposés majoritairement de manière raisonnée.

Sur le corpus d'églises analysées, le choix de la fréquence est généralement basé le volume des pots. Cependant, de nombreux signes archéologiques montrent aussi que les bâtisseurs devaient connaître le rôle du col sur la fréquence de résonance et plus particulièrement l'effet de la surface. Une mention manuscrite de Leonardo corrobore ces observations.

Dans le cadre de la restauration de l'ensemble de pots de l'Abbaye des Anges, une expérience a été conduite dans des conditions proches des époques Médiévales et Modernes. Celle-ci a conforté les résultats des observations précédemment obtenues sur le corpus. En particulier, la fabrication des pots sur cahier des charges au moyen de techniques anciennes donne une dispersion des fréquences très proche de celles observées sur le corpus d'église in situ.

L'ensemble des données recueillies ainsi que l'expérience de mise en situation illustre le fait qu'un choix délibéré des pots par leur fréquence (note émise) a pu parfaitement être réalisé.

Remerciements

Nous remercions Christian Prax pour les simulations numériques, Karin Le Tyran de la société AIDA et Mathieu Dupont stagiaire de l'ENSIM pour leur assistance lors des essais, Michel Le Gentil pour s'être prêté à l'expérience et Robert et Chantal Tétré propriétaires de l'Abbaye pour leur accueil et leur aide de tous les instants.

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, P. Carvalho, B. Palazzo-Bertholon, D. Fiala D., V. Zara, E. Dupuy & J.-D. Polack., On the intention to modify sound propagation in medieval and modern worship places: the case of the Abbaye de Montivilliers, 24th Annual Meeting of the European Association of Archaeologists (EAA), Barcelona, 5–8 September 2018
- [3] 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, 2013.
- [4] J.-C. Valière., B. Palazzo-Bertholon., "Towards a history of architectural acoustics using archaeological evidence: Recent research contributions to understanding the use of acoustic pots in the quest for sound quality in 11th—17th-century churches in France", in "*Worship Place*" Lavandier C. and Guillebaud C. (Ed.), Routledge, London. To be published 2018
- [5] U. Ingard., « On the theory and design of acoustic resonators », *J. Acoust. Soc. Am*, 25(6), 1037–1061, novembre 1953.
- [6] M. Alster, « Improved calculation of resonant frequencies of helmholtz resonators », *J. Sound and Vibration*, 24(1) :63–85, 1972.
- [7] J.-F., Mercier, J.-J. Marigo, & A. Maurel, « Influence of the neck shape for Helmholtz resonators », *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142, pp. 3703-3714, 2017.
- [8] R. Floriot, *Contribution à l'étude des vases acoustiques du Moyen Âge*, Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 1964 (ms. dact.).
- [9] J.-C. Valière, B. Palazzo-Bertholon, D. Fiala & V. Zara, (2016) « L'effet des pots acoustiques du caveau phonocamptique de la Cathédrale de Noyon : analyse modale et performance chantée », *13e Congrès Français d'Acoustique joint avec le colloque Vibrations, SHocks and NOise*, Le Mans, (France), pp. 1645-1651. ISBN: 978-3-200-03433-4
- [10] M. Mijic & D. Sumarac-Pavlovic, 2004. "Analysis of Contribution of Acoustic Resonators Found in Serbian Orthodox Churches", *Building Acoustics* 11 (3): 197-212, 2004
- [11] Aristote, *De l'âme*, texte établi par A. Jannone, traduction E. Barbotin, Paris (2000).
- [12] Thomas d'Aquin, *Commentaires au Traité de l'Âme*, leçon 16, (Trad. Y. Pelletier, Université Laval, Québec, 2000).
- [13] Leonardo Da Vinci, Manoscritti di Francia, Manoscritto L, folio 0063r, <http://www.leonardodigitale.com/>
- [14] Anonyme, Comptes du chapitre de St Denis de Vergy, p. 431, 556, 598, 882, 1092, 1107, (1616),
- [15] J.-C. Valière, B. Bertholon-Palazzo & N. Barone, « An example of the restoration of a Monastic Churches with acoustic pots: L'Abbaye des Anges of l'Aber-Wrach (Britany) », *Acoustics '17 Boston*, Boston USA, 2017
- [16] A. Tallon, "Acoustics at the Intersection of Architecture and Music: The Caveau Phonocamptique of Noyon Cathedral", *Journal of the Society of Architectural Historians* 75 (3): 263–280.
- [17] M. Castellengo, *Écoute Musicale et Acoustique*, ed. Eyrolles, Paris (2015).