



HAL
open science

Analyse de signaux enregistrés sur l'orgue de l'église St-Vincent à Roquevaire

Emmanuel Friot

► **To cite this version:**

Emmanuel Friot. Analyse de signaux enregistrés sur l'orgue de l'église St-Vincent à Roquevaire. [Rapport Technique] CNRS - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. 2021. hal-03566694

HAL Id: hal-03566694

<https://hal.science/hal-03566694v1>

Submitted on 11 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de signaux enregistrés sur l'orgue de l'église St-Vincent à Roquevaire

Emmanuel Friot

CNRS - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique - Marseille

août 2021

1. Étalonage des microphones omnidirectionnels
2. Analyse du bruit de fond
3. Réponses Impulsionnelles et Temps de Réverbération
4. Caractérisation du diapason et du tempérament
5. Spectre de quelques notes
6. Remarques finales

Ce document présente une analyse physique de plusieurs des signaux enregistrés par le LMA le 3 août 2021 autour du grand-orgue de l'église St-Vincent de Roquevaire.

Le dispositif utilisé et les signaux recueillis ce jour-là sont présentés dans le compte-rendu des enregistrements diffusé précédemment. Les fichiers *.wav* utilisés dans les calculs ci-dessous ont été rendus accessibles en ligne en parallèle à ce document. La numérotation des fichiers enregistrés, avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz et une résolution de 24 bits, et leur contenu sont également présentés dans le compte-rendu précédent. Dans le document présent on fera référence aux fichiers *PCB_xxx.wav* et *KM183_xxx.wav* qui désignent les enregistrements recueillis par les deux microphones omnidirectionnels du dispositif, les numéros *xxx* renvoyant au tableau figurant dans le document précédent.

1 Étalonage des microphones omnidirectionnels

Deux des six microphones utilisés pour les enregistrements sont des capteurs omnidirectionnels qu'il convient d'étalonner pour obtenir un niveau absolu de la pression acoustique qu'ils recueillent.

Une fois le dispositif installé à St-Vincent et tous les gains des chaînes de mesure figés, compte tenu du niveau d'excitation envisagé avec l'orgue et la source acoustique du LMA, le microphone de mesure 1/2 pouce PCB a été étaloné en l'introduisant dans un « pistonphone » qui soumet sa membrane, à la demande pendant une vingtaine de secondes, à un signal acoustique de niveau 94 dB à 1000 Hz. Deux séquences d'excitation ont conduit aux fichiers *PCB_052.wav* et *PCB_054.wav*. Le calcul de la valeur quadratique moyenne de différents extraits de ces deux fichiers conduit à une valeur de gain égale à 3,63 Pa, avec une précision supérieure à 0,01 Pa, à appliquer aux données des fichiers *.wav* pour obtenir le niveau de 1 Pa sur le microphone PCB.

Une procédure rigoureuse d'étalonage du microphone Neumann KM 183 n'a pas été appliquée à St-Vincent. Le LMA ne dispose pas de pistonphone adapté à ce micro et la hauteur à laquelle il était installé ne permettait pas de placer à proximité un sonomètre pour calculer par comparaison un gain spécifique. Pour afficher des valeurs en Pa dans les figures ci-dessous on a arbitrairement décidé d'appliquer également un gain de 3,63 Pa aux fichiers *KM183_xxx.wav*. Lors des prochaines mesures en église on s'efforcera de déterminer un gain moins arbitraire en déplaçant ponctuellement le microphone à un endroit qui permette une comparaison avec un sonomètre.

2 Analyse du bruit de fond

Un niveau de bruit stationnaire fluctuant entre 55 et 60 dB a été relevé au sonomètre dans l'église, orgue et lumières éteints. Ce niveau nous a surpris au premier abord dans la mesure où l'ambiance sonore de l'église

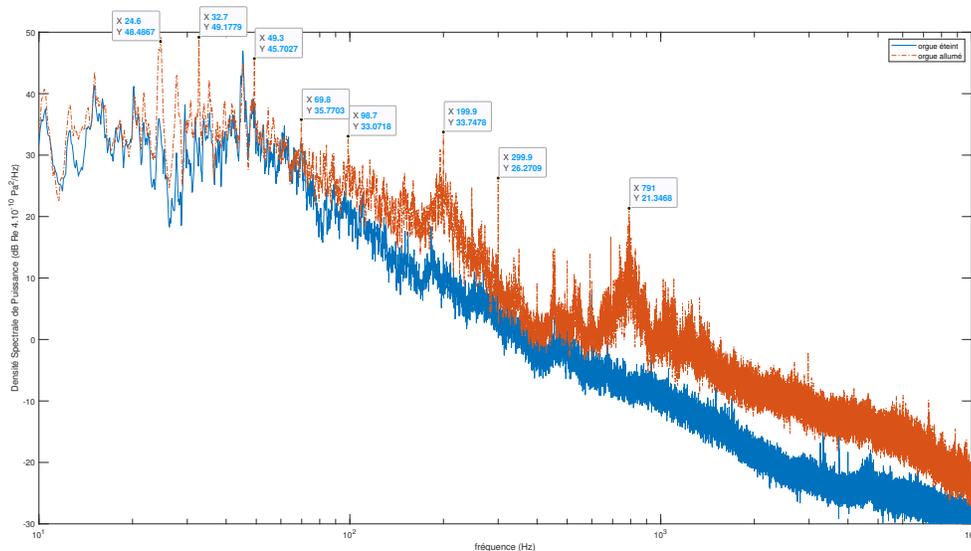


FIGURE 1 – Densités Spectrales de Puissance du bruit de fond sur le micro PCB

semblait très calme, seul un bruit sourd de trafic routier étant perceptible. Le relevé d'un niveau fluctuant entre 25 et 30 dB(A) nous a confirmé que le niveau du bruit de fond était essentiellement dû à des basse fréquences relativement peu audibles.

Une fois l'orgue mis en marche, des niveaux de 59 dB et 40 dB(A) ont été relevés. Subjectivement la soufflerie de l'orgue est parfaitement audible mais beaucoup moins gênante que dans l'église St-Louis de Toulon où l'on a précédemment fait des enregistrements.

Le bruit dans l'église, orgue éteint puis allumé, a été enregistré pendant environ 2mn (fichiers respectifs 049 et 051).

La figure 1 montre les Densités Spectrales de Puissance (DSP) du bruit de fond sur le microphone PCB, estimées par la méthode de Welch (*cf.* [1]) à partir des données de ces fichiers. Pour le calcul, des périodogrammes de 10 s, un taux de recouvrement de $\frac{3}{5}$ et une résolution fréquentielle de 0,1 Hz ont en pratique été utilisés avec la fonction *pwelch* de la *toolbox Signal Processing* du logiciel Matlab®.

On peut constater sur la figure 1 que le bruit dû à l'orgue se caractérise classiquement dans le domaine fréquentiel d'une part par des « raies », dont quelques fréquences sont repérées sur la figure, probablement dues aux éléments tournants du système de ventilation, d'autre part par une composante large bande liée aux bruits d'air. Les raies qui apparaissent en dessous de 20 Hz, orgue éteint comme allumé, sont plus délicates à interpréter. Il peut s'agir de l'amplification de composantes plus ou moins stationnaires du bruit de fond par des « modes acoustique » de l'église; avec une longueur de l'ordre de 38 m, la première fréquence de résonance de l'église doit se situer à un peu moins de 5 Hz. Les pics observés à très basse fréquence peuvent aussi être liés aux passages de certains véhicules pendant les enregistrements. Un enregistrement du bruit de fond sur des durées nettement plus longues, à différents moments de la journées et à l'intérieur comme à l'extérieur de l'église, serait nécessaire pour en affirmer plus.

Des observations similaires à celles faites à partir du micro PCB peuvent être faites à partir des enregistrements sur le micro KM 183.

3 Réponses Impulsionnelles et Temps de Réverbération

Une source acoustique auxiliaire (Bruël & Kjaer 4292L) a été utilisée dans l'église St-Vincent pour y estimer des Réponses Impulsionnelles (RI) acoustiques permettant de calculer ensuite des indicateurs usuels en acoustique des salles tels que des temps de réverbération. La figure 2 montre la source installée quelques mètres devant l'orgue.

Des signaux sinusoïdaux dont la fréquence instantanée varie exponentiellement entre 20 et 20000 Hz en une vingtaine de secondes ont été diffusés par cette source. Les signaux alors enregistrés par les microphones (fichiers 050) permettent ensuite un calcul des Réponses Impulsionnelles entre la source et ces micros. Les signaux particuliers utilisés (des *synchronized swept sines*) et le détail des calculs mis en œuvre sous Matlab sont présentés dans [2].



FIGURE 2 – La source Bruël & Kjaer 4292L installée devant l’orgue

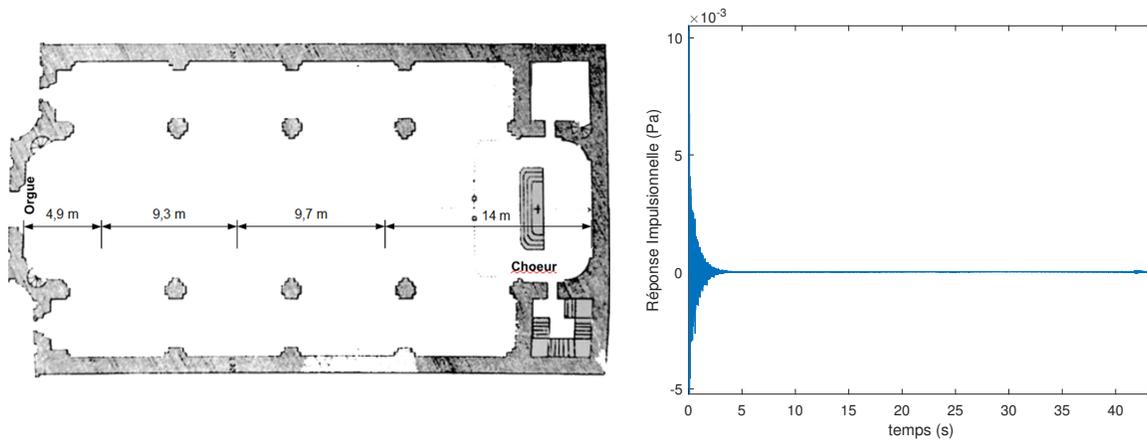


FIGURE 3 – Schéma d’implantation des transducteurs et Réponse Impulsionnelle entre la source B&K et le micro PCB

Trois signaux séparés de 10 secondes de silence ont été utilisés afin de vérifier la stabilité du calcul des RI.

La figure 3 montre les distances entre la porte de l’église et, de gauche à droite, la position de la source B&K, la position du micro KM 183 et la position du micro PCB. La figure montre aussi la totalité de la RI estimée entre la source et le microphone PCB. La deuxième moitié de la RI contient les composantes non causales qui peuvent physiquement être présentes dans la RI (par exemple un retard qui n’est pas un nombre entier de périodes d’échantillonnage est associé à une RI en partie non causale) mais, avec la procédure utilisée pour estimer la RI, elle peut également caractériser les sources de non-linéarité présentes dans la chaîne électro-acoustique, à commencer par la distorsion par les haut-parleurs. Un zoom sur la RI au delà de 40 s montre clairement deux « échos » de la tête de la RI qui révèlent effectivement une contribution non linéaire dans la chaîne de mesure.

La figure 4 montre un zoom sur la tête de la RI. Les premières 54 ms correspondent bien au temps de propagation acoustique sur environ 19 m entre la source et le micro. Le premier pic à 54 ms correspond au « champ direct » et le second pic à 56 ms à la réflexion spéculaire sur le sol (au champ direct produit par l’image de la source B&K par rapport au sol). Les pics suivants à partir de 82 ms correspondent aux réflexions franches, sur la porte, de la source et de son image par rapport au sol. Compte tenu des distances, rappelées en figure 3, la première réflexion sur le mur derrière le chœur se produit autour de 133 ms. Le pic observé à 107 ms est probablement associé à la réflexion sur l’autel et les marches devant lui.

La figure 5 montre la courbe de décroissance de l’énergie obtenue en substituant au carré d’un coefficient de la RI la somme des carrés des coefficients postérieurs. Cette substitution initialement proposée par Schroeder [3] permet de représenter une décroissance de l’énergie sans les oscillations présentes dans la RI. L’asymptote horizontale résulte

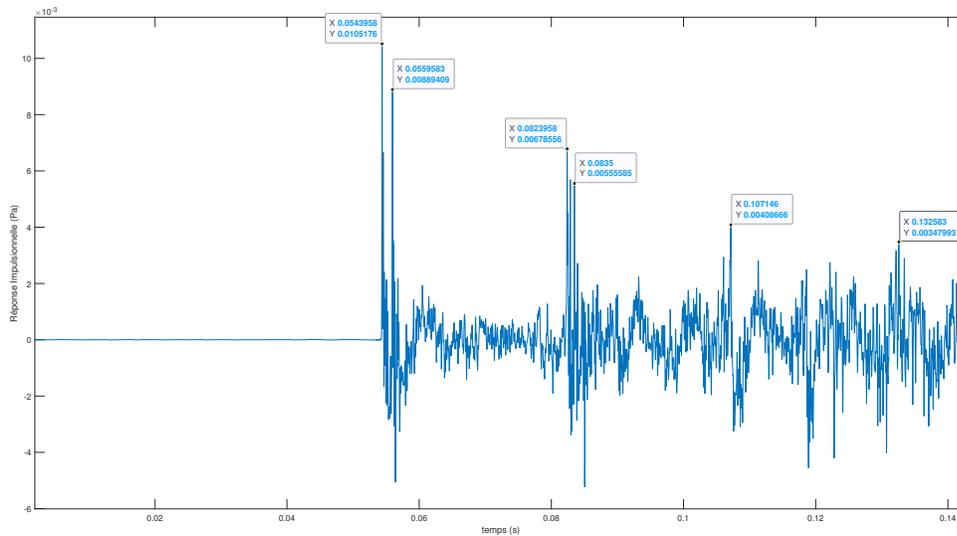


FIGURE 4 – Réponse Impulsionnelle entre la source B&K et le micro PCB

des coefficients non négligeables qui apparaissent au delà de 40 s dans la RI calculée. La partie rectiligne pour les instants inférieurs à 2 s montre que l'énergie décroît initialement bien de façon exponentielle. Une régression linéaire sur cette partie rectiligne, pour les instants 0,1 s et 2 s, conduit à une droite de décroissance avec une pente de 11,43 dB/s; du coup le « temps de réverbération » RT60, nécessaire à une décroissance de l'énergie de 60 dB, vaut 5,25 s.

Des calculs analogues effectués à partir du signal enregistré sur le micro KM183 ont conduit à la valeur de 5,29 s pour le RT60. On peut donc raisonnablement chiffrer le temps de réverbération de l'église St-Vincent à $5,3 \pm 0,1$ s.

4 Caractérisation du diapason et du tempérament

Le la 3 du jeu de Montre 8 du grand-orgue a donné lieu à environ deux minutes d'enregistrement (fichiers 056), la température relevée dans la nef étant alors de 26°C. La figure 6 montre la DSP, estimée avec une résolution de 0,1 Hz, du signal recueilli sur le micro PCB. Des partiels très marqués apparaissent sur la DSP, à des fréquences multiples exacts d'une fondamentale à 449,4 ($\pm 0,1$) Hz. En divisant par 9 la fréquence relevée pour le neuvième partiel, le dixième étant écarté car de niveau nettement inférieur, on obtient même comme estimation pour cette fondamentale 449,45 ($\pm 0,01$) Hz.

Le LMA a développé par ailleurs un procédé de calcul de la fréquence fondamentale d'une note d'orgue qui permet, pourvu que le niveau de bruit de fond soit faible, d'obtenir en plusieurs points d'une église des résultats consistants au centième de Hertz près. Ce procédé, initialement présenté dans [4] mais amélioré ensuite, s'appuie sur le fait qu'un tuyau d'orgue produit un son harmonique dont l'amplitude et la fréquence fondamentale fluctuent un peu. Il inclut :

- le filtrage passe-haut du signal stationnaire produit par une note, avec comme fréquence de coupure 0,85 fois la fréquence de jeu attendue, afin de s'affranchir au maximum du bruit de fond majoritairement à basse fréquence.
- le filtrage passe-bas du signal avec comme fréquence de coupure 1,15 fois la fréquence de jeu attendue, afin de ne garder que le premier partiel du signal. Si le bruit de fond est faible autour du premier partiel, le signal filtré apparaît comme sinusoïdal ;
- l'adjonction au signal filtré d'une partie imaginaire égale à sa transformée de Hilbert ;
- le déroulage de la phase du signal analytique (proche d'une exponentielle complexe) ainsi construit ;
- l'estimation grossière de fréquences instantanées à chaque instant à partir de deux valeurs consécutives de cette phase ;
- le calcul de la moyenne et de l'écart-type de ces fréquences instantanées.

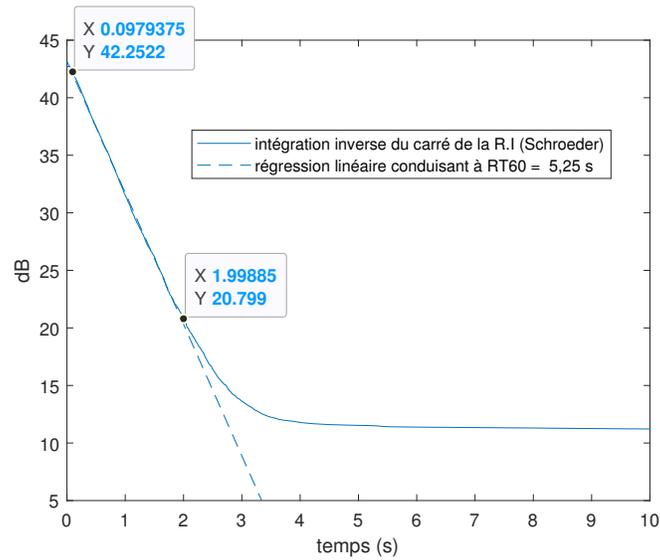


FIGURE 5 – RI complète; décroissance de l'énergie avec identification du temps de réverbération sur le micro PCB

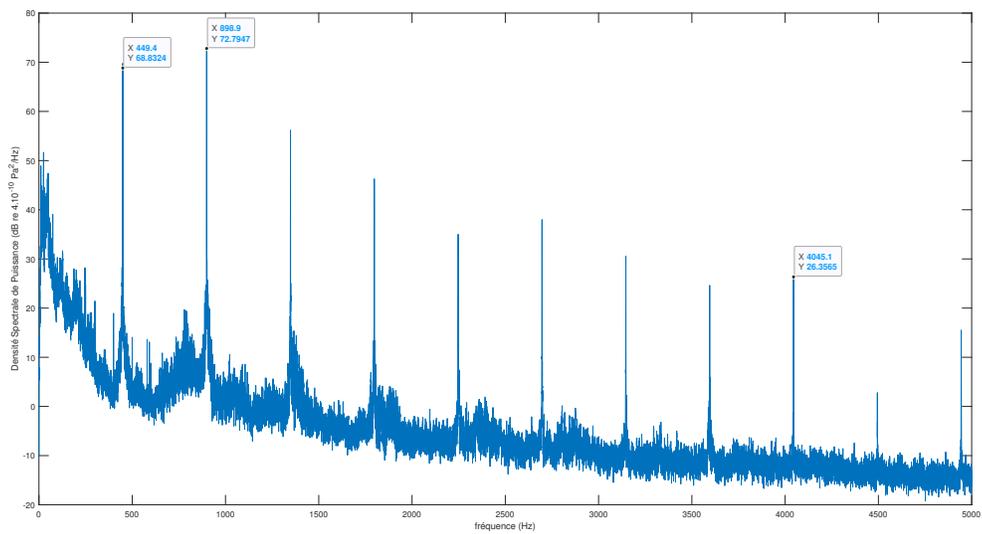


FIGURE 6 – DSP du signal sur le micro PCB avec le la 3 du jeu de Montre 8 du Grand-Orgue

	do3	do# 3	ré 3	ré# 3	mi 3	fa 3	fa# 3	sol 3	sol# 3	la	la# 3	si 3	do 4
th.	534,5	566,3	599,9	635,6	673,4	713,5	755,9	800,8	848,5	898,9	952,4	1009,0	1069,0
est.	533,5	565,3	597,6	634,5	673,1	713,3	753,7	800,5	846,73	899,5	951,1	1008,7	1067,7
σ	0,66	0,53	0,80	2,03	10,78	9,91	1,34	2,14	1,73	4,53	4,67	1,69	1,25
Δ		1,00	0,96	1,04	1,02	1,00	0,95	1,04	0,97	1,05	0,97	1,02	0,97

TABLE 1 – fréquences fondamentales (en Hz) pour le jeu de Prestant 4 de Grand-Orgue

Ce procédé a conduit ici à la valeur de 449,457 Hz pour le la 3 de Montre 8 du Grand-Orgue, en accord avec celle trouvée en effectuant le relevé sur la DSP.

La vitesse du son, et par conséquent les fréquences de résonance d'un tuyau, sont proportionnelles à la racine carrée de la température absolue. On peut donc déduire la fréquence qu'on aurait obtenue pour le la 3 à 20°C de celle obtenue à 26°C par :

$$449,457 \sqrt{\frac{20 + 273,15}{26 + 273,15}} = 444,93 \text{ Hz}$$

A ce stade cette valeur a priori un peu élevée (on s'attendait à 442 Hz) peut s'expliquer de plusieurs façons :

- la température dans le tuyau est supérieure à celle relevée dans la nef (la fréquence serait 442 Hz à 20°C si le tuyau était à 30°C), ce qui n'est pas impossible avec un tuyau prenant le soleil;
- le la 3 de Montre 8 du Grand-Orgue est désaccordé (ce qui n'a pas sauté aux oreilles en jouant un peu de musique avec ce jeu).
- le diapason de l'orgue est voisin, pour le la 3, de 445 Hz à 20°C.

Le tableau 1 montre les fréquences de jeu calculées à partir de l'enregistrement de l'octave centrale du Prestant 4 de Grand-Orgue qui sert usuellement d'étalon pour l'accord d'un orgue. Ce jeu de 4 pieds produit des sons à l'octave supérieure du jeu de Montre 8. Les sons utilisés pour les calculs sont extraits du fichier 057. Une dizaine de secondes de la partie stationnaire du signal est utilisée pour chaque note. La première ligne de nombres indique les valeurs théoriques des fréquences fondamentales en Hz obtenues pour un jeu de 4 pieds en tempérament égal avec un la 3 à 449,46 Hz. La deuxième indique les fréquences estimées par la procédure ci-dessus à partir des enregistrements. Le fait que les fréquences estimées soient globalement plus basses que celles découlant du la 3 montre que ce la 3 est légèrement désaccordé, entre 1 et 2 Hz trop haut, par rapport au jeu de Prestant. La troisième ligne montre l'écart-type en Hz σ des fluctuations de la fréquence instantanée estimée pour chaque échantillon de l'enregistrement. Des simulations à partir de données recueillies précédemment indiquent qu'une valeur inférieure à 1 Hz caractérise l'estimation fiable d'une fréquence stable; une valeur de l'ordre de 10 Hz révèle une note qui ne parle pas parfaitement ou la présence d'un bruit de fond qui perturbe le calcul mais la fréquence fondamentale est encore estimée raisonnablement, les fréquences estimées ici sont très probablement significatives. La quatrième ligne de nombres du tableau 1 montre le rapport Δ de deux fréquences estimées consécutives exprimé en demi-tons égaux. Au final les fréquences estimées sont tout à fait plausibles et caractérisent un jeu raisonnablement accordé en tempérament égal.

5 Spectre de quelques notes

La figure 7 montre la DSP de la pression acoustique sur le micro PCB, estimée avec une résolution de 0,1 Hz, pour le do 1 joué avec la Soubasse 32. Le signal correspondant dure près d'une minute et est tiré du fichier 059. Ce do 1, qui à l'oreille parlait mieux que d'autres notes de la première octave de cette Soubasse 32, présente bien un significatif partiel à une fréquence fondamentale vers 16,5 Hz caractéristique d'un jeu de 32 pieds.

La Soubasse 32 étant un jeu de tuyaux bouchés, sur la figure 7 on n'observe sans surprise quasiment pas de partiels aux fréquences multiples pairs de la fréquence fondamentale. On observe bien en revanche des partiels de bon niveau aux premiers multiples impairs. Le partiel au 11ème multiple à 178,8 Hz permet de préciser 16,25 Hz comme valeur de cette fréquence fondamentale; on a préféré pour ce calcul ne pas utiliser la fréquence du partiel apparent au multiple 10 dans la mesure où il est de niveau plus faible et où on peut l'attribuer avec moins de certitude au tuyau du fait qu'il soit bouché.

Les tuyaux de Soubasse 32 étant relativement larges, la propagation acoustique peut s'y produire en suivant des modes autres que le mode plan à des fréquences inférieures à celles possibles dans des tuyaux de Principaux (comme la Montre 8 donnant la figure 6) ou de Gambes. Du coup les premiers partiels portent l'essentiel de l'énergie du signal; c'est pourquoi on n'observe pas de partiels à fort niveau au delà du quatrième dans le cas de cette Soubasse,

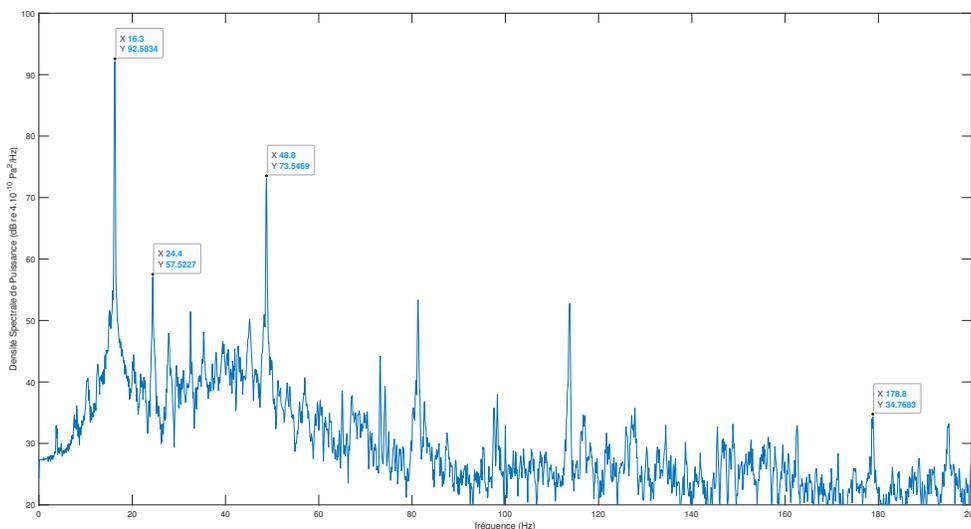


FIGURE 7 – DSP sur le micro PCB pour le do1 de Soubasse 32

contrairement au cas du jeu de Montre 8. Enfin la raie observée à 24,4 Hz, qui est présente dans le bruit de fond montré en figure 1, caractérise très probablement un bruit de soufflerie.

Il est difficile de préciser le niveau exact du partiel à la fréquence fondamentale à partir de la seule figure 7 : en effet un zoom sur le pic montre qu'il est porté par au moins 6 valeurs de fréquence entre 16 et 16,5 Hz. Deux approches numériques différentes ont été utilisées pour le faire :

- la DSP montrée en figure 7 a été intégrée numériquement comme une fonction constante par morceaux entre 13 et 20 Hz. Concrètement pour cela on a sommé les valeurs de DSP (en Pa^2/Hz) entre 13 et 20 Hz et multiplié le tout par la résolution fréquentielle (en l'occurrence 0,1 Hz).
- Le signal enregistré par le micro PCB a été décimé d'un facteur 100 puis filtré passe-bande entre 13 et 20 Hz avant de calculer son niveau quadratique moyen. Ce procédé demande beaucoup plus de calculs que le précédent mais il a été facile à mettre en œuvre sous Matlab[®] avec les fonctions *decimate* et *bandpass*.

Ces calculs ont conduit à des niveaux quadratiques moyens du signal entre 13 et 20 Hz valant tous les deux 85,4 ($\pm 0,1$) dB. Ce résultat situe la fondamentale à un niveau de l'ordre des seuils de détection estimés pour un son pur à 15 Hz (cf. [5]), il sera très intéressant de faire écouter cet enregistrement à des sujets et de déterminer si oui ou non ils en perçoivent la composante fondamentale.

La figure 8 montre le spectre obtenu de la même façon avec le do 1 du jeu de Douçaine 32 (fichier 060). A la différence de la Soubasse 32 on n'observe pas de partiel à la fréquence fondamentale qui devrait se situer à 16,7 Hz compte tenu de celles des harmoniques visibles sur la figure. Le « peigne » constitué par les nombreux harmoniques à niveaux comparables est caractéristique du timbre d'un jeu d'anche. La présence de partiels aux fréquences multiples de la fondamentale peut tout à fait induire la perception d'un partiel à celle-ci, même très grave, par l'intermédiaire du mécanisme psychoacoustique de perception de fondamentale absente (cf. [6]) connu et utilisé en facture d'orgue depuis le XVIII^{ème} siècle (cf. l'article *acoustic bass* dans [7]), il sera intéressant de déterminer à l'aide de tests psychoacoustiques si c'est le cas ici.

6 Remarques finales

Comme le montre le compte-rendu diffusé précédemment, les enregistrements conduits à St-Vincent ont permis de recueillir, avec un dispositif expérimental qui a donné pleine satisfaction, un grand nombre de notes d'orgue graves. Ces notes intégreront la banque des sons qui seront utilisés pour étudier la perception auditive à basse fréquence dans la cabine de restitution en cours de montage au LMA.

L'analyse présentée ci-dessus a par ailleurs soulevé deux questions précises auxquelles on s'efforcera de répondre lors des tests psychoacoustiques :

- le partiel à la fréquence fondamentale du do 1 du jeu de Soubasse 32, dont le niveau est de l'ordre de 85 dB,

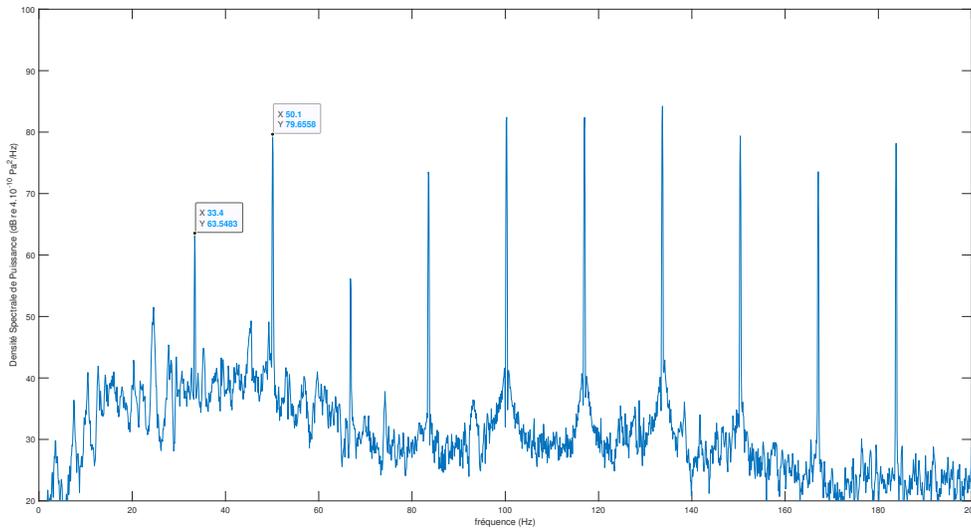


FIGURE 8 – DSP sur le micro PCB pour le do 1 de Douçaine 32

est-il audible?

— une « fondamentale absente » est-elle perceptible en écoutant l’enregistrement du do 1 du jeu de Douçaine 32 ? Les tests psychoacoustiques, menés à l’aide des enregistrements faits à St-Vincent, et leurs conclusions seront communiqués dans des documents ultérieurs.

Références

- [1] Oppenheim, Allan V. and Schaffer, Ronald W. *Discrete-Time Signal Processing, 3rd Edition*. Pearson, 2010.
- [2] Antonin Novak, Pierrick Lotton, and Laurent Simon. Synchronized Swept-Sine : Theory, Application, and Implementation. *J. Audio Eng. Soc.*, 63(10) :786–798, November 2015.
- [3] M. R. Schroeder. New Method of Measuring Reverberation Time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(3) :409, 1965.
- [4] Emmanuel Friot, Fernando Alvarez, and Jacques Chatron. Caractérisation des transferts acoustiques entre banc de l’organiste et public. In *Actes du Congrès Français d’Acoustique 2016*, Le Mans, France, 2016.
- [5] H Møller and C S Pedersen. Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. *Noise & Health*, 6(23) :37–57, 2004.
- [6] Missing fundamental, March 2021. article Wikipedia consulté le 8/08/2021.
- [7] James Ingall Wedgwood. *A comprehensive dictionary of organ stops : English and foreign, ancient and modern, practical, theoretical, historical, aesthetic, etymological, phonetic*. London : Vincent Music Co., 1909.