



HAL
open science

Effet de la durée des notes sur le niveau sonore d'un orgue

Emmanuel Friot, Jacques Chatron

► **To cite this version:**

Emmanuel Friot, Jacques Chatron. Effet de la durée des notes sur le niveau sonore d'un orgue. 16ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03599488

HAL Id: hal-03599488

<https://hal.science/hal-03599488>

Submitted on 7 Mar 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.



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Effet de la durée des notes sur le niveau sonore d'un orgue

E. Friot, J. Chatron

LMA - UMR 7031 AMU - CNRS - Centrale Marseille



Un orgue produit des sons dont le niveau peut varier de plus de 50 dB mais, comme un tuyau seul génère un son peu variable, cette dynamique résulte de dispositifs auxiliaires qui agissent sur tout un clavier et pas individuellement sur chaque note. Les organistes savent toutefois accentuer certaines notes notamment en jouant, via leur longueur, avec la réverbération. L'effet obtenu dépend de chaque note, des jeux mis en œuvre et du point d'observation, il n'est facile ni de l'évaluer ni d'en séparer les composantes liées à l'acoustique physique de celles relevant de la psychoacoustique. On a quantifié l'effet moyen de la durée des notes sur le niveau sonore d'un orgue à partir de calculs avec des réponses impulsionnelles rendant compte du couplage entre orgue et édifice. Un orgue ne peut être caractérisé par une réponse impulsionnelle unique du fait qu'une même fréquence peut en provenir d'endroits variés ; pour les calculs on a utilisé des réponses impulsionnelles obtenues, soit dans des églises, soit sur un orgue numérique du commerce. En moyenne sur les fréquences il s'avère que le niveau maximum d'un son, dans les églises considérées, peut varier de jusqu'à 15 dB en fonction de sa durée d'émission. Pour des sons de durée comprise entre 0,05 et 0,5 s la variation atteint 10 dB. Cette dynamique est inférieure à celle d'autres instruments mais elle confirme que le contrôle de l'articulation à l'orgue permet une significative expressivité de chaque note de durée inférieure à 1 s. En revanche la mise en œuvre de la réverbération dans l'orgue numérique étudié, qui n'utilise une réponse impulsionnelle mesurée qu'en complément d'une constante de fort niveau, autorise un contrôle de la dynamique inférieur, de l'ordre de 5 dB pour des durées de son entre 0,05 et 0,5 s.

1 Introduction

Après un transitoire d'attaque, dont la durée est en général inférieure à 100 ms [1], un tuyau d'orgue alimenté par une soufflerie électrique constitue une source acoustique très stationnaire pour un instrument de musique. Pour faire varier le niveau sonore, un organiste dispose néanmoins de plusieurs moyens d'action : il peut modifier, d'une façon plus ou moins automatisée (avec un combiné électronique, un *Rollschweller* mécanique...), la sélection des tuyaux mis en œuvre lorsqu'une touche est actionnée ; il peut passer d'un clavier à un autre associé à une sélection de tuyaux différente ; il peut contrôler l'ouverture des volets d'une « boîte expressive » renfermant des tuyaux. Ces dispositifs font que la dynamique d'un grand orgue dépasse couramment 50 dB [2], sans dégradation de la jouabilité, mais ils ont l'inconvénient d'agir sur tout un clavier et pas individuellement sur chaque note. Les organistes savent néanmoins comment accentuer certaines notes plus que d'autres, ainsi que le formule Nikolaus Harnoncourt [3, p.55] :

Les meilleurs organistes savent, sur de bons orgues et dans des lieux adéquats, suivant le moment et la manière dont ils quittent une note, donner l'impression d'une extinction, d'un son de cloche et par conséquent d'un jeu éloquent. C'est une illusion (...) mais en musique seules comptent l'illusion et l'impression qui s'emparent de l'auditeur.

L'objet de cette article est d'étudier, de ce point de vue, l'effet de la durée des notes d'orgue sur le niveau sonore obtenu sachant que, même si un tuyau est une source acoustique rapidement stationnaire, la réverbération des lieux dans lesquels les orgues sont installés fait que plusieurs secondes sont nécessaires pour une stabilisation du niveau. Bien que le terme « illusion » utilisé par N. Harnoncourt renvoie à des effets *a priori* plutôt psychoacoustiques, on s'en tiendra ici à des considérations d'acoustique physique.

La figure 1 montre le signal de pression enregistré en un point de la nef d'une petite église (St-Ginieз à Marseille)

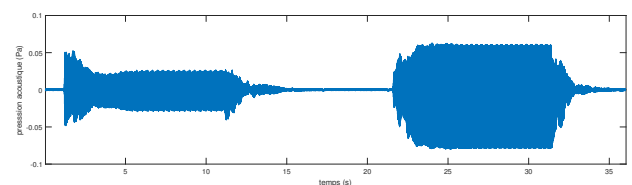


FIGURE 1 – signal de pression acoustique obtenu dans la nef de St-Ginieз en jouant les notes do3 et do#3 avec le jeu de Montre 8

lorsque deux longues notes (do3 et do#3, jeu de Montre 8) sont jouées à l'orgue (Mutin Cavallé-Coll, 1912). Plus de deux secondes sont nécessaires pour que les niveaux obtenus aient l'air stationnaires et les transitoires ont des allures très différentes pour les deux notes. De fait l'évolution initiale du signal temporel dépend fortement des tuyaux utilisés et du point d'écoute. De même que la réverbération d'un édifice peut être caractérisée à partir d'une Réponse Impulsionnelle (RI) qui y est mesurée, une RI peut aussi y rendre compte des modalités moyennes d'établissement du son. Le couplage d'un orgue et d'un édifice ne peut toutefois être rigoureusement calculé à l'aide d'une RI unique dans la mesure où une même fréquence peut être émise par un orgue depuis des points très variés. On va toutefois mener ici des calculs utilisant des RI uniques, soit mesurées dans des églises, soit identifiées sur un orgue numérique du commerce intégrant l'acoustique de plusieurs édifices. On va présenter ci-dessous l'obtention de ces RI. On montrera ensuite comment, en moyenne sur les fréquences, le niveau sonore peut être évalué en fonction de la durée du signal en entrée de ces RI. On en déduira dans quelle mesure un interprète peut contrôler le niveau sonore moyen d'une note en jouant simplement sur sa durée et on illustrera cette marge de manœuvre en faisant appel à une pièce d'orgue célèbre.

2 Obtention de réponses impulsionnelles

Des RI ont été déduites d'enregistrements effectués dans une petite église (St-Giniez à Marseille) ainsi que dans une église de taille moyenne accueillant tous les ans un festival international d'orgue (St-Vincent à Roquevaire). Un signal de type *synchronized swept sine* a été diffusé dans une source Brüel & Kjaer 4292 L et les RI ont été calculées à partir des enregistrements conformément à la procédure décrite dans [4]. On a notamment utilisé un microphone de mesure PCB 376A32, à câblage de sortie symétrique, associé à un faible bruit de fond d'origine électrique. Les signaux ont été acquis en deux points dans le cas de St-Vincent, au milieu et à l'arrière de la nef. On a effectué les enregistrements avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz et une résolution de 24 bits.

Un orgue numérique Johannes Classic 350 a également été utilisé pour obtenir des RI caractéristiques du couplage entre un orgue et un édifice. Ce modèle offre la possibilité de choisir parmi 12 types de réverbérations que le manuel associe à 12 bâtiments donnés pour lesquels il indique un « temps de réverbération ». Le modèle utilisé permet également de choisir entre 4 « positions d'écoute » (*Console, Center, Middle, Rear*) pour chacun des bâtiments. L'orgue dispose d'une entrée audio stéréo, on a mesuré pour chacune des réverbérations possibles les 4 RI entre les 2 voies d'entrée stéréo et les 2 voies de sortie en alimentant successivement chacune des voies d'entrée par un *synchronized swept sine*. Cet article s'intéressant au niveau sonore et pas aux spécificités de la perception binaurale, on ne considérera arbitrairement dans la suite que les RI entre la voie d'entrée de droite et la voie de sortie de droite.

La figure 2 montre le début de plusieurs des RI obtenues. Les RI d'églises se caractérisent par un premier pic dont la position est liée au temps de propagation entre la source et le microphone. Les coefficients suivants sont plus petits mais ne s'annulent pas. Les RI obtenues sur l'orgue numérique comprennent toutes un pic à fort niveau à l'instant 1,0 ms puis s'annulent avant d'osciller à nouveau à partir de 40 ms. Le zoom sur la figure 2 pour les RI de l'orgue numérique associées, selon le manuel de l'orgue aux 4 « positions » d'un même édifice, montre que ces RI ne diffèrent que par l'amplitude des oscillations à partir de 40 ms. Lorsqu'on joue de l'orgue numérique on perçoit bien un éloignement de l'instrument en passant de la RI *Console* à la RI *Rear* mais la mesure montre qu'il s'agit d'un effet obtenu en contrôlant le ratio entre le « champ direct » qui correspondrait au pic à 1 ms et le « champ réverbéré » à partir de 40 ms, pas à l'utilisation dans l'orgue de RI correspondant physiquement à des points d'écoute différents.

La figure 3 montre les *Energy Decay Curves* construites à partir des RI par intégration rétrograde de Schroeder [5]. Les pointillés correspondent à une régression linéaire sur les décroissances initiales, le tableau 1 montre les RT60 qui s'en déduisent ainsi que ceux indiqués par le manuel de l'orgue numérique. Les RT60 mesurés sont un peu inférieurs à ceux

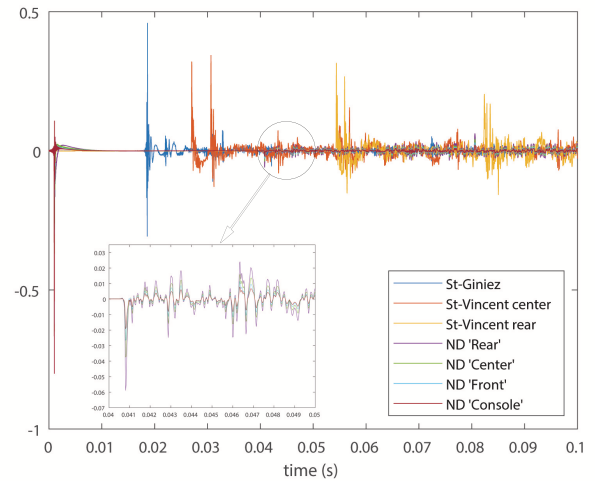


FIGURE 2 – Tête de RI obtenues en église ou à l'orgue numérique

donnés par le manuel pour les plus longs.

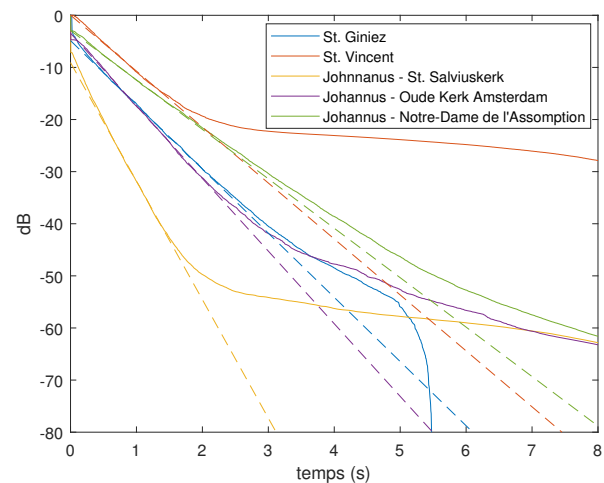


FIGURE 3 – *Energy-Decay Curves* de RI obtenues en église ou à l'orgue numérique

En conclusion pour l'orgue numérique les RI mesurées correspondent bien au delà de 40 ms à des réverbérations caractéristiques d'une édifice réel. En revanche l'immédiat pic à très fort niveau suivi de 40ms de silence n'est pas typique de ce qu'on peut mesurer dans une église.

3 Calcul du niveau acoustique en fonction de la durée des sons

La sortie y d'un système linéaire de RI h de longueur K finie se déduit de son entrée x par la relation :

origine de la RI	RT60 estimé	RT Johannus
St-Ginie�	4.9 s	
St-Vincent	5.6 s	
Johannus - St. Salviuskerk	2.6 s	2.5 s
J. - Oude Kerk, Amsterdam	4.3 s	5.5 s
J. - Notre-Dame	6.3 s	8 s

TABLEAU 1 – Temps de réverbération estimés à partir des EDC et indiqués par Johannus

$$y(n) = \sum_{k=1}^K h_k x(n-k+1) \quad (1)$$

Dans le cas où $x(m)$ est un signal relativement court, non nul seulement pour $1 \leq m \leq M \leq K$, cette relation devient :

$$y(n) = \sum_{k=1}^n h_k x(n-k+1) \quad \text{if } n \leq M \quad (2)$$

$$y(n) = \sum_{k=n-M+1}^n h_k x(n-k+1) \quad \text{if } n > M \quad (3)$$

Lorsque un signal sinusoïdal est introduit en entrée des RI du paragraphe précédent, cette relation permet de constater que l'enveloppe temporelle de la sortie obtenue varie beaucoup avec la fréquence, encore plus que dans le cas de deux tuyaux montré en figure 1. Afin de déterminer un comportement moyen de l'évolution temporelle de la réponse, il est pratique de s'intéresser à la sortie de la RI lorsque qu'un bruit blanc est introduit en entrée. Un orgue n'est évidemment pas un générateur de bruit blanc mais la musique pour orgue est polyphonique, l'instrument couvre toute la gamme audible (avec par exemple une première fréquence fondamentale à 16 Hz à Roquevaire) et sur un grand orgue plusieurs centaines de tuyaux peuvent facilement contribuer au son d'un accord *fortissimo*. Utiliser un bruit blanc pour calculer un comportement moyen en fréquence n'est donc pas injustifié.

Soit x un bruit blanc discret unitaire de durée finie $E(x(i)x(j)) = 0$ si $i \neq j$, $E(x(m)^2) = 0$ sauf pour $1 \leq m \leq M$ auquel cas $E(x(m)^2) = 1$. La valeur quadratique moyenne de la sortie peut alors être écrite :

$$E(y(n)^2) = \sum_{k=1}^n h_k^2 \quad \text{if } n \leq M \quad (4)$$

$$E(y(n)^2) = \sum_{k=n-M+1}^n h_k^2 = \sum_{k=1}^n h_k^2 - \sum_{k=1}^{n-M} h_k^2 \quad \text{if } n > M \quad (5)$$

L'équation 4 montre que, en moyenne, la réponse à un bruit blanc croît jusqu'à ce qu'il soit coupé. L'équation 5 montre qu'un niveau maximum peut être atteint ultérieurement, la sortie finissant par s'annuler pour les instants plus grands que la somme des durées de la RI et du bruit.

La figure 4 montre le niveau quadratique moyen de la pression en fonction du temps lorsque des bruits blancs de durées différentes démarrant à $t=0$ sont introduits en entrée

d'une des RI obtenues à Roquevaire. Le niveau a été recalé de telle sorte que 0 dB soit atteint au bout de 10 s. Pour les bruits blancs de durée supérieure à 0,5 s, la décroissance du son est quasiment exponentielle après la coupure du bruit. Elle est plus chaotique pour les bruits plus courts, ce qui peut s'expliquer en disant que le nombre de modes acoustiques contribuant significativement à la réponse est réduit pour des signaux courts. Pour des bruits courts le niveau maximum peut être obtenu un peu après la coupure mais il reste du même ordre de grandeur que le niveau à la coupure.

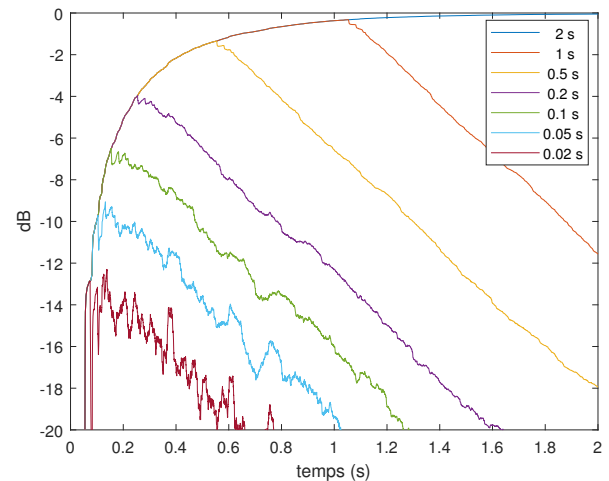


FIGURE 4 – Réponse à un bruit blanc de durée limitée : niveau observé à St-Vincent pour plusieurs durées

La figure 5 montre le niveau maximum obtenu en fonction de la durée du bruit blanc introduit dans différentes RI. A St-Ginie�, petite église, le niveau ne varie en moyenne que de l'ordre de 3 dB. En revanche la variation est supérieure à 15 dB dans le cas de l'arrière de la nef à Roquevaire. Avec les RI de l'orgue numérique la dynamique est très réduite. Cela est dû au premier pic de très fort niveau dans les RI, un son très court permet d'atteindre immédiatement un fort niveau que la contribution de la suite de la RI augmente peu. En revanche, si les 30 premières millisecondes des RI de l'orgue numérique sont mises à 0, la variation de niveau en fonction de la durée du bruit rejoint celles observées pour Roquevaire, comme le montrent les courbes labellisées *head 0* sur la figure 5.

Un organiste peut aisément jouer des notes d'une durée inférieure à 0.1 s (double-croches *legato* à 150 noires à la minute). La figure 5 montre que sur la plage 0.05-0.5 s le niveau d'une même note augmente en moyenne typiquement de 10 dB dans une église réverbérante. Même si cette dynamique est inférieure à celle de la plupart des instruments d'orchestre, le niveau sonore obtenu individuellement pour chaque note à l'orgue peut donc être significativement modulé en jouant sur sa longueur. Il ne s'agit pas d'un « effet » obtenu par les organistes mais bien d'un fait d'acoustique physique dû au couplage entre le tuyau et un résonateur n'atteignant un état stationnaire qu'après plusieurs secondes d'excitation. Par ailleurs la sonie des sons

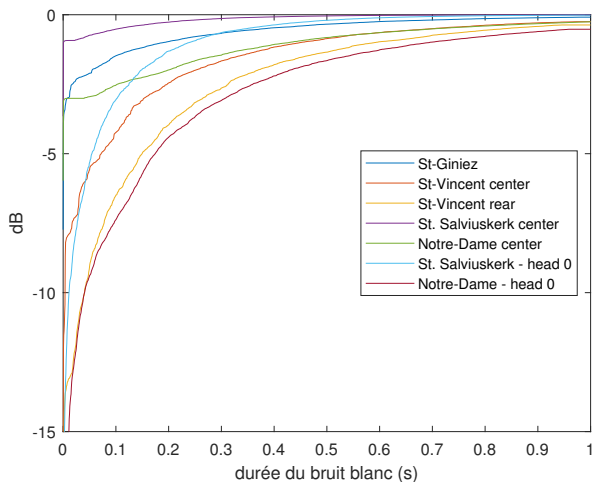


FIGURE 5 – Réponse à un bruit blanc de durée limitée : niveau maximum en plusieurs lieux en fonction de la durée

de durée inférieure à 200 ms dépend significativement de leur durée [6] à cause de l'intégration temporelle effectuée par le système auditif pour les sons brefs. Le phénomène d'acoustique purement physique mis en évidence ici est donc très probablement amplifié par les mécanismes perceptifs.

4 Remarques finales

On a montré que le niveau sonore obtenu avec une source large bande dans une église de taille moyenne pouvait varier de plus de 15 dB en fonction de sa durée d'émission. Afin de compléter les calculs effectués avec un bruit blanc, en entrée de RI d'églises ou de l'orgue numérique, on a effectué à l'orgue numérique, avec la réverbération mise à 0 des enregistrements de la première mesure de la célèbre Toccata de la cinquième Symphonie pour orgue de Charles-Marie Widor. Main droite et main gauche ont été enregistrées séparément dans une version jouée avec des notes longues et une autre avec des notes courtes. Sans réverbération, les niveaux crête des deux versions sont exactement identiques. La figure 6 montre, sous la partition correspondante, les signaux temporels obtenus en passant les différents enregistrements dans la RI recueillie au centre de l'église St-Vincent. On constate que le niveau des versions avec notes longues est nettement supérieur à celui des versions avec notes courtes. Ces signaux confirment que, grâce au couplage de l'orgue avec la réverbération, un organiste peut dans le cas de cette pièce changer de façon très significative les niveaux sonores relatifs, sur un même clavier, de la main droite et de la main gauche.

Enfin on a vu que les RI effectivement mises en œuvre sur l'orgue numérique étudié ne permettaient pas d'obtenir la même dynamique en contrôlant la durée des notes que les RI mesurées en église réverbérante. Certains organistes critiquent les orgues numériques en disant qu'il ne permettent pas un contrôle de l'articulation musicale

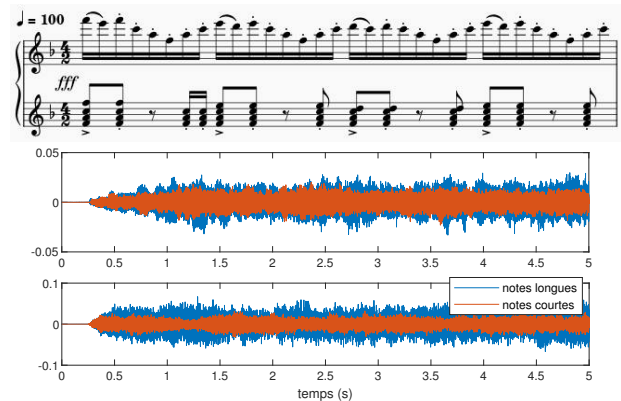


FIGURE 6 – Effet de la durée des notes sur le niveau sonore dans le cas de la première mesure de la Toccata de la cinquième Symphonie pour orgue de Charles-Marie Widor : partition, main droite, main gauche.

analogue à celui possible avec un orgue à tuyau et à transmission mécanique. De précédents travaux suggèrent que la transmission mécanique en elle-même n'est pas suffisante pour autoriser une grande variété des sons produits [7], il est possible que le manque d'expressivité parfois reproché spécifiquement aux orgues numériques soit plutôt lié à la réduction de la dynamique accessible mise en évidence dans cet article.

Remerciements

Merci à M. Julien Fleury, curé de St-Giniez, et à M. Jean-Robert Caïn, président de l'Association des Amis du Grand-Orgue de Roquevaire, de leur intercession pour la conduite des enregistrements dans les églises. Merci à M. Adrien Vidal pour les données transmises sur St-Giniez.

Références

- [1] A. W. Nolle and T. L. Finch. Starting transients of flue organ pipes in relation to pressure rise time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(4) :2190–2202, April 1992.
- [2] Jonas Braasch. Acoustical measurements of expression devices in pipe organs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3) :1683–1693, March 2008.
- [3] Harnoncourt, Nikolaus. *Le discours musical : pour une nouvelle conception de la musique*. Gallimard, 1984.
- [4] Antonin Novak, Pierrick Lotton, and Laurent Simon. Synchronized Swept-Sine : Theory, Application, and Implementation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 63(10) :786–798, November 2015.
- [5] M R Schroeder. New Method of Measuring Reverberation Time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (37) :409–412, 1965.

- [6] Torben Poulsen. Loudness of tone pulses in a free field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69(6) :1786–1790, June 1981.
- [7] Alan Woolley. Mechanical Pipe Organ Actions and why Expression is Achieved with Rhythmic Variation Rather than Transient Control. In *Proceedings of the International Symposium on Music Acoustics*, Sydney and Katoomba, Australia, 2010.