

# CFA/VISHNO 2016

## Caractérisation des transferts acoustiques entre banc de l'organiste et public

E. Friot<sup>a</sup>, F. Alvarez<sup>a</sup> et J. Chatron<sup>b</sup>

<sup>a</sup>CNRS - LMA, 4 impasse Nikola TESLA, CS 40006, 13453 Marseille Cedex 13, France

<sup>b</sup>LMA (CNRS / AMU / Centrale Marseille), Bat P, 31 chemin Joseph Aiguier, 13009  
Marseille, France

friot@lma.cnrs-mrs.fr



LE MANS

Dans les églises, le signal musical reçu par le public en provenance d'un orgue diffère souvent beaucoup de celui reçu par l'organiste, au point de parfois surprendre l'interprète qui écoute après un concert un enregistrement effectué dans le public. Les organistes anticipent au jugé cette différence, en jouant moins vite et moins *legato* qu'ils ne le feraient pour eux seuls, mais pouvoir la caractériser, à l'aide d'indices acoustiques objectifs, leur serait utile. Vu depuis le banc de l'interprète, l'orgue est un instrument spatialement très étendu auquel on ne peut substituer une autre source pour la mesure de réponses acoustiques ; la tessiture d'un orgue est très large mais ses fréquences de jeu quantifiées ne permettent pas d'en identifier directement des réponses impulsionnelles équivalentes — typiquement longues de plusieurs secondes dans une église.

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre au LMA pour caractériser le transfert acoustique entre le banc de l'organiste et le public à partir d'enregistrements effectués soit sur un orgue numérique du commerce, reproduisant des sons enregistrés en plusieurs points d'une église, soit avec l'orgue Quoirin de l'église Ste Marguerite à Marseille. Les signaux analytiques associés aux fréquences fondamentales de jeu ont notamment permis d'identifier précisément les fréquences de jeu, les temps de réverbération et des fonctions de transfert entre banc de l'organiste et public.

## 1 Introduction

### 1.1 De l'organiste au public

Dans une église, le son que peut entendre l'organiste en provenance de son instrument diffère significativement de celui que peut entendre le public : à moins de jouer sur une console déportée, ce qui n'est possible que sur certains orgues et pose par ailleurs d'autres problèmes aux interprètes, l'organiste se trouve à proximité des sources sonores alors que le public en est assez loin. Du coup en premier lieu les **timbres** perçus, à partir des *jeux* sélectionnés par l'interprète, sont différents à cause de la coloration introduite par l'édifice. Ensuite le **niveau relatif** des différents plans sonores (les jeux affectés à chaque clavier) peut radicalement varier ; par exemple l'organiste entendra proportionnellement moins un *positif* situé dans son dos que le public pour qui il sera en première ligne. Enfin, et surtout, la **clarté** apparente de la musique varie beaucoup entre le banc de l'organiste et le public à cause de ratios très différents entre contributions précoces et tardives de l'orgue aux signaux acoustiques.

Les organistes anticipent plus ou moins ces différents phénomènes en adaptant leur *registration* (le choix des jeux) à l'édifice et en jouant pour le public moins vite et moins *legato* qu'ils ne le feraient pour eux seuls. Une caractérisation objective, à l'aide d'un ou plusieurs indicateurs quantitatifs, des modifications du son entre le banc de l'organiste et le public serait toutefois bien utile aux interprètes qui pourraient doser les corrections apportées à leur jeu en fonction de ces indicateurs. Une telle caractérisation pourrait aussi permettre de dresser une typologie des édifices qui aiderait les organistes à imaginer les différences d'acoustique entre banc et public à la simple vue de la disposition de l'orgue dans l'église.

### 1.2 L'orgue en tant que source de mesure

Si l'orgue était une source acoustique ponctuelle et large bande, les différences de coloration et de niveaux sonores entre le banc de l'interprète et le public pourraient être quantifiées par une **fonction de transfert** acoustique entre deux points. Les différences de clarté entre les positions pourraient quant à elles se mesurer à l'aide des indicateurs usuels d'acoustique des salles construits à partir de **réponses impulsionnelles** de la source [1] ; par exemple le ratio entre les C80 mesurés au banc et dans le public pourrait quantifier

une perte de clarté entre les deux positions.

Un orgue même modeste est toutefois une **source sonore de grande taille**, avec des points d'émission acoustique qui varient non seulement en fonction de la fréquence mais aussi en fonction de la registration et surtout du détail des notes jouées : le son recueilli à la fréquence fondamentale d'un tuyau donné peut provenir de tuyaux dont cette fréquence est une harmonique. Il est donc peu sensé de substituer à l'orgue une source compacte de référence qui permettrait d'estimer une réponse impulsionnelle au banc de l'organiste ou une fonction de transfert acoustique entre deux points ; c'est l'orgue lui-même qu'il faut utiliser comme source acoustique si l'on veut caractériser les différences entre signaux au banc et dans le public.

Les sons d'un orgue comprennent une composante stationnaire bien **reproductible** ; dans le cas d'un orgue à transmission non mécanique les transitoires d'attaque sont également faciles à reproduire. Parmi les instruments non amplifiés l'orgue est également à **dynamique très large**, jusqu'à 60dB pour les instruments d'esthétique symphonique [2]. Même si l'orgue est de taille modeste **son spectre est large**, avec des fondamentales variant typiquement de 33Hz à 8500Hz (avec un *jeu de 16 pieds* et un *rang de mixture de 1 pied*). Ces caractéristiques en font, parmi les instruments de musique, une source acoustique particulièrement intéressante pour des mesures. En revanche les fréquences de jeu d'un orgue sont **quantifiées**, avec une résolution d'au mieux 2Hz (dans le grave d'un jeu de 16 pieds) ; la partie stationnaire des sons d'un orgue ne permettra donc pas d'en mesurer dans une église l'équivalent d'une réponse impulsionnelle longue de plusieurs secondes. De plus, même avec des jeux à bouche dont l'accord tient plusieurs années, les fréquences fondamentales de jeu ne sont pas connues a priori avec précision puisqu'elles varient comme la racine carrée de la température absolue. Ces dernières caractéristiques des sons de l'orgue restreignent la panoplie des outils de traitement du signal qu'on pourra utiliser pour en dépouiller des enregistrements.

### 1.3 Enregistrements et analyses

Le LMA a effectué des enregistrements au banc de l'organiste et dans la nef de l'église Sainte Marguerite, à Marseille, ainsi que des enregistrements d'un orgue numérique censé reproduire une configuration similaire. On va présenter ici les protocoles de mesure utilisés puis

montrer comment, à partir de ces enregistrements, définir et estimer une **fonction de transfert** acoustique univoque qui caractérise le chemin entre les points de mesure au banc de l'organiste et dans le public. On verra que les **signaux analytiques** associés aux fréquences fondamentales de jeu permettent notamment d'identifier précisément ces fréquences, les temps de réverbération ainsi que cette fonction de transfert acoustique définie entre banc de l'organiste et public.

## 2 Protocoles expérimentaux

### 2.1 Mesures en l'église Sainte Marguerite

Le LMA a eu accès pour des enregistrements à l'orgue construit en 2003 par Pascal Quoirin en l'église Sainte Marguerite de Marseille. Cet orgue de 17 jeux sur 2 claviers et pédalier s'inspire de petits instruments construits au XVII<sup>ème</sup> siècle en Allemagne du Nord. Il est accordé selon un tempérament Young avec un *la* de référence à 440Hz; sa composition peut être consultée à l'adresse <http://www.aosmarguerite.org>.

La figure 1 montre les dispositifs de prise de son mis en place dans l'église Sainte Marguerite à proximité de l'organiste et dans le public. Sont enregistrés simultanément aux deux positions les signaux recueillis par un *couple ORTF* de microphones Neumann KM 184 et un microphone de mesure Bruel & Kjaer quart de pouce. Le doublet est couramment utilisé en prise de son pour obtenir une image stéréophonique tandis que le microphone de mesure permet une mesure de pression monophonique étalonnée.

Plusieurs jeux et combinaisons de jeux à bouche ont été



FIGURE 1 – Dispositifs de prise de son dans l'église Sainte Marguerite.

utilisés pour les enregistrements, les jeux d'anches ayant été écartés car trop désaccordés au moment des mesures. Plusieurs types de séquences musicales ont été enregistrées; on a notamment recueilli les gammes chromatiques ascendantes, avec des notes tenues environ une douzaine de secondes entrecoupées de silence de même durée, utilisées ci-dessous pour l'estimation d'une fonction de transfert acoustique entre le banc de l'organiste et le public. Comme on le verra ci-dessous, avec ces gammes chromatiques le signal enregistré apparaît comme stationnaire typiquement 6 secondes après l'enfoncement d'une touche et le son d'une

note apparaît comme éteint au moment de l'enfoncement de la touche suivante.

### 2.2 Mesures à l'orgue numérique

Les orgues numériques récents ont une capacité mémoire qui leur permet de restituer des échantillons sonores spécifiques à chaque note de chaque jeu de grands instruments à tuyaux. L'orgue Johannes Classic 350 montré en figure 2 sur lequel le LMA a pu effectuer des enregistrements offre en outre en option la possibilité de restituer le sons de quatre orgues bien identifiés en quatre points d'enregistrement différents, au banc de l'organiste et en trois points de la nef de l'église correspondante. Les sorties audio d'un tel orgue numérique en permettent facilement des enregistrements de qualité. L'entrée MIDI permet un pilotage automatique de l'instrument qui assure notamment une excellente reproductibilité des enregistrements et permet par exemple de très lentes gammes chromatiques sans épuiser un interprète; les logiciels d'édition musicale permettent de créer aisément des fichiers de commande MIDI appropriés.

L'orgue numérique utilisé par le LMA ne permet pas



FIGURE 2 – L'orgue Johannes Classic 350

d'enregistrer simultanément le son reproduit en plusieurs points. En revanche, après s'être assuré de la reproductibilité des mesures et de la synchronisation entre commande MIDI et son, on a construit avec l'orgue numérique des signaux s'apparentant à ceux enregistrés dans l'église Sainte Marguerite en synchronisant, grâce à la commande MIDI et à la fonctionnalité décrite ci-dessus, des enregistrements menés successivement en plusieurs points de mesure supposés.

## 3 Identification d'une fonction de transfert entre organiste et public

### 3.1 Définition consistante d'un transfert

Avec l'orgue comme source acoustique il n'est pas possible d'évoquer sans précaution une *fonction de transfert* entre un microphone au banc de l'organiste et un autre dans le public. En effet plusieurs ensembles de trajets acoustiques sont indépendamment possibles entre les deux microphones à une fréquence donnée, même si un jeu unique est utilisé: y compris en tempérament égal, un tuyau associé à une fréquence fondamentale de jeu grave produira des harmoniques dont la fréquence sera la fondamentale



d'un autre tuyau. Indépendamment de toute considération de traitement du signal, l'opération consistant à diviser une transformée de Fourier du signal enregistré dans le public par la transformée de celui enregistré au banc n'a par exemple pas de sens physique.

Afin d'estimer des grandeurs consistantes pour représenter la différence d'acoustique entre le banc d'organiste et le public, on s'est limité pour des calculs à une fréquence donnée à l'utilisation :

- d'enregistrements recueillis avec un jeu ou une combinaison de jeux unique,
- de données pour lesquelles cette fréquence est uniquement une fréquence fondamentale de correspondant fondamentale de jeu.

### 3.2 Analyse de Fourier des signaux

Pour respecter les conditions ci-dessus les calculs présentés plus loin ont été effectués à partir d'enregistrements de gammes chromatiques, pour une registration donnée, auxquels un filtrage passe-bas des signaux au banc et dans le public a été appliqué à chacune des notes pour ne conserver pour chacune d'elle que la fréquence fondamentale de jeu en éliminant les partiels supérieurs. Ce filtrage ne constitue en aucun cas une étape délicate du traitement des données dans la mesure où il n'est pas nécessaire de connaître les fréquences de jeu avec précision.

La figure 3 montre les signaux temporels recueillis dans l'église Sainte Marguerite sur les deux microphones de mesure, au banc de l'organiste et dans le public, pour l'émission et l'extinction d'une note précise — en l'occurrence le *si* une neuvième au dessus du *la* de référence avec le jeu de *montre 8*. On constate que l'enveloppe du signal de pression varie peu au bout de 7 secondes et avant de couper la note ; on va supposer pour la suite que le signal enregistré est stationnaire dans cet intervalle.

La figure 4 montre le module de la transformée de

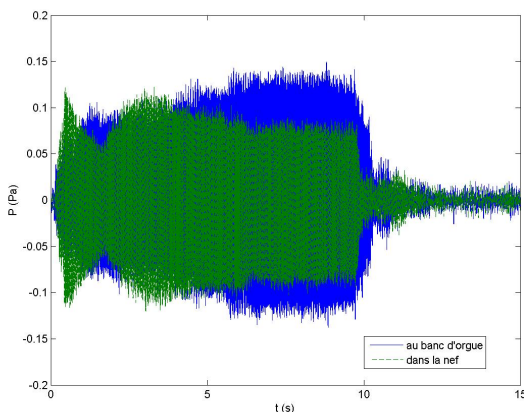


FIGURE 3 – Signaux de pression correspondant à une note enregistrée au banc et dans la nef de Sainte Marguerite

Fourier rapide (FFT) du signal obtenu *via* fenêtrage de Hamming de l'enregistrement au banc dans l'intervalle 7,5s-9,5s ainsi que le module du même signal après filtrage passe-bas de Butterworth d'ordre 8 avec une fréquence de coupure à peu près égale à 1,8 fois la fréquence de jeu supposée ( $1.8 * 440 * 2 * 2^{(1/6)} = 1780\text{Hz}$ ). On constate sur cette figure que le son associé à la note est bien harmonique

et que le filtrage passe bas permet bien d'isoler la composante à la fréquence de jeu fondamentale).

La figure 5 montre maintenant, toujours pour la

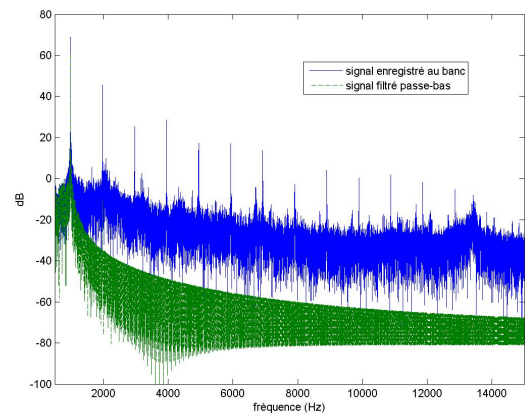


FIGURE 4 – Module de la FFT de la partie stationnaire d'une note enregistrée au banc

même note, le module de la fonction de transfert, entre le microphone au banc et le microphone dans le public, estimée comme rapport des FFT des signaux filtrés passe-bas et fenêtrés dans leur partie stationnaire. On constate que cet estimateur fluctue autour de la fréquence de jeu supposée ; l'information pertinente à la fréquence de jeu se retrouve dispersée entre plusieurs points de calcul de la FFT, ni la fréquence de jeu ni la valeur de la fonction de transfert à cette fréquence qu'on peut retirer de l'analyse par FFT ne sont très précises. Dans ce cas quasi idéal —un signal monofréquentiel stationnaire— on connaît bien sûr de nombreux estimateurs efficaces de la fréquence de jeu [3] ; on pourrait donc calculer la transformée de Fourier des signaux uniquement à cette fréquence fournie par un estimateur et en déduire la fonction de transfert à cette fréquence mais l'approche décrite ci-après, qui a permis d'obtenir des résultats précis *via* d'une représentation graphique de l'enveloppe des signaux, s'est avérée plus efficace.

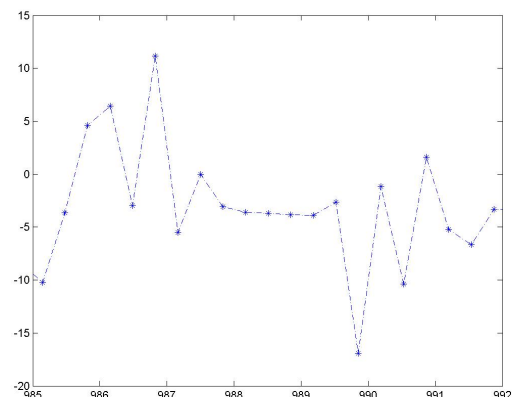


FIGURE 5 – Estimation par FFT du module du transfert autour de la fréquence de jeu

### 3.3 Exploitation de signaux analytiques

Comme le filtrage passe-bas des signaux enregistrés semble conduire, pour chaque note, à un signal mono

fréquentiel, il est tentant d'examiner les signaux analytiques obtenus en adjoignant aux signaux enregistrés et filtrés une partie imaginaire égale à leur transformée de Hilbert. La figure 6 montre, toujours pour la même note que ci-dessus, le module des signaux analytiques ainsi obtenus. La figure 7 montre leur phase déroulée. Ces figures indiquent qu'effectivement on peut considérer les signaux comme une sinusoïde dont l'enveloppe est donnée par le module du signal analytique aussi bien pendant l'attaque et la partie stationnaire de la note que pendant quasiment toute son extinction.

A partir des signaux analytiques construits pour chaque

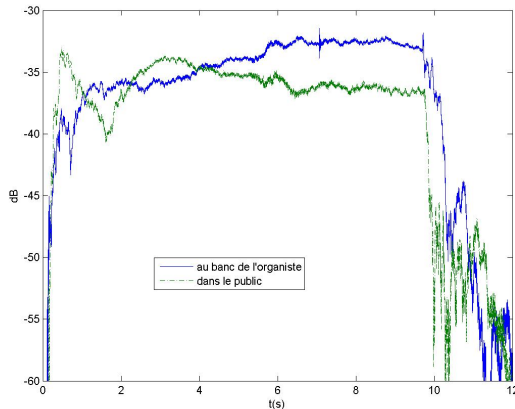


FIGURE 6 – Module des signaux analytiques construits à partir des enregistrements

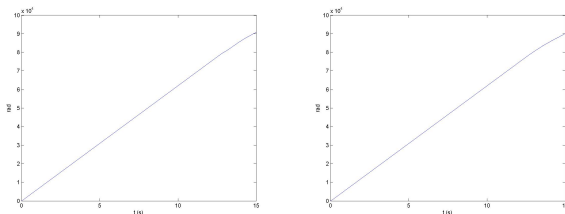


FIGURE 7 – Phase des signaux analytiques construits à partir des enregistrements, au banc et dans le public

note, des procédures de régression linéaire peuvent être mises en place pour identifier automatiquement le module, la phase et la fréquence de jeu associés à la partie stationnaire des signaux. Une régression linéaire peut également être tentée pour identifier un taux de décroissance exponentiel de la pression lors de l'extinction du son, même si la signification du paramètre ainsi extrait à une seule fréquence est limitée. Dans le cas des figures ci-dessus, la fréquence de jeu identifiée est de 988.734Hz à partir du signal au banc de l'organiste et de 988.721Hz, ce qui semble bien consistant ; le temps de réverbération ( $T_{60}$ ) associé à régression de la figure 8 est quant à lui de 4,9s, ce qui d'est un ordre de grandeur raisonnable.

### 3.4 Mesures à l'orgue numérique

Les différentes procédures présentées ci-dessus pour traiter les enregistrements effectués dans l'église de Sainte Marguerite ont été appliquées aux signaux acquis sur un orgue numérique. Comme décrit plus haut deux

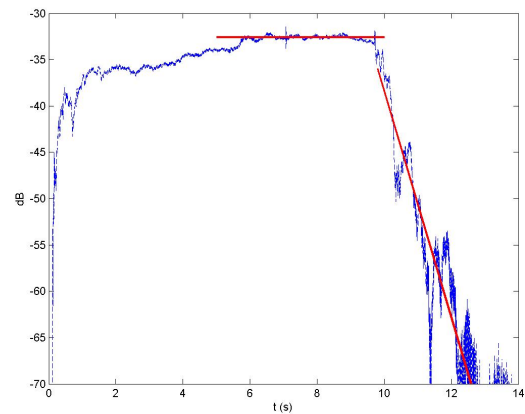


FIGURE 8 – Estimations par régression linéaire du module en régime stationnaire et du taux d'extinction du son

enregistrements ont été successivement conduits, en deux points de mesures supposés, puis synchronisés. Les figures 9 et 10 montrent ainsi les signaux temporels synchronisés et les paramètres estimés comme décrit ci-dessus par régression linéaire à partir du signal analytique construit par fenêtrage et filtrage passe-bas du signal au niveau "du banc de l'organiste". D'une façon générale les signaux apparaissent comme moins bruités que ceux recueillis à l'église et les estimations faites par régression semblent encore plus précises. Toutefois, on a pu constater sur l'ensemble des notes que les fréquences de jeu estimées par régression à partir de la pente de la phase déroulée des signaux étaient significativement différentes "au banc" et "dans le public", avec typiquement 0,1Hz d'écart en milieu de tessiture. A l'heure actuelle les auteurs ignorent d'où provient cette différence mais, si le fabricant de l'orgue a utilisé des signaux non enregistrés simultanément, les fluctuations de température ambiante suffisent à expliquer cette différence ; d'autres explications liés à la restitution des sons par l'orgue, dont on peut aussi ajuster le tempérament et le diapason, sont imaginables. Quoi qu'il en soit cette différence de fréquence apparente remet en cause l'utilisation de données non enregistrées simultanément sur l'orgue numérique.

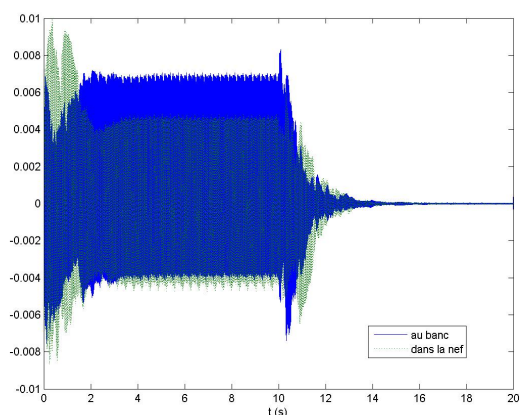


FIGURE 9 – Signaux correspondant à une note enregistrée en deux positions telle que restituée par l'orgue numérique

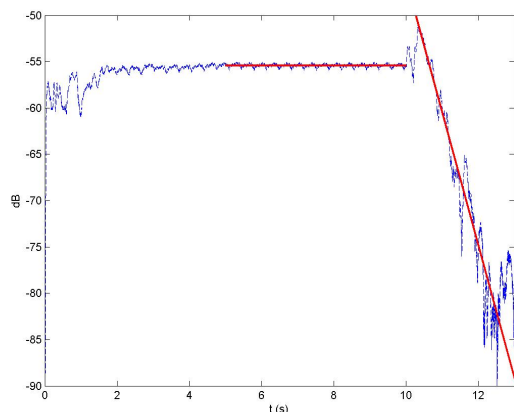


FIGURE 10 – Estimations par régression linéaire avec l'orgue numérique

## 4 Exploitation des transitoires d'attaque pour estimer la clarté

Les procédures décrites ci-dessus permettent d'estimer, aux fréquences fondamentales de jeu, une fonction de transfert consistante entre le son enregistré au banc de l'organiste et celui enregistré dans le public. De cette façon on peut quantifier les différences de coloration du timbre et de niveau entre les plans sonores apportées par l'édifice. Les indicateurs qu'on peut en tirer ne concernent que quelques dizaines de fréquences, celles correspondant aux fréquences de jeu des 56 ou 60 notes des claviers d'orgue augmentées d'une octave dans le grave (avec un jeu de 16 pieds) et de deux ou trois octaves dans l'aigu (jeux de 2 ou 1 pied). On ne dispose pas, avec ces quelques points en fréquence, d'une information suffisante pour comparer la répartition entre réflexions précoces et réverbération tardive qui permettrait de quantifier les différences de clarté de la musique perçue au banc de la musique ou dans le public. Pour estimer de telles grandeurs les composantes stationnaires des sons d'orgue ne suffisent pas, l'information nécessaire ne peut être retrouvée que dans les **composantes transitoires** des notes.

Les transitoires d'extinction qu'on peut obtenir dans les églises ne sont pas reproductibles; si l'on représente le champ acoustique dans l'église comme la superposition d'un très grand nombre de modes, les transitoires d'extinction dépendront de la phase de chacune des variables modales au moment où la note est coupée [4]. En revanche les transitoires d'attaque sont assez bien reproductibles en particulier dans le cas d'un orgue à transmission électrique ou dans le cas d'un orgue numérique. La figure 11 montre pour les premiers instants le module des signaux analytiques construits à partir des signaux enregistrés montrés en figure 9. En négligeant la transmission et l'établissement physique du son au niveau du tuyau, on peut considérer que la figure 11 montre pour une fréquence de jeu l'enveloppe de la convolution d'un cosinus (la note enfoncée) par la réponse temporelle de l'édifice. On constate d'ailleurs sur cette figure que la courbe correspondant à l'enregistrement au banc fluctue moins que celle correspondant au public, à cause de la contribution plus importante des réflexions précoces au signal au banc.

Il semble donc que les transitoires d'attaques enregistrés,

pour une registration donnée et pour chacune des fréquences fondamentales de jeu d'un orgue, contiennent une information susceptible de conduire à des réponses temporelles à partir desquelles des indicateurs de clarté distincts pourraient être calculés en plusieurs points d'une église. A l'heure actuelle les auteurs ne sont pas parvenus à conduire un tel processus à son terme mais tout espoir n'en est pas perdu.

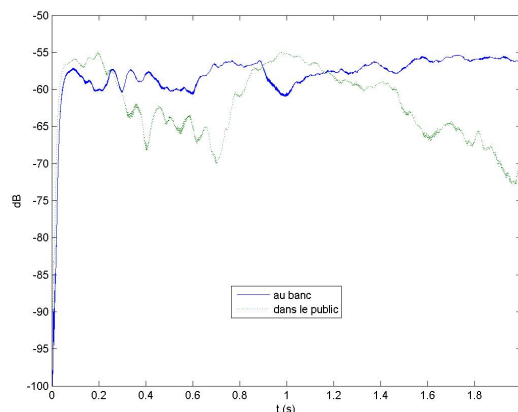


FIGURE 11 – Module de signaux analytiques d'attaque à l'orgue numérique

## 5 Conclusion

On a donc présenté ici des enregistrements d'orgue, effectués dans une église et sur un orgue numérique, à partir desquels une fonction de transfert acoustique entre le banc de l'organiste et un point dans le public a pu être définie et identifiée avec précision à partir du signal analytique associé à chacune des fréquences fondamentales de jeu. De cette façon les différences de coloration et de volumes sonores entre le banc de l'organiste sont bien décrites pour une registration donnée. En revanche on n'a pas encore su proposer de quantification objective, en utilisant l'orgue comme source sonore, des différences de clarté de la musique qu'on observe en différents points. Les travaux du LMA continuent donc dans cette direction avec l'espoir à partir de l'enregistrement des transitoires d'attaque des notes.

Une fois développés et validés des outils de traitement de signal qui permettent de complètement caractériser les différences d'acoustique entre le banc de l'organiste et le public, les auteurs envisagent de les appliquer à plusieurs édifices, d'architecture et de caractéristiques acoustiques bien différentes, incluant des orgues.

## Remerciements

Les auteurs remercient pour leur accueil la paroisse de Sainte Marguerite de Marseille et en particulier André Rossi, organiste titulaire et conservateur de son instrument P. Quoirin. Merci également à Guy Rabau pour l'assistance apportée pendant les enregistrements.

## Références

- [1] J. Meyer, *Acoustics and the Performance of Music*, Springer (2009).
- [2] J. Braasch, Acoustical measurements of expression devices in pipe organs, *Journal of the Acoustical Society of America* **123**, 1683-1693 (2008).
- [3] J. W. Beauchamp (Ed.), *Analysis, Synthesis and Perception of Musical Sounds*, Springer (2007).
- [4] B. Blesser, An Interdisciplinary Synthesis of Reverberation Viewpoints, *Journal of the Audio Engineering Society* **49**(10), 867-903 (2001).